

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
Université Abderrahmane Mira de Bejaia



Faculté de Technologie  
Département de génie électrique

Mémoire de master II

En vue de l'obtention du diplôme de master II en électrotechnique

Option : Commande des Systèmes Electriques

Thème:

---

*Commande d'une génératrice asynchrone dans un  
système de conversion éolien*

---



*Réalisé par :*

- M<sup>elle</sup> GHEBRIOU KAHINA
- M<sup>elle</sup> SAADI AMEL

*Encadré par :*

M<sup>me</sup> RADIA ABDELLI

Année universitaire : 2012/2013

# *Remerciement*

*Tout d'abord, nous tenons à remercier Dieu tout puissant de nous avoir guidé à travers nos choix et notre travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements et notre gratitude à notre promotrice madame **R.ABDELLI** pour sa disponibilité, son dévouement, et ses orientations qui nous ont permis d'enrichir nos connaissances, durant la réalisation de ce travail. On tient également à remercier les professeurs qui ont contribué de près ou de loin à notre formation*

*Nous remercions aussi les membres de jurys d'avoir accepté et d'évaluer ce travail.*

*Pour finir, il nous est plus qu'agréable de réserver l'expression de notre gratitude et nos remerciements les plus particuliers, aux membres de nos familles respectives qui ont su nous encourager et nous soutenir sans siller, durant toute cette année et celles d'avant.*

*Puissent-ils être fiers de nous.*

# DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail à :*

*A celui qui m'a indiqué la bonne voie : à mon cher Père,  
A celle qui a tant veillé sur moi : à ma très chère mère*

*A mes très chers frères et ma sœur Lydia*

*A la mémoire de mes grands-parents.*

*A ma grande mère.*

*A mes oncles et tantes.*

*A tous mes amis.*

*Toute la promotion 2013 d'Electéchnique.*

*Tous ceux qui me sont chers.*

*AMEL*



# ***JE DEDIE CE MODESTE TRAVAIL :***

❖ *A ma famille.*

*A mes très chères parents sur tout ma mère, que dieu la préserve.*

*A mes frères Aissa, Hellal, sa femme Khira, et sa fille Lana.*

*A mes sœurs Hayet, Sakina, Lila, Hadjira, et leurs familles.*

*A ma petite sœur Fahima.*

❖ *A ma belle-famille.*

*Au beau-père, et belle-mère.*

*A mon fiancé Mohand Salah qui me soutient toujours.*

*A mes belles-sœurs Saliha, khadoudja, Ouarda et leurs familles.*

*A mes beaux-frères et leurs familles.*

❖ *Je remercie également ma cher amie et collègue AMEL, qui m'a soutenu le long du parcours de cette formation.*

*A mes copines de chambre sylvia, tinhinane et leurs familles.*

*A tous mes amies Nassima, Lilia, Samra, Hamama, Sabrina, Katia et leurs familles.*

*A la promotion d'électrotechnique (2013).*

***Kahina***



**Nomenclatures**

$P_v$	: La puissance fournie par le vent (W).
$P_t$	: Puissance de la turbine éolienne (W).
$\rho$	: Masse volumique de l'air ( $\text{kg/m}^3$ ).
$S_t$	: La surface balayée par la turbine éolienne ( $\text{m}^2$ ).
$R_t$	: Rayon de la turbine éolienne (m).
$V_v$	: La vitesse du vent (m/s)
$\Omega_t$	: vitesse de la turbine éolienne (rad/s).
$C_p$	: Le coefficient de puissance.
$C_m$	: Le coefficient du couple.
$\lambda$	: Le rapport de la vitesse en bout des pales.
$\lambda_{\text{opt}}$	: Le rapport optimal de la vitesse en bout des pales.
$T_t$	: Couple de la turbine éolienne (N.m).
$\beta$	: L'angle de calage des pales (rad).
$s$	: Opérateur de Laplace
$V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}$	: Tensions d'alimentation des enroulements statoriques (a, b, c) (V).
$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	: Courants statoriques (A).
$R_s$	: Resistance d'une phase statorique (Ohm).
$[L_{ss}]$	: Matrice d'inductance statorique (H).
$L_s$	: Inductance propre d'une phase statorique (H).
$l_s$	: Inductance de fuite d'une phase statorique (H).

$\omega_s$	: Pulsation du champ statorique (rad/s).
$[v_{sabc}]$	: Matrice des tensions statorique (V).
$[i_{sabc}]$	: Matrice des courants statoriques.
$[\Phi_{sabc}]$	: Matrice des flux statoriques.
$[R_s]$	: Matrice des résistances statoriques.
$v_{sd}, v_{sq}$	: Tensions statoriques dans le repère de Park (d, q) (V).
$i_{sd}, i_{sq}$	: Courants statoriques dans le repère de Park (d, q) (A).
$\Phi_{sd}, \Phi_{sq}$	: Flux statoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).
$V_{s\alpha}, V_{s\beta}$	: Tension statorique dans le repère de Concordia (v) .
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	: Les courants de phases statoriques dans le repère de Concordia (A).
$\varphi_{s\alpha}, \varphi_{s\beta}$	: Les flux statorique dans le repère de Concordia (Wb).
$\theta_s$	: Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park (rad).
$[v_{sdqo}]$	: Matrice des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
$[i_{sdqo}]$	: Matrice des courants statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
$[\Phi_{sdqo}]$	: Matrice des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
$v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$	: Tensions d'alimentation des enroulements rotoriques (a, b, c) (V).
$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$	: Courants rotoriques (A).
$R_r$	: Resistance d'une phase rotorique (Ohm).
$[L_{rr}]$	: Matrice d'induction rotorique (H).
$L_r$	: Inductance propre d'une phase rotorique (H).
$l_r$	: Inductance de fuite d'une phase rotorique (H).

$\omega_r$	: Pulsation du champ rotorique (rad/s).
$[V_{rabc}]$	: Matrice des tensions rotorique.
$[i_{rabc}]$	: Matrice des courants rotoriques.
$[\Phi_{rabc}]$	: Matrice des flux rotoriques.
$[R_r]$	: Matrice des résistances rotoriques.
$V_{rd}, V_{rq}$	: Tensions rotoriques dans le repère de Park (d, q) (V).
$V_{r\alpha}, V_{r\beta}$	: Tension rotorique dans le repère de Concordia (v).
$i_{rd}, i_{rq}$	: Courants rotoriques dans le repère de Park (d, q) (A).
$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$	: Les courants de phases rotorique dans le repère de Concordia (A)
$\Phi_{rd}, \Phi_{rq}$	: Flux rotoriques dans le repère de Park (d, q) (Wb).
$\varphi_{r\alpha}, \varphi_{r\beta}$	: Les flux rotorique dans le repère de Concordia (Wb).
$\Theta_r$	: Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park (rad).
$[V_{rdqo}]$	: Matrice des tensions rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
$[i_{rdqo}]$	: Matrice des courants rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
$[\Phi_{rdqo}]$	: Matrice des flux rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère Park.
$X_{dqo}$	: Les grandeurs (courants, tension, flux) dans le repère de PARK.
$X_{\alpha\beta o}$	: Les grandeurs (courants, tension, flux) dans le repère de Concordia.
$[M_s]$	: Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator (H).
$[M_r]$	: Coefficient de mutuelle inductance ente deux phases du rotor (H).
$[M_0]$	: Maximum de l'induction mutuelle entre phase du stator et phase du rotor (H).

$[M_{sr}]$	: Matrice d'inductance mutuelle entre stator et rotor (H).
$[M_{rs}]$	: Matrice d'inductance mutuelle rotor et stator (H).
$\omega$	: Vitesse électrique de la machine (rad/s).
$p$	: Nombre de paires de pôles de la machine.
$\theta$	: Angle électrique de position de la machine (rad).
$\theta_{sr}$	: L'angle entre les vecteurs flux.
$g$	: glissement de la machine.
$\sigma$	: Coefficient de dispersion.
$J$	: Inertie totale ramenée à l'arbre de moteur.
$F$	: Coefficient de frottement .
$\Omega_m$	: Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).
$T_{em}$	: Couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone (N.m)
$G$	: Gain du multiplicateur.
$v_{ar}, v_{br}, v_{cr}$	: Tensions de référence du redresseur (V).
$i_{ar}, i_{br}, i_{cr}$	: Courants de référence du redresseur (A).
$i_{dc}$	: Courant modulé par le redresseur (A).
$S_a, S_b, S_c$	: Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur du redresseur.
$V_{cha}, V_{chb}, V_{chc}$	: Tensions à la sortie de l'onduleur (V).
$i_{cha}, i_{chb}, i_{chc}$	: Courants alternatifs de l'onduleur (A).
$i_{on}$	: Courant modulé par l'onduleur (A).
$S_a', S_b', S_c'$	: Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur.
$V_{n0}$	: La tension fictive entre le neutre de la MAS et le point fictif d'indice( 0) (V).



$V_{dc}$	: Tension du bus continu (V).
$i_c$	: Courant capacitif (A).
$C$	: Capacité du bus continu (F).
$m$	: Indice de modulation de la MLI.
$r$	: taux de modulation de la MLI.
$f$	: fréquence du champ tournant.
$E_1, E_2, E_3$	: Tensions du réseau (V).
$i_{res1}, i_{res2}, i_{res3}$	: Courants du réseau (A).
$R_{res}$	: Résistance du réseau (Ohm).
$L_{res}$	: Inductance du réseau (H).
$P$	: Puissance active envoyée au réseau(W).
$Q$	: Puissance réactive envoyée au réseau (VAR).
$C_{eref}$	:La référence du couple (N.m).
$C_{cpl}$	: La grandeur de sortie du contrôleur du bras de l'onduleur.
$C_{flx}$	: La grandeur de sortie du contrôleur de flux.
$\Delta C_e$	: La bande d'hystérésis du correcteur couple (N.m).
$\Delta\varphi_s$	: La largeur d'hystérésis du correcteur flux (wb).

## **Liste des figures**

### **FIGURES DE CHAPITRE I**

Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	3
Figure I.2 : Composants d'une éolienne.	6
Figure I.3 : Schéma de principe du rotor de Savonius.	8
Figure I.4 : Schéma de Darrieus	9
Figure I.5 : Eolienne à axe vertical	10
Figure I.6 : Eolienne à axe horizontal.	11
Figure I.7 : Théorie de Betz.	13
Figure I.8 : Zone de fonctionnement d'une éolienne	14
Figure I.9 : Génératrice synchrone connectée directement au réseau	17
Figure I.10: système éolien basé sur une génératrice asynchrone à cage à fréquence variable	19
Figure I.11 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles.	20
Figure I.12 : Génératrice double alimentation connecté directement aux réseaux.	21

### **FIGURES DE CHAPITRE II**

Figure II.1 : Chaîne de conversion éolienne.	24
Figure II.2 : Système à modéliser.	25
Figure II.3: Courbe $C_p(\lambda)$ .	26
Figure II.4 : Schéma du modèle de la turbine.	28
Figure II.5: Caractéristique de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse De rotation.	29
Figure II.6 : Schéma de la turbine avec l'algorithme MPPT.	30
Figure II.7 : Coupe d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil.	32

Figure II.8 : Différentes zones de fonctionnement de la MAS.	32
Figure II.9 : Représentation schématique de la machine asynchrone.	33
Figure II.10 : Représentation de la machine dans le repère diphasé.	37
Figure II.11 : Redresseur et onduleur.	42
Figure II.12 : Interrupteur équivalent.	43
Figure II.13 : Schéma de l'onduleur de tension.	44
Figure II.14 : Courant du bus continu.	46
Figure II.15 : Schéma électrique de la liaison réseau.	47
Figure II.16 : Le filtre.	48
Figure II.17 : Le transformateur.	48

### **FIGURES DE CHAPITRE III**

Figure III.1. Représentation des vecteurs tensions générées par l'onduleur.	53
Figure III.2 : Evolution du vecteur flux stator.	55
Figure III.3 : Choix de vecteur tension.	57
Figure III.4 : Sélection des tensions $V_i$ correspondant au contrôle de l'amplitude de flux statorique $\varphi_s$	60
Figure III.5 : Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le module de vecteur de flux statorique	60
Figure III.6 : Comparateur à hystérésis à trois niveaux utilisés pour le réglage du couple.	62
Figure III.7 : Contrôle de la puissance	65
Figure III.8 : Schéma de principe de la commande MLI.	67
Figure III.9 : Schéma de principe de contrôle direct du couple étudié.	67

### **FIGURES DE CHAPITRE IV**

Figure IV.1 : la vitesse du vent.	69
-----------------------------------	----

---

## Liste des figures et Tableaux

Figure IV.2 : Réponse dynamique du couple pour des différentes références du couple.	70
Figure IV.3: Réponse dynamique du flux statorique.	71
Figure IV.4 : Courant de phase envoyée au réseau.	71
Figure IV.5:Tension de bus continu( $v_{dc}$ ).	72
Figure IV.6 : Tension de phase.	73
Figure IV.7 : Facteur de puissance ( $\cos\varphi$ ).	73

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Classification des turbines	11
Tableau III.1 : La table de commutation de la commande directe du couple.	64

## **Liste des figures et Tableaux**

---

---

## Sommaire

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre I : Généralité sur les systèmes éolienne</b>	
I.1. Introduction.....	3
I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne.....	3
I.2.1. Définition de l'énergie éolienne.....	3
I.2.2. Principaux composants d'une éolienne.....	4
I.2.2.1. Le mât.....	4
I.2.2.2. La nacelle.....	4
I.2.2.3. Le rotor.....	4
I.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	6
I.3.1. Avantages.....	6
I.3.2. Inconvénients.....	7
I.4. Les différents types d'éoliennes.....	7
I.4.1. Les éoliennes à axe vertical.....	7
I.4.2. Les éoliennes à axe horizontal.....	10
I.5. Notions théoriques sur l'éolien.....	11
I.5.1. Coefficient de Puissance $C_p$ .....	11
I.5.2. Couple produit par l'éolienne.....	12
I.5.3. Vitesse spécifique de l'éolienne.....	12
I.5.4. Limite de Betz.....	12
I.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	13
I.7. Zone de fonctionnement d'une éolienne.....	14
I.8. Mise en œuvre des éoliennes.....	15
I.8.1. Recherche du rendement maximum MPPT.....	15
I.8.2. Mode de couplage (au réseau et réseau autonome).....	15

I.9. Chaîne de conversion électromécanique.....	16
I.9.1. Génératrice synchrone.....	16
I.9.1.1. Les avantages et les inconvénients.....	17
I.9.2. Génératrice asynchrone.....	17
I.9.2.1. Génératrice asynchrone à cage d'écureuil.....	18
I.9.2.2. Génératrice asynchrone à double alimentation.....	20
I.9.2.3. Les avantages et les inconvénients.....	21
I.10. Conclusion.....	22
<b>Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion</b>	
II.1. Introduction.....	24
II.2. Modélisation de la partie mécanique :.....	24
II.2.1. Modèle du vent .....	24
II.2.2. Modèle de la turbine éolienne.....	25
II.2.3. Modèle du multiplicateur .....	26
II.2.4. Équation dynamique de l'arbre de transmission .....	27
II.2.5. Méthodes de recherche du point maximum de puissance.....	28
II.2.5.1. Maximisation de la puissance.....	29
II.3. Modélisation de la partie électrique.....	30
II.3.1. Fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d'écureuil.....	30
II.3.1.1. Hypothèses simplificatrices.....	33
II.3.1.2. Équations générales de la machine asynchrone .....	33
II.3.1.3. Équations magnétiques.....	34
II.3.2. Transformation du système triphasé au biphasé.....	35
II.3.2.1. Transformation de Park.....	35
II.3.2.2. Expression du couple électromagnétique .....	39
II.3.2.3. Choix du repère (dq) .....	39

II.3.2.4. Transformation de Concordia .....	40
II.4. Modélisation du système de puissance (redresseur, onduleur).....	42
II.4.1. Modélisation des convertisseurs statiques.....	42
II.4.1.1. Le redresseur.....	43
II.4.1.2 L'onduleur.....	43
II.4.1.2.1. Calcul des tensions de sortie de l'onduleur.....	44
II.4.1.3. Modélisation du bus continu.....	45
II.5. Modélisation de la liaison au réseau.....	46
II.5.1. Modélisation du filtre .....	47
II.5.2 Modélisation du transformateur.....	48
II.6. Conclusion.....	49
<b>Chapitre III : contrôle direct du couple</b>	
III.1. Introduction.....	50
III.2. Caractéristiques générales d'une commande directe de couple.....	50
III.3. Les avantages et les inconvénients de la DTC.....	50
III.3.1. Les avantage.....	50
III.3.2. Les inconvénients.....	51
III.4. Principe de la commande DTC .....	51
III.5. Modélisation vectorielle de la machine asynchrone et de l'onduleur de tension.....	52
III.6. Contrôle de flux et de couple électromagnétique.....	53
III.6.1. Contrôle vectoriel de couple .....	54
III.6.2. Contrôle du flux statorique.....	54
III.7. Présentation de structure de commande.....	56
III.7.1. Choix du vecteur $V_s$ .....	56
III.7.2. Estimations .....	58



III.7.2.1. Estimation du flux statorique.....	58
III.7.2.2. Estimation du couple électromagnétique.....	59
III.7.3. Elaboration de vecteur de commande.....	59
III.7.3.1. correcteur du flux.....	59
III.7.3.2. Contrôle du couple.....	61
III.7.3.2.1. Correcteur à deux niveaux .....	61
III.7.3.2.2. Correcteur à trois niveaux .....	62
III.7.3.3. La table de commutation.....	63
III.8. Commande de convertisseur coté réseau.....	64
III.8.1. Contrôle de puissance.....	64
III.8.2. Commande MLI .....	66
III.9. Structure générale de la commande DTC classique.....	67
III.10. Conclusion.....	68

#### **Chapitre IV : Résultats de simulation**

IV.1. Introduction.....	69
IV.2. Présentation et interprétation des résultats.....	69
VI.3. Conclusion.....	74
Conclusion générale.....	75
Références bibliographiques.....	76
Annexe .....	79

### **Introduction générale**

L'énergie électrique est au cœur de notre société moderne qui aurait bien de peine si elle devait s'en passer. Sa facilité de transport et surtout sa transformation en une autre forme d'énergie en font un élément désormais indispensable.

En effet, quel appareil domestique ou industriel n'utilise pas d'électricité, que ce soit pour l'éclairage, le chauffage, la réalisation de mouvements de rotation ou de translation, la transmission de signaux, ainsi que le fonctionnement de l'imagerie médicale et bien d'autres choses encore. La liste est presque infinie en fait. C'est pour cela que la production de l'énergie électrique est importante et qu'il est intéressant de pouvoir trouver des solutions afin d'en produire toujours plus mais de manière plus propre et plus durable.

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et, plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable. Elle tire son nom d'Eole le nom donné au dieu du vent dans la Grèce antique.

Le dispositif en question présente de nombreux avantages. En effet, il produit une énergie complètement propre. Il n'émet ni déchet ni gaz à effet de serre. Son fonctionnement n'est pas polluant pour l'atmosphère le sol et l'eau. Il convertit en électricité une ressource abondante, gratuite et illimitée.

Le premier chapitre est consacré à la présentation de quelques généralités sur les éoliennes et le choix de la structure à étudier.

Le deuxième chapitre présente la modélisation de la chaîne de conversion éolienne qui se compose de la turbine, de la machine asynchrone à cage, du bus continu, des convertisseurs de puissance et de la liaison au réseau, en utilisant des modèles mathématiques.

Le troisième chapitre met en œuvre la commande directe du couple afin de réguler le flux statorique et le couple électromagnétique en réalisant un schéma de principe qui nous permettra de faire la simulation de ce modèle.

Et finalement, le quatrième chapitre, comportera la représentation et l'interprétation des résultats de simulation numérique du modèle de la chaîne de conversion réalisé sous l'environnement Matlab/Simulink.



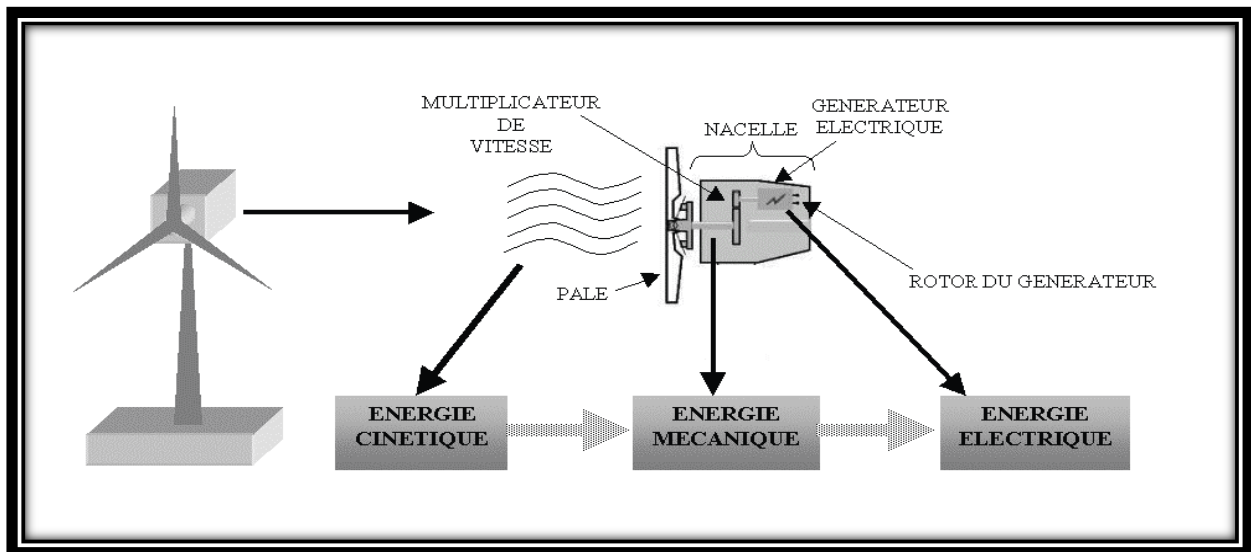
## I.1. Introduction

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique (par un arbre de transmission), puis en électricité (par l'intermédiaire d'une génératrice). Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal).

Ainsi, les capteurs utilisés sont de plus en plus performants. Outre leurs caractéristiques mécaniques nous nous intéresserons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. De nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, Ils utilisent des génératrices synchrones et asynchrones, afin d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite, le rendement énergétique et la robustesse des commandes appliqués.

## I.2. Descriptif et qualités de l'énergie éolienne

### I.2.1. Définition de l'énergie éolienne



**Figure I.1 :** Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée) [2]. De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pâles de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes des



plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. [3]

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière. [4]

### **I.2.2. Principaux composants d'une éolienne**

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (figure I.2).

- le mât
- la nacelle
- le rotor

#### **I.2.2.1. Le mât**

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. [5]

#### **I.2.2.2. La nacelle**

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbre lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de commande, système de refroidissement, frein à disque différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge, le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). [5]

#### **I.2.2.3. Le rotor**

Le rotor, est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie généralement de 1 à 3, le rotor tripale



étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. [5]

Il existe deux types de rotors, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable.

### **❖ Les rotors à vitesse fixe**

Sont souvent munis d'un système d'orientation de pales permettant à la génératrice (généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil) de fonctionner au voisinage du synchronisme et d'être connectée directement au réseau sans dispositif d'électronique de puissance. [6]

### **❖ Les rotors à vitesse variable**

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisées car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique). [6]

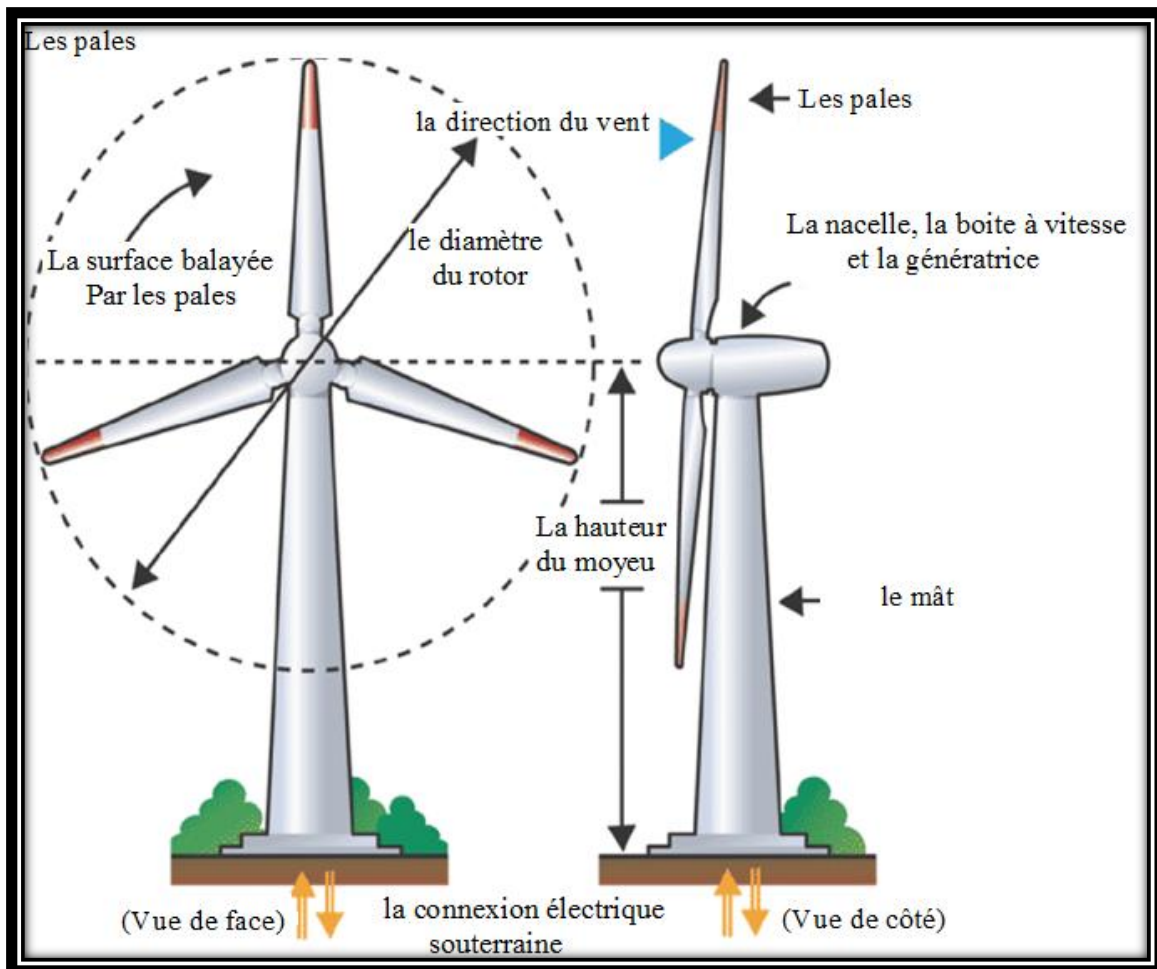


Figure I.2: Composants d'une éolienne

### I.3. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

#### I.3.1. Avantages

- Ecologiquement, l'énergie éolienne est une énergie propre.

- Elle ne nécessite aucun carburant.
- Elle ne crée pas de gaz à effet de serre.
- Elle ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- Elle n'est pas une énergie à risque.

- L'énergie éolienne est une énergie durable et renouvelable : elle est issue d'un potentiel énorme et inépuisable.



- Economiquement :

- Les éoliennes peuvent alimenter des sites isolés et non raccordés au réseau électrique général.
- L'énergie éolienne est la moins coûteuse par rapport aux autres énergies renouvelables (pour les sites bien ventés). [6]

### **I.3.2. Inconvénients**

- Le problème majeur de l'énergie éolienne, est l'instabilité de la puissance fournie, car lorsqu'elle est inférieure à la capacité du réseau, on utilise des sources de puissance complémentaire (groupes électrogènes). Quand cette puissance dépasse la capacité de la charge du réseau, l'intervention d'un système de régulation (stockage, ajout de charge de délestage . . . .) est nécessaire.
- Coût d'achat et d'installation élevés ne rendant pas rentable l'investissement que sur plus de 10 ans.
- La perturbation de l'écologie locale des sites : il faut éviter que les fermes soient situées sur le couloir de migration des oiseaux mais plus globalement celle de la faune et de la flore en général. [6]

### **I.4. Les différents types d'éoliennes**

Généralement les éoliennes sont classées en deux catégories :

- éolienne à axe vertical
- éolienne à axe horizontal

#### **I.4.1. Les éoliennes à axe vertical**

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :





- Le rotor de Savonius dont le fonctionnement est basé sur le principe de « traînée différentielle » utilisée dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur. [7], [8]

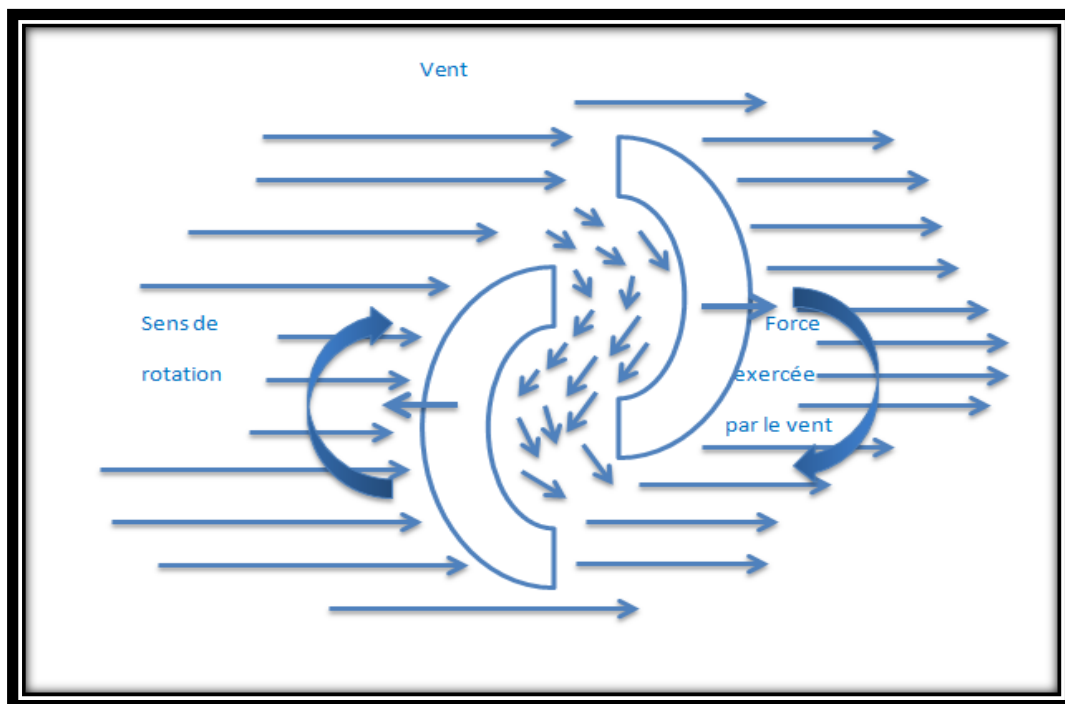


Figure I.3 : Schéma de principe du rotor de Savonius

- Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de Darrieus. Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure I.4) est soumis à des forces de direction et d'intensité variable. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent.

Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe



(montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

- Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voir actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité.

Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances relevées. [7], [8]

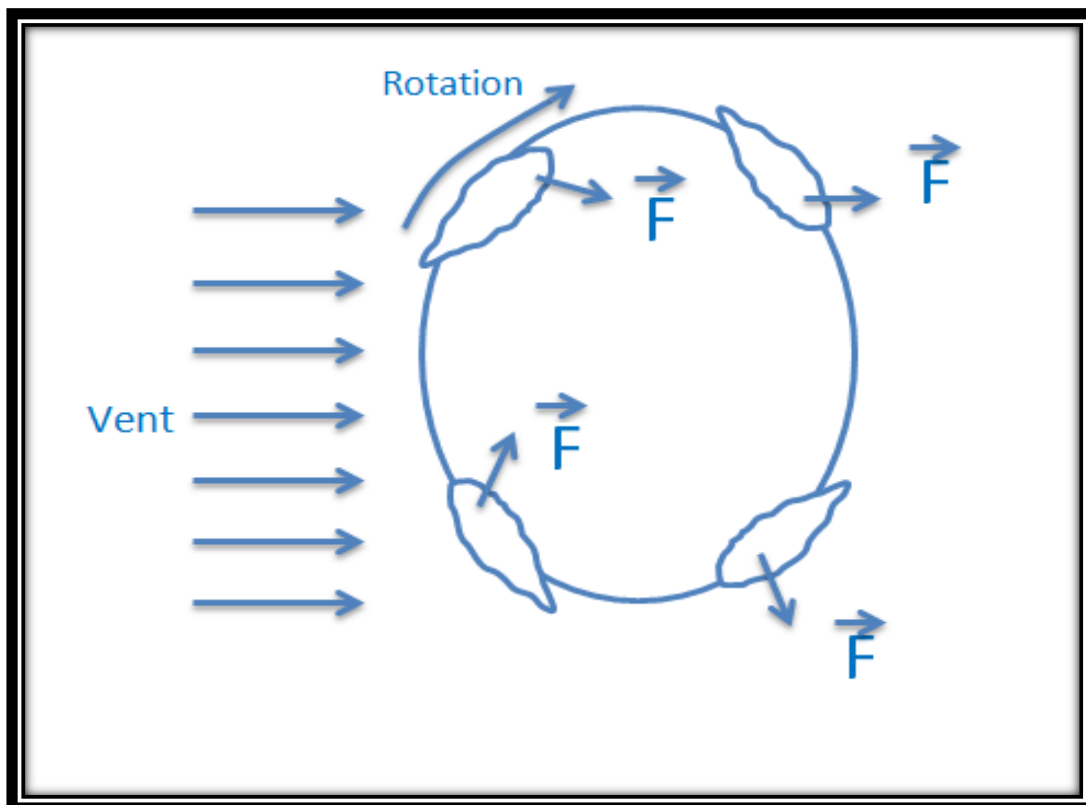


Figure I.4 : Schéma de Darrieus



Figure I.5 : Eolienne à axe vertical

#### I.4.2 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont beaucoup plus largement employées elles sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pâles profilées aérodynamique. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical ; elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques. [6]

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

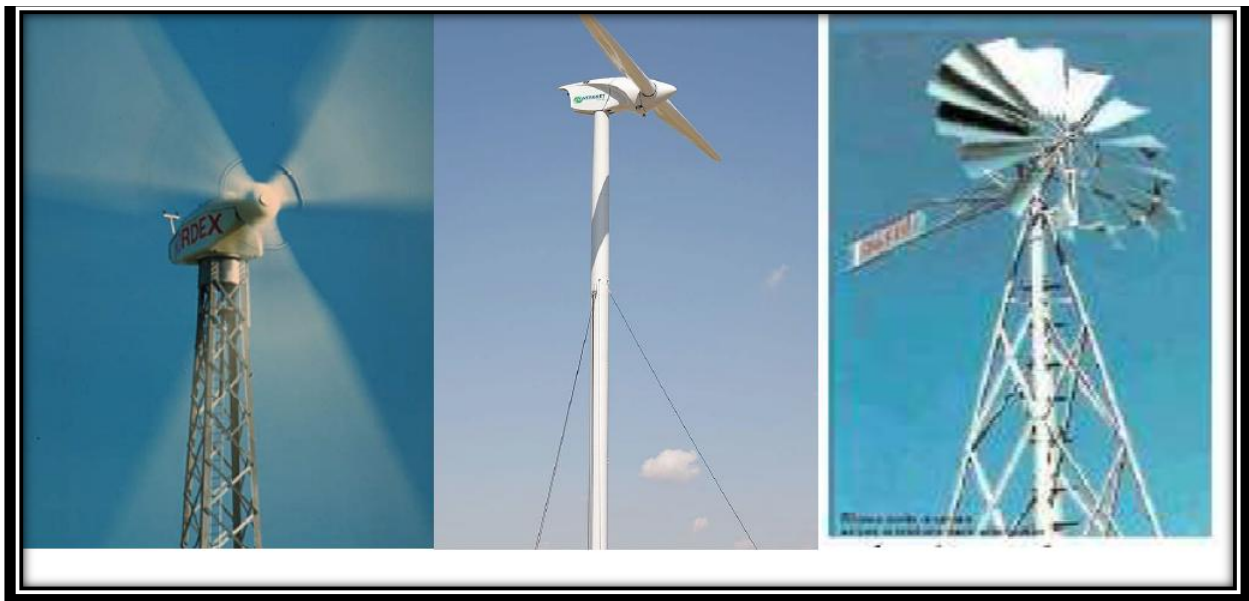
- Eoliennes de petite puissance : inférieur à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieur à 1 MW.

A titre de comparaison, le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice. [1]



Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 Kw
Moyenne	12 m à 45m	De 40 Kw à 1 Mw
Grande	46 m et plus	1 Mw et plus

**Tableau I.1** : Classification des turbines



**Figure I.6** : Eolienne à axe horizontal

**I.5. Notions Théoriques sur L'éolien**

**I.5.1. Coefficient de Puissance  $C_p$**

Il est défini par le rapport de la puissance  $P_t$  recueillie sur l'arbre moteur du capteur à la puissance cinétique qui passerait dans le disque du rotor en son absence. [7], [9]

$$C_p = \frac{P_t}{0.5 \cdot \rho \cdot S_t \cdot V_v^3} \tag{I.1}$$

Avec:

$P_t$  : Puissance de la turbine éolienne.

$S_t$ :  $\pi \cdot R_t^2$ , surface balayée par la turbine éolienne.

$\rho$  : masse volumique de l'air.

$V_v$  : La vitesse de vent.



Le coefficient  $C_p$  est variable, il est fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation de la turbine  $\Omega_t$ , il est souvent représenté en fonction du ratio de vitesse  $\lambda$  et de l'angle de calage des pâles.[10].

### I.5.2. Couple produit par l'éolienne

Le coefficient de couple  $C_m$  est assez proche du coefficient de puissance  $C_p$ , il est très utile afin d'estimer la valeur des couples, a différent point de fonctionnement. [9], [11]

Sa relation est déterminée par :

$$C_m = \frac{\Gamma_t}{0.5 \cdot \rho \cdot S_t \cdot R_t \cdot V_v^3} \quad (\text{I.2})$$

Avec :

$\Gamma_t$  : Couple de la turbine éolienne.

$R_t$  : Rayon de la turbine éolienne.

### I.5.3. Vitesse Spécifique de L'éolienne

Dit aussi paramètre de rapidité ou encore rapport de vitesse en bout de pôle (tip-speed ratio), comme étant le rapport de la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent : [10]

$$\lambda = \frac{R_t \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (\text{I.3})$$

Avec :  $\Omega_t$  : La vitesse de la turbine

### I.5.4. Limite de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par Betz. Il suppose que les pales sont placées dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse  $V_1$  et a l'infini aval d'une vitesse  $V_2$ .

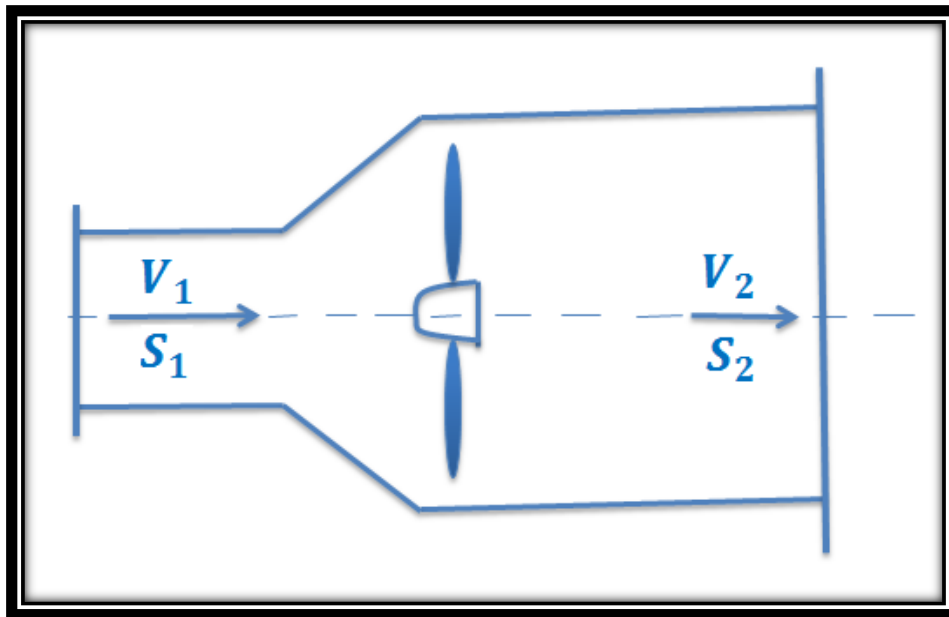


Figure I.7 : Théorie de Betz

Avec :

$V_1$  : La vitesse du vent avant les pales de l'éolienne.

$V_2$  : La vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pâles de l'éolienne.

A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active  $S$  de la voilure, la puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active  $S$  de l'éolienne est donnée par : [12],[13]

$$P_V = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{I.4})$$

$P_V$ : Puissance de vent

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

$$P_{max} = \frac{16}{27} \cdot P_V = 0.59 \cdot P_V \quad (\text{I.5})$$

## I.6. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force



parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice. [3]

### I.7. Zone de fonctionnement d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer sur son arbre une puissance nominale  $P_n$  qui est obtenue à partir d'une vitesse du vent  $V_n$ . Lorsque la vitesse du vent est supérieure à  $V_n$ , un système de freinage se met en marche afin d'éviter la destruction mécanique, de sorte que sa vitesse de rotation reste pratiquement constante. [14], [15]

La figure suivante illustre les différentes zones de fonctionnement de l'éolienne :

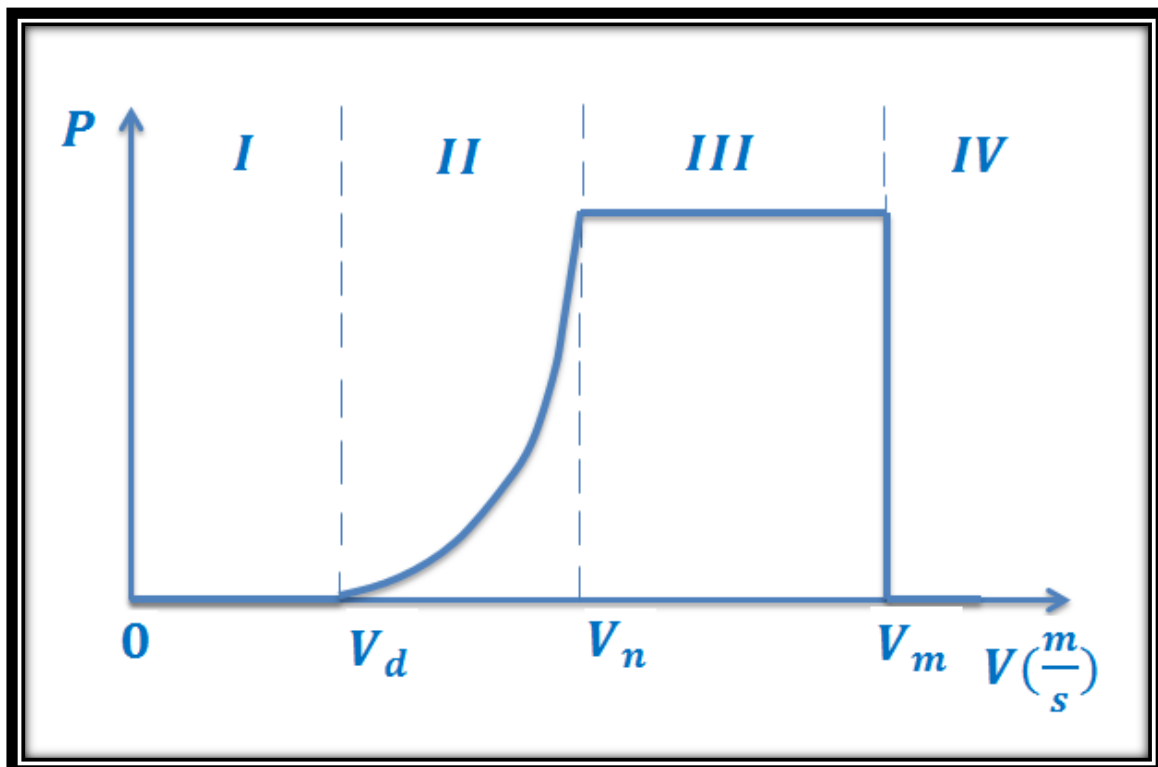


Figure I.8 : Zone de fonctionnement d'une éolienne

Avec :

$V_d$  : La vitesse de démarrage, à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de la puissance.

$V_m$  : La vitesse maximale du vent, pour laquelle la turbine doit s'arrêter, pour des raisons de sécurité.



$V_n$ : La vitesse nominale à partir de laquelle l'éolienne est en plein production.

Ainsi la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte quatre zones :

- La zone I, où la puissance est nulle ( $P = 0$ ), la turbine ne fonctionne pas.
- La zone II, où la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent  $V$ .
- La zone III, où la puissance est maintenue constante et égale à  $P_n$ .
- La zone IV, où le système de sûreté de fonctionnement arrête le transfert de l'énergie.[10]

## **I.8. Mise en œuvre des éoliennes**

### **I.8.1. Recherche du rendement maximum MPPT**

Les éoliennes utilisées pour la production d'électricité doivent permettre de produire un maximum de puissance en exploitant au mieux l'énergie disponible dans le vent. C'est pour cela que de nombreux systèmes de commande de l'éolienne, agissant au niveau de la partie mécanique ou électrique, sont développés pour maximiser la conversion d'énergie.

On parle alors de recherche du point de fonctionnement à puissance maximum (MPPT en anglais pour Maximum Power Point Tracking). Ces systèmes utilisent différents moyens afin d'obtenir ce point de puissance maximum. Il est possible de modifier l'angle de calage des pales, ou la vitesse de rotation de l'hélice ou bien encore de jouer sur la commande de la génératrice.

La recherche du maximum se fait en permanence et l'éolienne s'adapte donc à chaque variation de vent pour être dans une configuration d'extraction maximale de puissance.

De tels systèmes incorporent aussi des sécurités qui permettent par exemple de limiter la puissance produite lorsque le vent devient trop important et risque d'endommager l'éolienne. [12], [16], [17]

### **I.8.2. Mode de couplage (au réseau et réseau autonomes)**

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

- ❖ D'une part il y a les sites isolés où l'énergie est produite et consommée sur place ou à proximité du générateur. Un réseau local (faible), à faible puissance de court-circuit, doit être créé et stabilisé.





❖ D'autre part les systèmes sont (en majorité) connectés au réseau national. [1]

### **I.9. Chaînes de conversion électromécanique**

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

#### **I.9.1. Génératrice synchrone**

C'est une machine de conception plus simple que la machine à courant continu. Son stator comporte des enroulements induits monophasés ou triphasés et son rotor porte un inducteur bobiné ou à aimants permanents. Ici il n'y a plus de système balais collecteur. L'alimentation de l'inducteur se fait par une petite génératrice inversée au bout d'arbre. La tension statorique est proportionnelle au courant d'excitation et à la vitesse de l'éolienne, la fréquence de la tension de sortie dépend aussi de la vitesse de rotation. Une connexion directe au réseau n'est pas envisageable car l'éolienne devrait fonctionner toujours à la vitesse de synchronisme.

Ces machines sont caractérisées par le fait que la fréquence des phénomènes générés est directement liée à la vitesse selon la formule suivante :

$$N = \frac{60 \cdot f}{P} \quad (I.6)$$

Avec :

N : Vitesse de rotation en tr/min

P : Nombre de pair de Pôle de la machine.

f : Fréquence du champ tournant.

Ces machines sont largement répandues pour la production d'électricité et sont bien adaptées à la production éolienne (figure I.10).

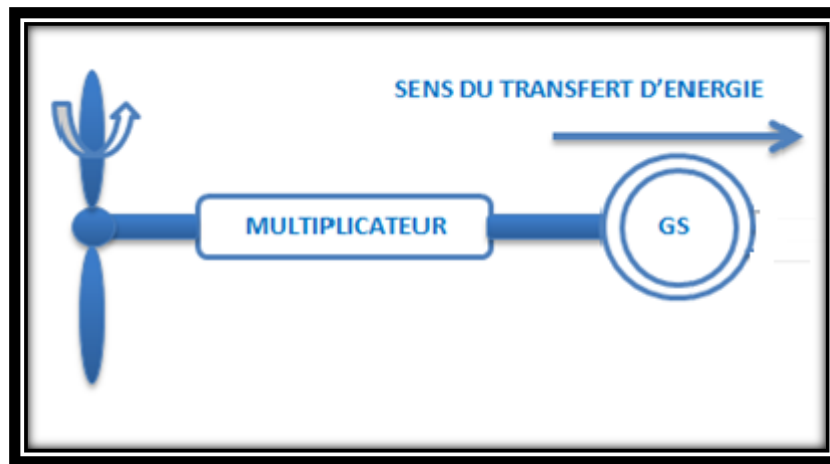


Figure I.9 : Génératrice synchrone

### I.8.1.1. Les avantages et les inconvénients

- **Les avantages :**

- ✓ Vitesse du rotor égale à la vitesse du champ tournant indépendante de la charge.
- ✓ L'augmentation de la charge provoque une variation du déphasage entre le rotor et le champ tournant.
- ✓ Le rotor est constitué d'aimants permanents ou d'électroaimant. Dans le deuxième cas, on doit fournir un courant d'excitation au rotor (bagues de connexion).
- ✓ Bon rendement (0.985 pour gros alternateurs).

- **Les inconvénients**

- ✓ Pour les moyens/gros moteurs (électroaimant), demande un entretien des bagues.
- ✓ Ne permet pas un démarrage en direct sur le réseau (possible pour les moteurs auto synchrones hybrides, ils possèdent une cage d'écureuil qui permet d'atteindre la vitesse synchrone à vide.
- ✓ Si on demande trop de couple à un moteur synchrone, il décroche.

### I.9.2. Génératrice asynchrone

Les génératrices asynchrones sont les génératrices les plus utilisées actuellement dans l'industrie, car elles sont robustes, fiables et d'un faible poids. D'autre part il est possible de les connecter directement au réseau sans être confronté aux problèmes de l'amplitude et de la



fréquence de la tension de réseau grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux de stator et la vitesse de rotation du rotor.

Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines asynchrones. L'introduction des convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet de découpler la fréquence de réseau et la vitesse de rotation de la machine, et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable.

Il est possible de produire de l'énergie avec des vitesses de rotation du rotor variant dans une large plage.

En effet, la fréquence des tensions de sortie d'une machine asynchrone dépend de sa vitesse de rotation et donc du glissement  $g$  :

$$g = \frac{\Omega_s - \Omega_r}{\Omega_s}. \quad (1.7)$$

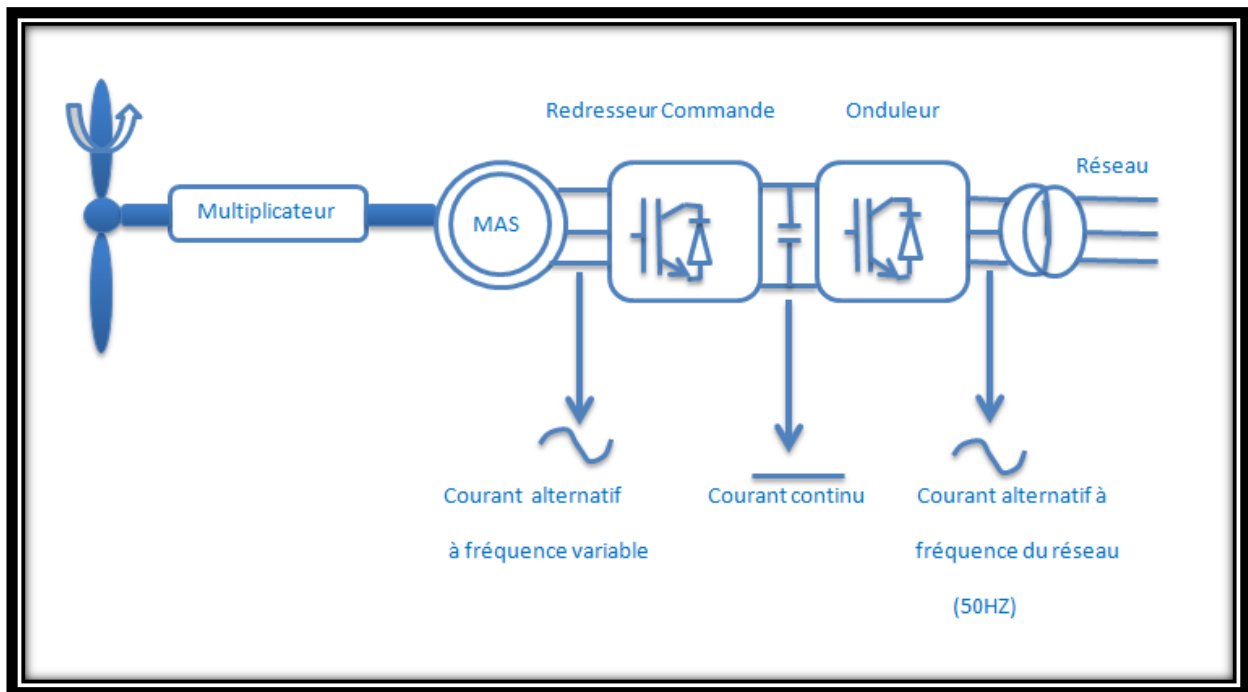
Avec :

$\Omega_r$  : vitesse de rotation du rotor en rd/sec.

$\Omega_s$  : vitesse de synchronisme en rd/sec.

### **I.9.2.1. Génératrice asynchrone à cage d'écureuil**

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil est appelée aussi génératrice à rotor en court-circuit. Le circuit du rotor est constitué de barres conductrices régulièrement réparties entre deux couronnes métalliques formant les extrinsèques, le tout rappelant la forme d'une cage d'écureuil, cette cage est insérée à l'intérieur d'un circuit magnétique analogue à celui d'une génératrice à rotor bobiné (figure I.11).



**Figure I.10:** Système éolien basé sur une génératrice asynchrone à cage à fréquence variable

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

La caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la (Figure I.12). [11]

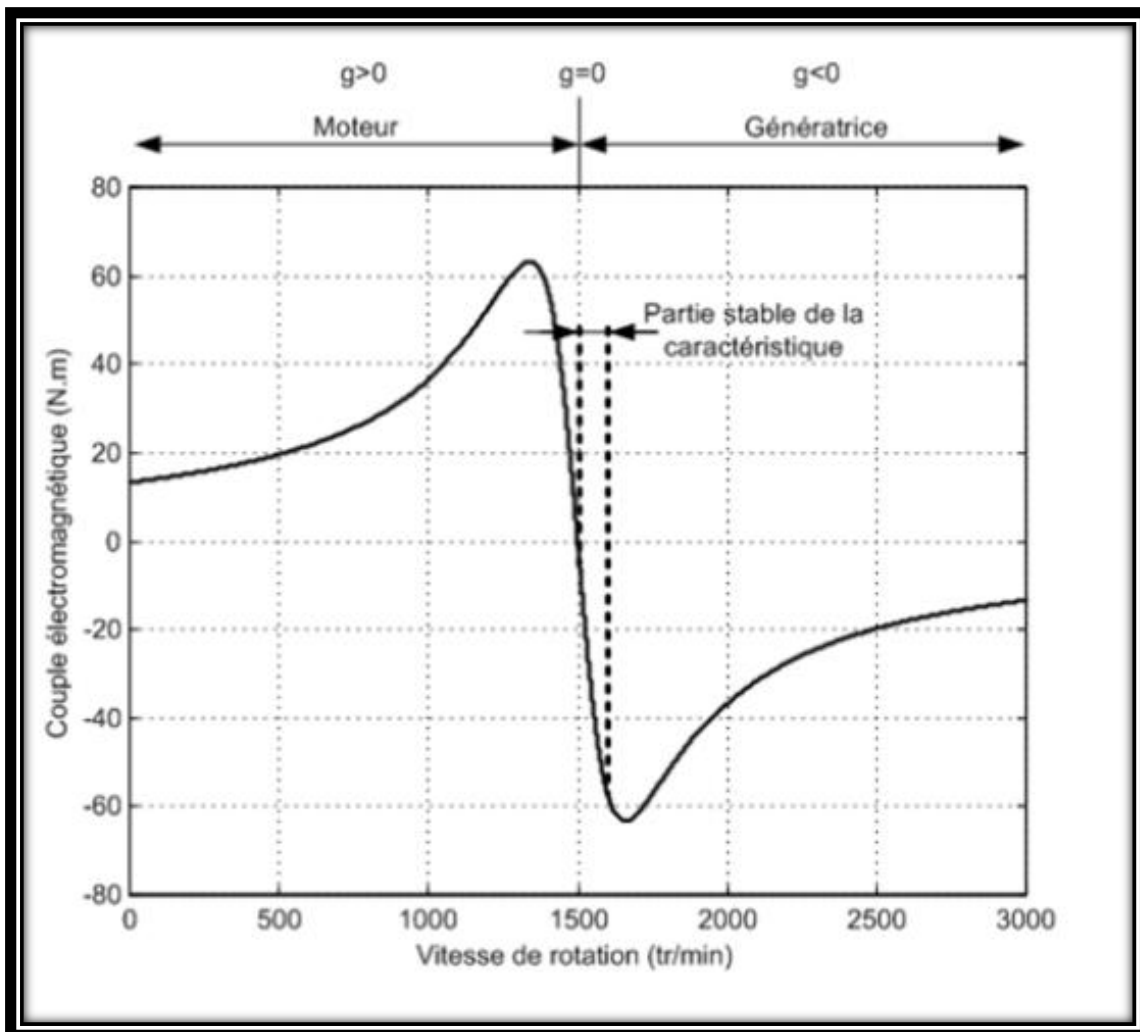


Figure I.11 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles

### I.9.2.2. Génératrice asynchrone à double alimentation

Avec les génératrices asynchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable. La génératrice à double alimentation (MADA) à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des génératrices asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants, ce qui diminue légèrement leur robustesse.

Une des solutions très intéressante dans le domaine de la conversion de l'énergie éolienne consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au réseau électrique à travers deux onduleurs MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur



réseau (figure I.13). Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est compensé par l'économie réalisée sur le convertisseur. En général, le dimensionnement de la chaîne se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la génératrice électrique, ce qui suffit à assurer une variation sur 30% de la plage de vitesse.

C'est là son principal avantage tandis que son inconvénient majeur est lié aux interactions avec le réseau, en particulier les surintensités engendrées par des creux de tension du réseau.

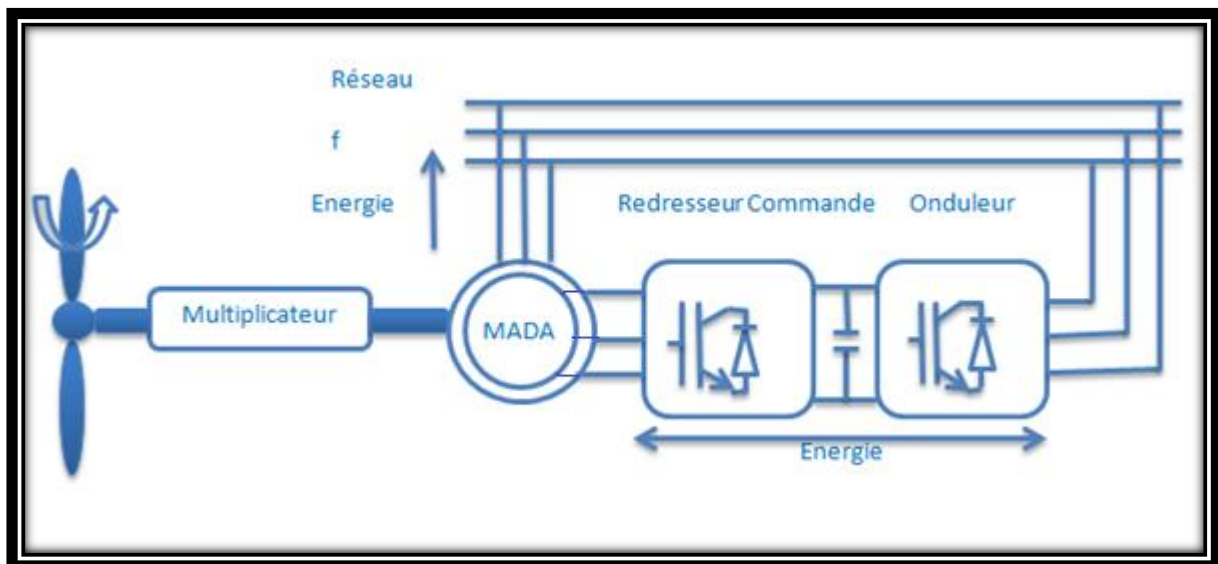


Figure I.12 : Génératrice double alimentation connecté directement aux réseaux.

### I.9.2.3. Les avantages et les inconvénients

- **Les avantages**

- ✓ Construction très simple, donc faible coût (5 à 10 fois moins cher qu'un moteur à courant continu de même puissance).
- ✓ Quand il est alimenté directement par le réseau, sa vitesse est assez stable : variation de quelques pour cents entre le fonctionnement à vide et la pleine charge.

- **Les inconvénients**

L'inconvénient majeur des moteurs asynchrones était alors contenu dans leur principal avantage : leur vitesse en tours par seconde ne pouvait être qu'un peu inférieur à la fréquence de l'alimentation alternative.



**Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons décrit de façon explicite les différents éléments constitutifs de la turbine ainsi que leur principe de fonctionnement, après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Et on a présenté les différentes génératrices utilisées.

Notre travail est basé sur la modélisation, la commande et la simulation de la chaîne de conversion éolienne avec une machine auto-excitée.



## II.1. Introduction

Dans cette partie on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne. Notre choix se porte sur la génératrice asynchrone à cage d'écureuil.

Dans ce chapitre, on va modéliser les différentes parties de la chaîne de conversion éolienne à savoir (figure II.1). [3]

- ✓ La partie mécanique (turbine).
- ✓ La génératrice asynchrone.
- ✓ Les convertisseurs de puissance. (redresseur, onduleur)
- ✓ La commande et le bus continu.
- ✓ Le réseau électrique.

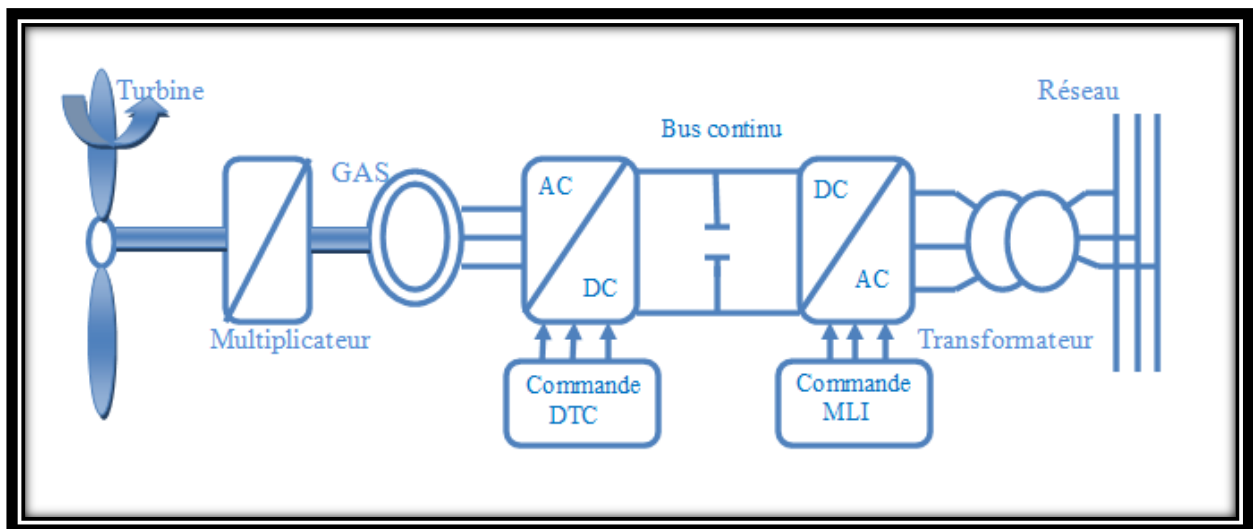


Figure II.1: Chaîne de conversion éolienne

## II.2. Modélisation de la partie mécanique

### II.2.1. Modèle du vent

Le vent peut-être modélisé par une simple loi exponentiel jusqu'à des distributions spectrales et spatiales très complexes qui tiennent compte de sa phénoménologie turbulente.





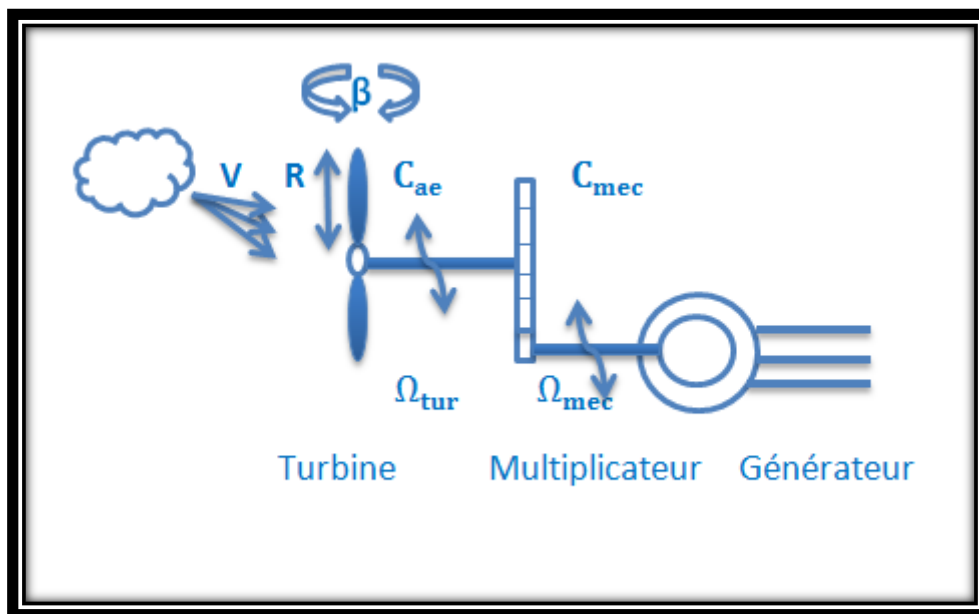
Les vents les plus intéressants qui donnent le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10m/s.

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statistique, est primordiale dans un projet éolien et donc déterminante pour le calcul de production de l'électricité et de rentabilité.

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. [3]

**II.2.2. Modèle de la turbine éolienne**

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passant par la section de la surface active S de la voilure . [4], [17]



**Figure II.2** : Système à modéliser



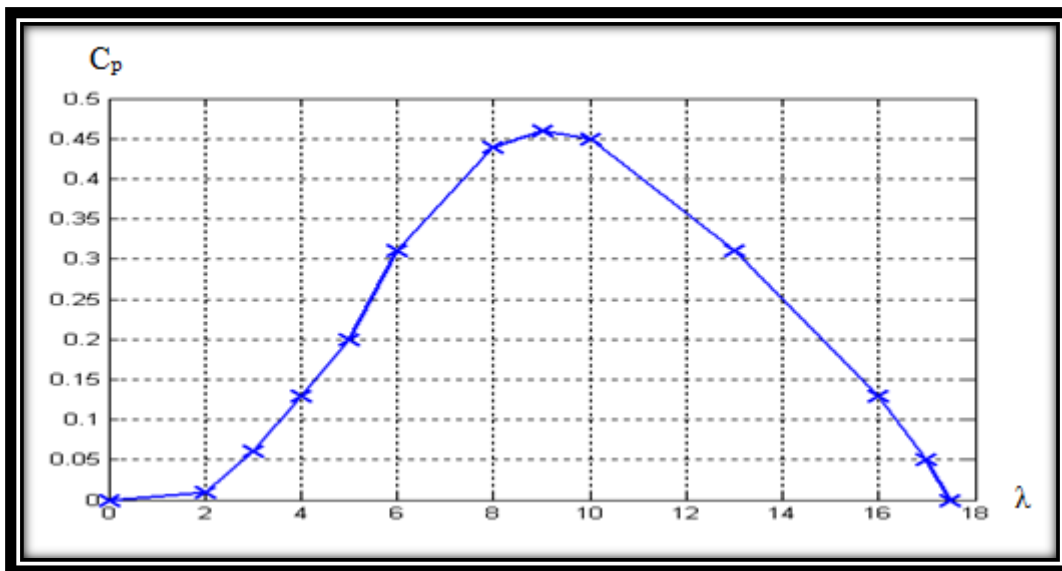
Pour simuler la turbine, on utilisera la relation du couple associée à la caractéristique  $C_p(\lambda)$ , Le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante :

$$T_t = \frac{1}{2} C_p \rho S \frac{v_v^3}{G \Omega_t} \quad (II.1)$$

Avec:  $S = \pi R_t^2$

L'expression du coefficient de puissance de la turbine, est généralement décrite par un polynôme, issu de l'interpolation des points en provenance des mesures.

Le tracé de la turbine choisie est représenté sur la figure (II.3) suivante :



**Figure II.3 : Courbe  $C_p(\lambda)$**

**II.2.3. Modèle du multiplicateur**

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice. Il est modélisé par les deux équations suivantes : [4], [15]

$$T_{em} = \frac{T_t}{G} \quad (II.2)$$



$$\Omega_t = \frac{\Omega_m}{G} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- $G$  : Le gain du multiplicateur.
- $T_{em}$  : Le couple électromagnétique développé par la génératrice asynchrone.
- $T_t$  : Le couple développé par la turbine sous l'action du vent.
- $\Omega_m$  : La vitesse mécanique de la génératrice.
- $\Omega_t$  : La vitesse de la turbine.

#### II.2.4. Equation dynamique de l'arbre de transmission

Avec la présence du multiplicateur, l'équation dynamique de l'arbre est donnée

par: [4], [15]

$$J \frac{d\Omega}{dt} + F\Omega_m = T_{em} - T_t \quad \rightarrow \quad (Js+F) \Omega_m = T_{em} - T_t \quad (\text{II.4})$$

Avec:

- $J$  : Inertie totale de l'arbre de transmission comprenant l'inertie de la génératrice et de la turbine.
- $F$  : Coefficient de frottement dynamique.

Le schéma du modèle de la turbine est donné par les équations suivantes :

$$T_t = \frac{1}{2} C_p \rho S \frac{v_v^3}{G \Omega_t}, \quad T_{em} = \frac{T_t}{G}, \quad \Omega_t = \frac{\Omega_m}{G}, \quad (Js+f) \Omega_m = T_{em} - T_t, \quad \lambda = \frac{R_t \Omega_t}{V_v}$$

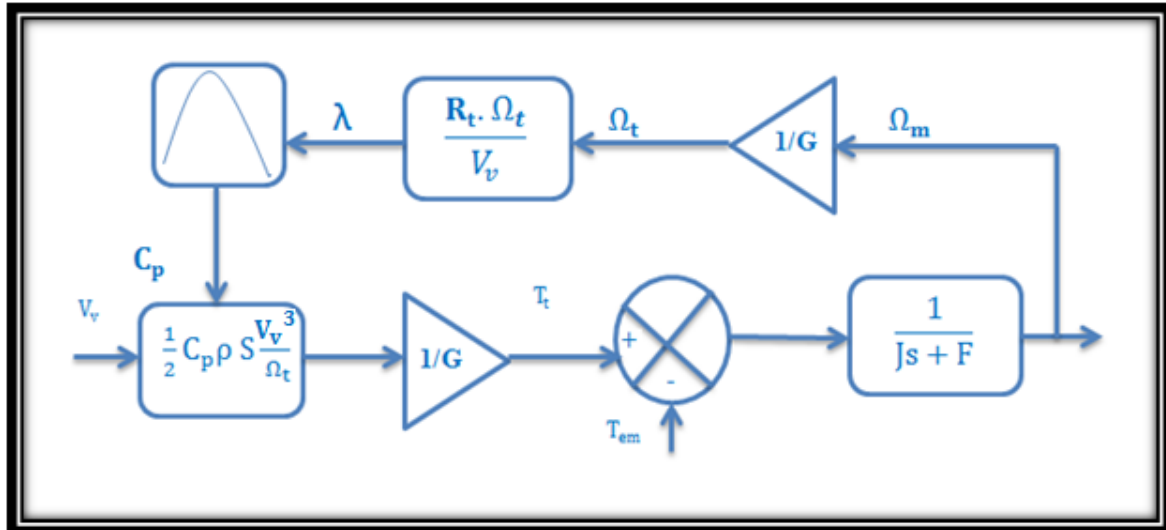


Figure II.4 : Schéma du modèle de la turbine

### II.2.5. Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance optimale d’une éolienne est fortement non linéaire. Pour chaque vitesse de vent , le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale.

Les schémas (II.5) de la figure illustrent les courbes caractéristiques de l’éolienne dans les plans puissance-vitesse de rotation de la turbine, chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent  $V_v$  donnée. L’ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale défini par l’équation :[3]

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_{P\ opt}(\lambda_{opt}) \rho S V_v^3 \quad (II.7)$$

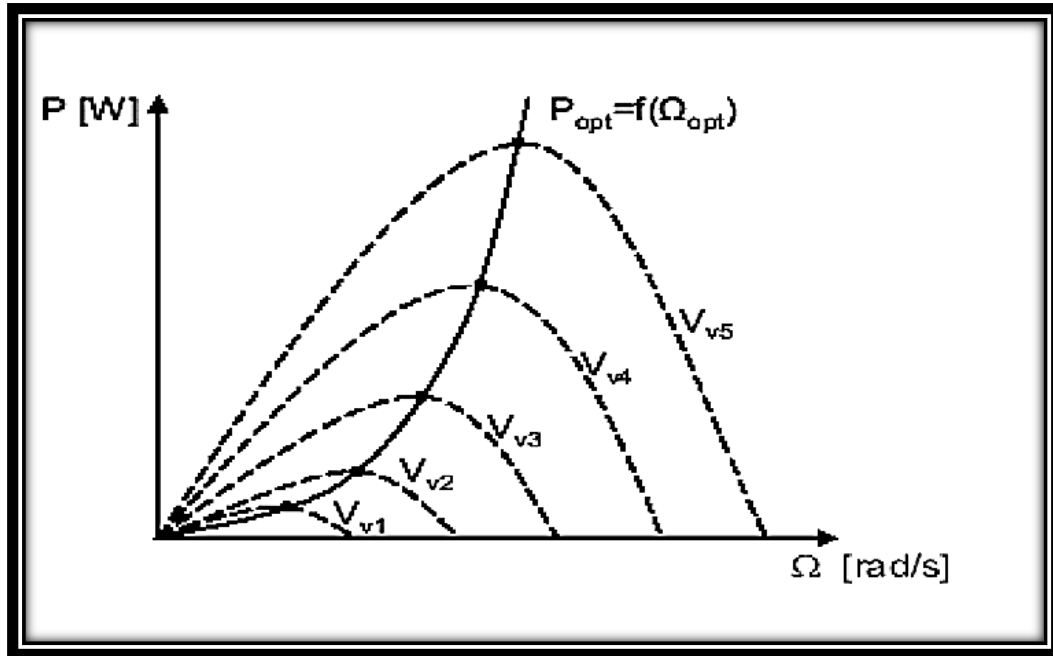


Figure II.5 : Caractéristique de l'éolienne dans le plan puissance-vitesse de rotation.

### II.2.5.1. Maximisation de la puissance

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à une vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant la courbe  $C_p(\lambda)$ .

Cette caractéristique qui est de forme parabolique admet un maximum  $C_{P \max}$  pour  $\lambda_{\text{opt}}$ . La vitesse de la génératrice est asservie à une référence issue d'un algorithme permettant l'extraction maximale de la puissance, lui-même nécessitant la mesure ou l'estimation de la vitesse du vent.

Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (**M.P.P.T**). L'asservissement de vitesse nécessite le calcul de la vitesse du vent. Or une mesure précise de cette dernière est difficile à réaliser. [3]

Une seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent.

Donc le couple électromagnétique de référence est donné par l'équation suivante :



$$T_{em} = K \Omega^2 \tag{II.8}$$

$$\text{Avec : } K = \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot \pi \cdot \frac{R_t^5}{G^3} \tag{II.9}$$

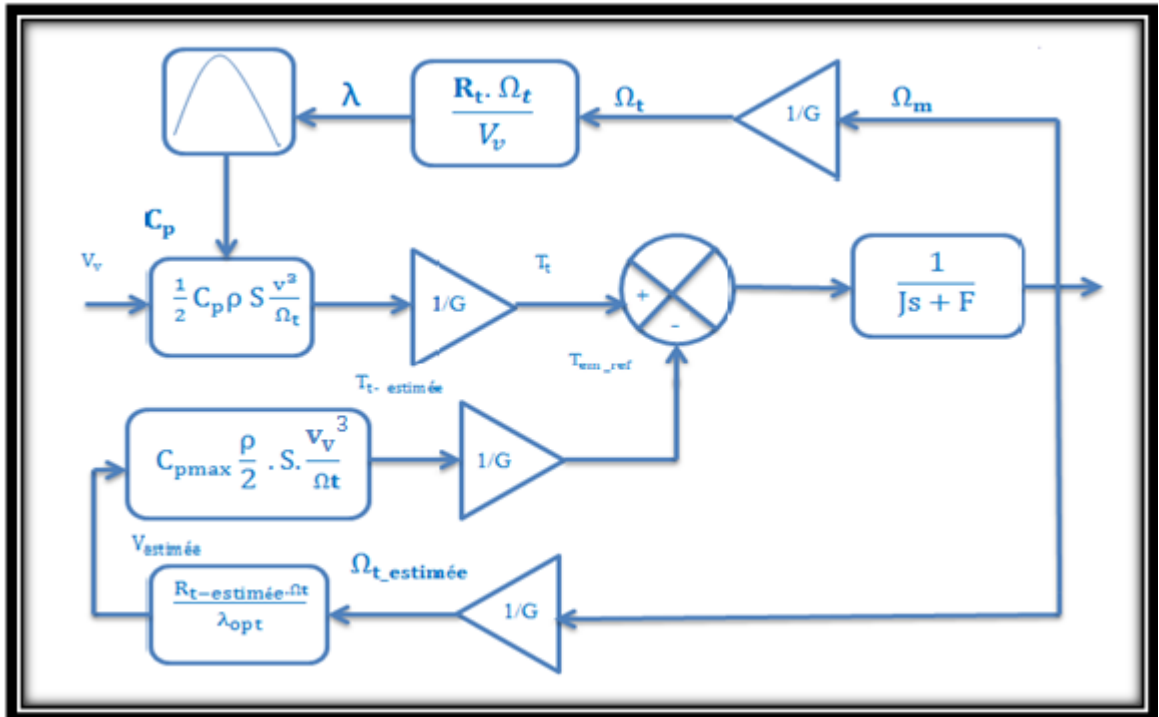


Figure II.6 : Schéma de la turbine avec l’algorithme MPPT

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

#### II.3.1. Fonctionnement de la génératrice asynchrone à cage d’écureuil

Pour que la machine fonctionne en génératrice, il faut que le rotor tourne dans le sens du champ tournant à une vitesse supérieure à la vitesse de synchronisme (vitesse du champ tournant) exprimée par l’équation suivante :

$$\Omega_s = 60 \cdot f / p$$

Le rotor développe ainsi son propre champ magnétique. Lorsque cette génératrice est connectée au réseau, il se met à tourner à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator (fonctionnement de type « moteur »). Si la



vitesse de rotation du rotor devient égale (synchrone) à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator.

En fin, si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, il se développe alors une force électromagnétique similaire à celle obtenue avec un générateur synchrone. La différence (à dimensionner) entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est appelée glissement, sa valeur ne dépassant pas en pratique quelques pour-cent. Pour une augmentation limitée de la vitesse de rotation de l'éolienne, le couple et donc la puissance fournie sont proportionnels au glissement. Toutefois, à partir d'une certaine vitesse de rotation, une diminution sensible du flux dans la génératrice se produit, ce qui nécessite plus de courant pour un couple équivalent. Passée une valeur maximale de couple, une diminution du couple et donc de la puissance est observée.

Il est dangereux que l'éolienne soit amenée à fonctionner dans cette zone, car d'une part la diminution du couple résistant pourrait entraîner une survitesse de la machine et d'autre part la dissipation de puissance dans la génératrice risquerait d'endommager certains éléments par surchauffe. Il faut souligner l'intérêt de ce type de fonctionnement de la génératrice asynchrone car il permet à l'éolienne de subir de faibles variations ponctuelles de la vitesse du vent (rafales) sans solliciter exagérément la transmission (multiplicateur notamment) [7].

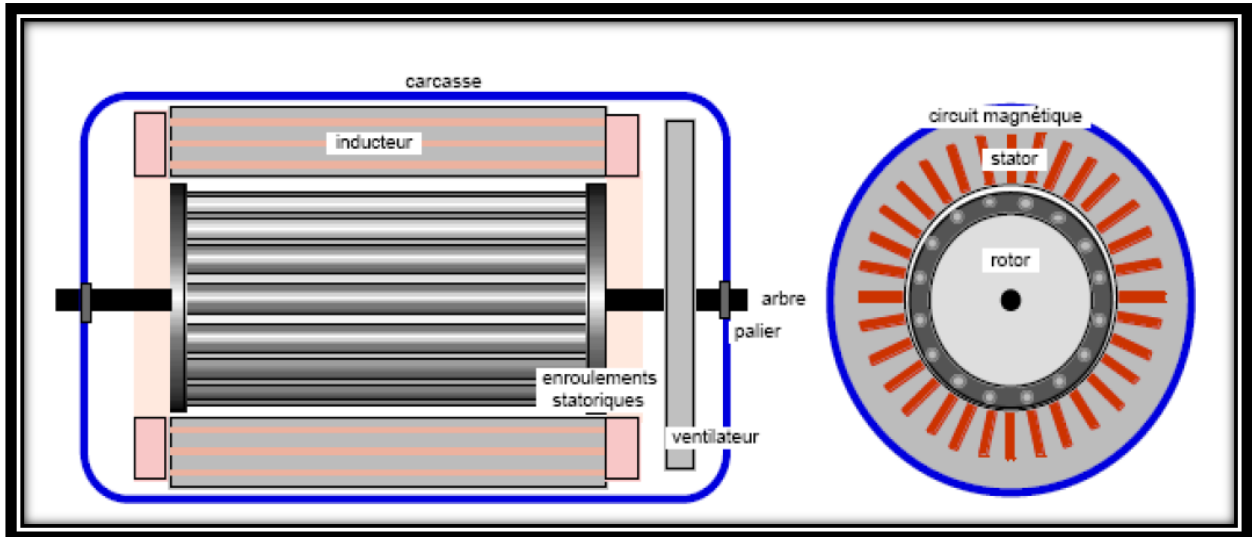


Figure II.7 : Coupe d'une génératrice asynchrone à cage d'écureuil

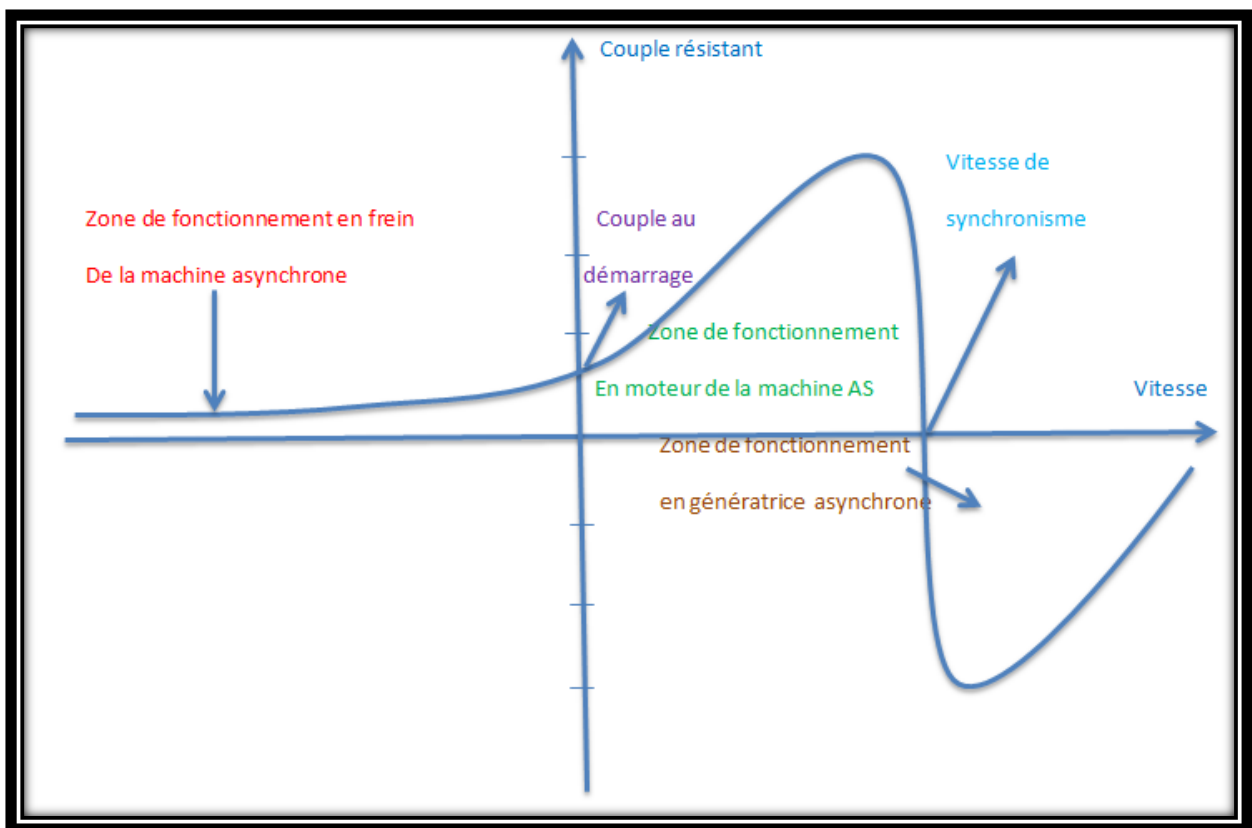


Figure II .8 : Différentes zones de fonctionnement de la MAS



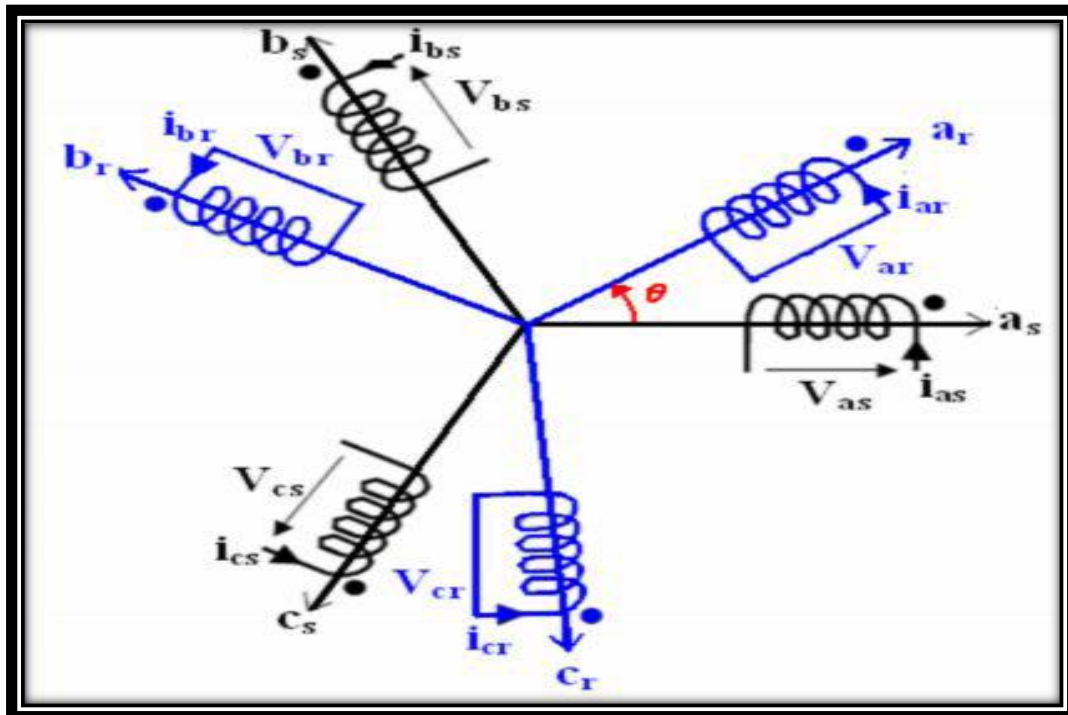


**II.3.1.1. hypothèses simplificatrices**

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

- entrefer constant
- effet des encoches négligé
- distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer
- circuit magnétique non saturé est à perméabilité constante
- pertes ferromagnétiques négligeables
- l'influence de l'effet de peau et de l'échauffement sur les caractéristiques n'est pas prise en compte
- Les résistances des deux enroulements ne varient pas avec la température. [18]

**II.3.1.2. Equations générales de la machine asynchrone**



**Figure II.9 :** Représentation schématique de la machine asynchrone



L'application de la loi d'Ohm généralisée, à chaque enroulement de la machine donne les équations de tension du stator et du rotor comme suit :

$$\begin{cases} [V_{s\ ABC}] = [R_s][I_{s\ ABC}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{s\ ABC}] \\ [V_{r\ abc}] = [R_r][I_{r\ abc}] + \frac{d}{dt}[\varphi_{r\ abc}] = 0 \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Avec :

$[R_s]$  et  $[R_r]$  sont respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques par phase.  $[V_{s\ ABC}][V_{r\ abc}][I_{s\ ABC}][I_{r\ abc}]$  sont respectivement les vecteurs tensions et courants statoriques et rotoriques.

$[\varphi_{s\ ABC}][\varphi_{r\ abc}]$  sont les matrices des flux statoriques et rotoriques suivant les axes A, B, C et a, b, c.

### II.3.1.3. Equations magnétiques

$$\begin{cases} [\varphi_s] = [L_{ss}][i_s] + [M_{sr}][i_r] \\ [\varphi_r] = [L_{rr}][i_r] + [M_{rs}][i_s] \end{cases} \quad (\text{II.11})$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.12})$$

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.13})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^{-1} = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (\text{II.14})$$



Avec :

$[L_{ss}]$  : Matrice d'inductance statorique.

$[L_{rr}]$  : Matrice d'inductance rotorique.

$[M_{sr}]$  : Matrice d'inductance mutuelle stator-rotor.

$[M_{rs}]$  : Matrice d'inductance mutuelle rotor-stator.

$[l_s]$  et  $[l_r]$  : représente respectivement les inductances propres par phase du stator et du rotor.

$[M_s]$  : Coefficient de mutuelle inductance entre deux phases du stator.

$[M_r]$  : Coefficient de mutuelle inductance ente deux phases du rotor.

$[M_0]$  : Maximum de l'induction mutuelle entre phase du stator et phase du rotor.

$\theta$  : L'écart angulaire entre les phases du stator et du rotor.

Les équations de tension de la machine deviennent :

$$\begin{cases} [V_{s\ ABC}] = [R_s][i_{s\ ABC}] + \frac{d}{dt}\{[L_s][i_{s\ ABC}] + [M_{sr}][i_{r\ abc}]\} \\ [V_{r\ abc}] = [R_r][i_{r\ abc}] + \frac{d}{dt}\{[L_r][i_{r\ abc}] + [M_{rs}][i_{s\ ABC}]\} \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

La résolution du système d'équation (II-15) est difficile du fait que les termes des matrices des inductances varient en fonction de la position du rotor par rapport au stator.

Pour faciliter la tâche et surmonter cette difficulté on fait appel à l'usage de la transformation de PARK.

### **II.3.2. Transformation du système triphasé au biphasé**

#### **II.3.2.1. Transformation de Park**

La transformation de Park est constitué d'une transformation triphasé-diphasé suivie d'une rotation. Elle permet de passer du repère abc vers le repère  $\alpha, \beta$  puis vers le repère dq.

L'application de la transformation de Park, assure l'invariance de la puissance instantanée lors du changement du repère.



Le nouveau modèle est obtenu en multipliant les équations des flux et des tensions par la matrice de Park qui s'exprime par : [19]

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

La transformée inverse de PARK est donnée par :

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

Avec :

$\alpha = \theta_s$  : (phase statorique) pour les grandeurs statoriques.

$\alpha = \theta_r$  : (phase rotorique) pour les grandeurs rotoriques.

Les grandeurs (courants, tensions et flux) transformées, du système diphasé sont égales à la matrice de Park multipliée par les grandeurs du système triphasé :

$$[X_{s\ dq0}] = [P(\alpha)] \cdot [X_{s\ ABC}] \quad (\text{II.16})$$

Avec :

X : représente les grandeurs (courants, tension et flux)

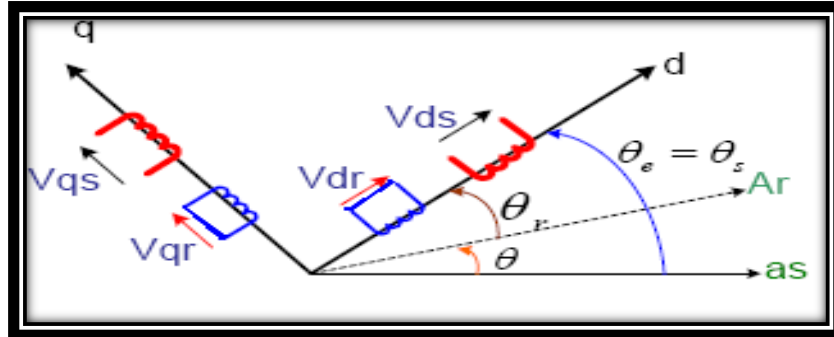


Figure II.10 : Représentation de la machine dans le repère biphasé

On applique la transformation de PARK à l'équation statorique, on aura :

$$[P(\theta_s)]^{-1} \cdot [V_s dq0] = [R_s] \cdot \{ [P(\theta_s)]^{-1} [i_s dq0] \} + \frac{d}{dt} \{ [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_s dq0] \} \quad (II.17)$$

En multipliant l'équation (II-17) des deux côtés par  $[P(\theta_s)]$ :

$$[V_s dq0] = [R_s][i_s dq0] + [P(\theta_s)] \cdot \frac{d}{dt} \{ [P(\theta_s)]^{-1} \cdot [\varphi_s dq0] \} \quad (II.18)$$

En dérivant, on aura :

$$[V_s dq0] = [R_s][i_s dq0] + [P(\theta_s)] \cdot \left( \{ [\varphi_s dq0] \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} + [P(\theta_s)]^{-1} \frac{d}{dt} [\varphi_s dq0] \} \right) \quad (II.19)$$

$$[V_s dq0] = [R_s][i_s dq0] + [P(\theta_s)] \cdot \left\{ \frac{d}{dt} [P(\theta_s)]^{-1} \right\} [\varphi_s dq0] + \frac{d}{dt} [\varphi_s dq0] \quad (II.20)$$

$$[P(\alpha)] = \left\{ \frac{d}{dt} [P(\alpha)]^{-1} \right\} = \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} = \frac{d}{dt} [T]$$

Donc, en développant chaque ligne des matrices, on aura :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_a \varphi_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} - \omega_a \varphi_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} \\ V_{s0} = R_s i_{s0} + \frac{d}{dt} \varphi_{s0} \end{cases} \quad (II.21)$$



De la même manière pour avoir les équations électriques liées au rotor :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - (\omega_a - \omega_r) \varphi_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} = 0 \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + (\omega_a - \omega_r) \varphi_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} = 0 \\ V_{r0} = R_r i_{r0} + \frac{d}{dt} \varphi_{r0} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.22})$$

Avec :

$$\omega_r = p \cdot \Omega$$

$\omega_a$  : vitesse angulaire de repère de PARK par rapport au stator.

D'après les hypothèses simplificatrices, les composantes homopolaires sont nulles, les deux systèmes précédents deviennent :

➤ Équation de tension dans le référentiel de Park :

- Au stator

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} - \omega_a \varphi_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \omega_a \varphi_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

- Au rotor

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} - (\omega_a - \omega_r) \varphi_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} = 0 \\ V_{rq} = R_r i_{rq} + (\omega_a - \omega_r) \varphi_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

➤ Équations de flux en coordonnées de Park :

- Au stator

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_s i_{sd} + M_{sr} i_{rd} \\ \varphi_{sq} = L_s i_{sq} + M_{sr} i_{rq} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

- Au rotor

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = L_r i_{rd} + M_{rs} i_{sd} \\ \varphi_{rq} = L_r i_{rq} + M_{rs} i_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.26})$$



Avec :

$L_s = l_s + M_{sr}$  : inductance propre du stator.

$L_r = l_r + M_{rs}$  : inductance propre du rotor.

$M_{sr} = M_{rs} = \frac{3}{2} M_0$  : inductance mutuelle cyclique stator rotor.

### II.3.2.2. Expression du couple électromagnétique

L'expression du couple électromagnétique est donné par :

$$\begin{cases} T_{em} = p \cdot M_{sr} (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \\ T_{em} = p (\varphi_{sd} i_{sq} - \varphi_{sq} i_{sd}) \end{cases} \quad (\text{II.27})$$

### II.3.2.3. Choix du repère (dq)

En pratique, il existe trois types de référentiel, le choix du référentiel se fait selon le problème à étudier.

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

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

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

On utilise dans notre travail le référentiel lié au stator :

$\omega_a = 0$ , on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d}{dt} \varphi_{sd} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d}{dt} \varphi_{sq} \end{cases} \quad (\text{II.28})$$

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r i_{rd} + \omega_r \varphi_{rq} + \frac{d}{dt} \varphi_{rd} = 0 \\ V_{rq} = R_r i_{rq} - \omega_r \varphi_{rd} + \frac{d}{dt} \varphi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.29})$$



En remplaçant les flux par leurs expressions en fonction des courants statoriques et rotoriques (relations (II-25) et (II-26)) on aura le système matriciel suivant :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 & 0 \\ 0 & \omega_r M & R_r & \omega_r L_r \\ -\omega_r M & 0 & -\omega_r L_r & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{di_{sd}}{dt} \\ \frac{di_{sq}}{dt} \\ \frac{di_{rd}}{dt} \\ \frac{di_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Tel que :

$M=M_{sr}=M_{rs}$  : inductance mutuelle entre stator et rotor.

Après la résolution de ce système d'équations matricielles, on obtient les expressions des courants statoriques et rotoriques suivants :

$$\begin{cases} \frac{di_{sd}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[ V_{sd} - M \frac{di_{rd}}{dt} - R_s \cdot i_{sd} \right] \\ \frac{di_{sq}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left[ V_{sq} - M \frac{di_{rq}}{dt} - R_s \cdot i_{sq} \right] \end{cases} \quad (\text{II.31})$$

$$\begin{cases} \frac{di_{rd}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[ -R_r \cdot i_{rd} - M \frac{di_{sd}}{dt} - \omega_r (L_r \cdot i_{rq} + M \cdot i_{sq}) \right] \\ \frac{di_{rq}}{dt} = \frac{1}{L_r} \left[ -R_r \cdot i_{rq} - M \frac{di_{sq}}{dt} + \omega_r (L_r \cdot i_{rd} + M \cdot i_{sd}) \right] \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

### II.3.2.4. Transformation de Concordia

La transformation de Concordia permet de décomposer un système triphasé en un système diphasé plus un dit homopolaire. Ce dernier est découplé du premier et ne contribue pas à la conservation de l'énergie dans la machine. On peut donc grâce à cette transformation réduire l'étude de la machine triphasée à celle d'une machine diphasée et d'un circuit homopolaire (celui-ci pouvant être simplement ignoré dans certains cas). Il existe deux transformée vers le repère  $(\alpha, \beta)$  :

- La transformation de Clarke conserve l'amplitude mais pas la puissance ni le couple.





- La transformation de Concordia qui conserve la puissance mais pas l'amplitude des grandeurs de phases.

On choisit la transformation de Concordia pour sa conservation de puissance et pour les transformations directes et inverses.

Soit X (a, b, c) la grandeur triphasée équilibrée, X (α, β, 0) la grandeur diphasée équivalente donnée par la transformation de Concordia. [19]

$$X_{\alpha,\beta,0} = \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = T \cdot X_{a,b,c} \quad (\text{II.33})$$

$$T = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix}$$

En appliquant cette transformée aux équations électriques et magnétiques, on aura :

- pour le stator :

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + \frac{d\varphi_{s\alpha}}{dt} \\ V_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + \frac{d\varphi_{s\beta}}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.34})$$

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = L_s \cdot i_{s\alpha} + M \cdot i_{r\alpha} \\ \varphi_{s\beta} = L_s \cdot i_{s\beta} + M \cdot i_{r\beta} \end{cases} \quad (\text{II.35})$$

- pour le rotor :

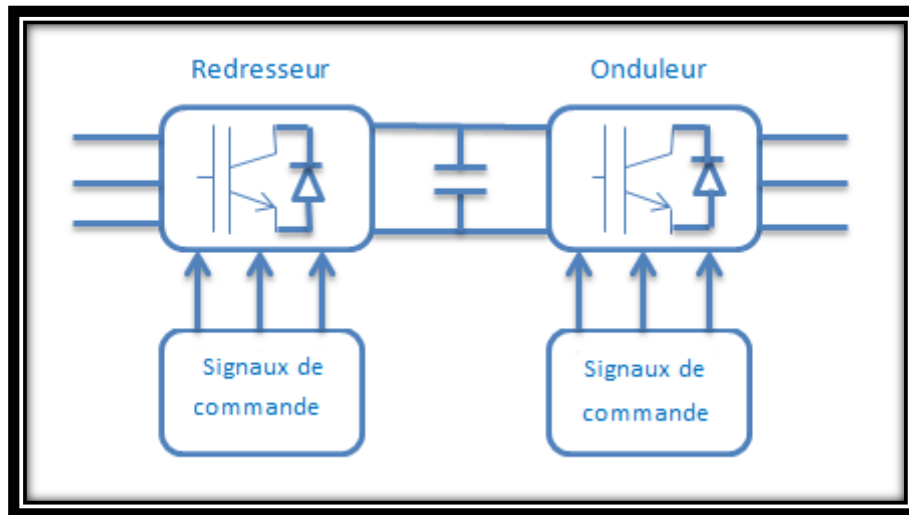
$$\begin{cases} V_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + \frac{d}{dt} \varphi_{r\alpha} = 0 \\ V_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + \frac{d}{dt} \varphi_{r\beta} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

$$\begin{cases} \varphi_{r\alpha} = L_r \cdot i_{r\alpha} + M_{rs} \cdot i_{s\alpha} \\ \varphi_{r\beta} = L_r \cdot i_{r\beta} + M_{sr} \cdot i_{s\beta} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$



**II.4. Modélisation du système de puissance (redresseur, onduleur)**

Dans cette partie, on étudiera les convertisseurs qui interviennent dans la chaîne de conversion éolienne (le redresseur et l'onduleur MLI). [3]



**Figure II.11 : Redresseur et onduleur MLI**

**II.4.1. Modélisation des convertisseurs statiques**

Le redresseur et l'onduleur sont tous deux formés de trois bras composés chacun de deux cellules de commutations. Chaque bras de l'onduleur est constitué de deux cellules représentant chacune un interrupteur bidirectionnel. Chaque cellule à son tour est constituée d'un transistor et une diode en antiparallèle. Cette structure impose l'utilisation des Interrupteurs commandables à l'amorçage et au blocage. La figure (II.13) représente le schéma équivalent d'une cellule transistor-diode antiparallèle par un interrupteur équivalent.[21]

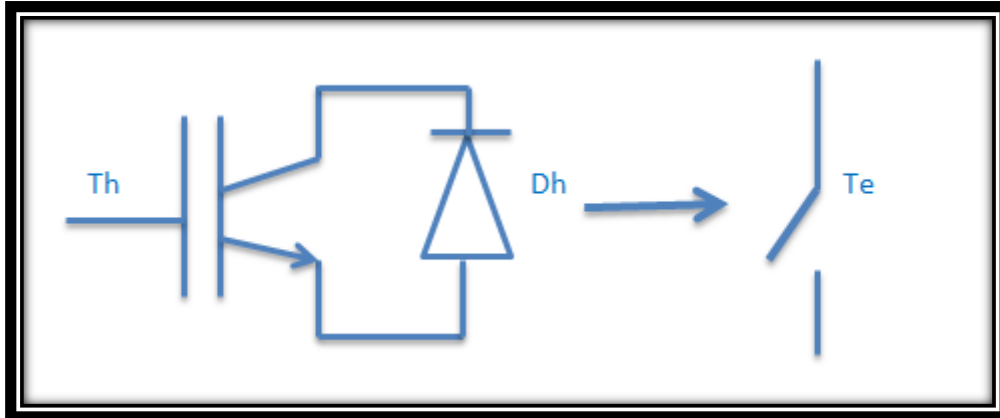


Figure II.12 : Interrupteur équivalent

#### II.4.1.1. Le redresseur

Les redresseurs sont des onduleurs utilisés « à l’envers » qui permettent de produire une tension continue à partir d’une source alternative.

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l’équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} -2 & 1 & 1 \\ 1 & -2 & 1 \\ 1 & 1 & -2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (II.38)$$

$$i_{dc} = S_a i_{ar} + S_b i_{br} + S_c i_{cr} \quad (II.39)$$

Avec :

$V_{dc}$ , est la tension redressée ;

$i_{dc}$ , est le courant modulé par le redresseur ;

$S_a, S_b, S_c$  Sont les fonctions logiques correspondant a l’état de l’interrupteur (égal à un (1) si l’interrupteur est fermé et zéro (0) s’il est ouvert). [12]

#### II.4.1.2. L’onduleur

Les convertisseurs tels que les onduleurs considérés dans notre étude sont de type parallèle double PD3 et constituent d’IGBT et de diodes antiparallèles commandées par modulation de largeur d’impulsion MLI pour deux raisons principales :



- permet un transfert bidirectionnel de la puissance de glissement entre le rotor et le réseau, ce qui permet des fonctionnements en hypo et hyper synchrone.
- Générer moins ou pas de perturbations sur le réseau électrique par propagation de courants harmoniques. [22]

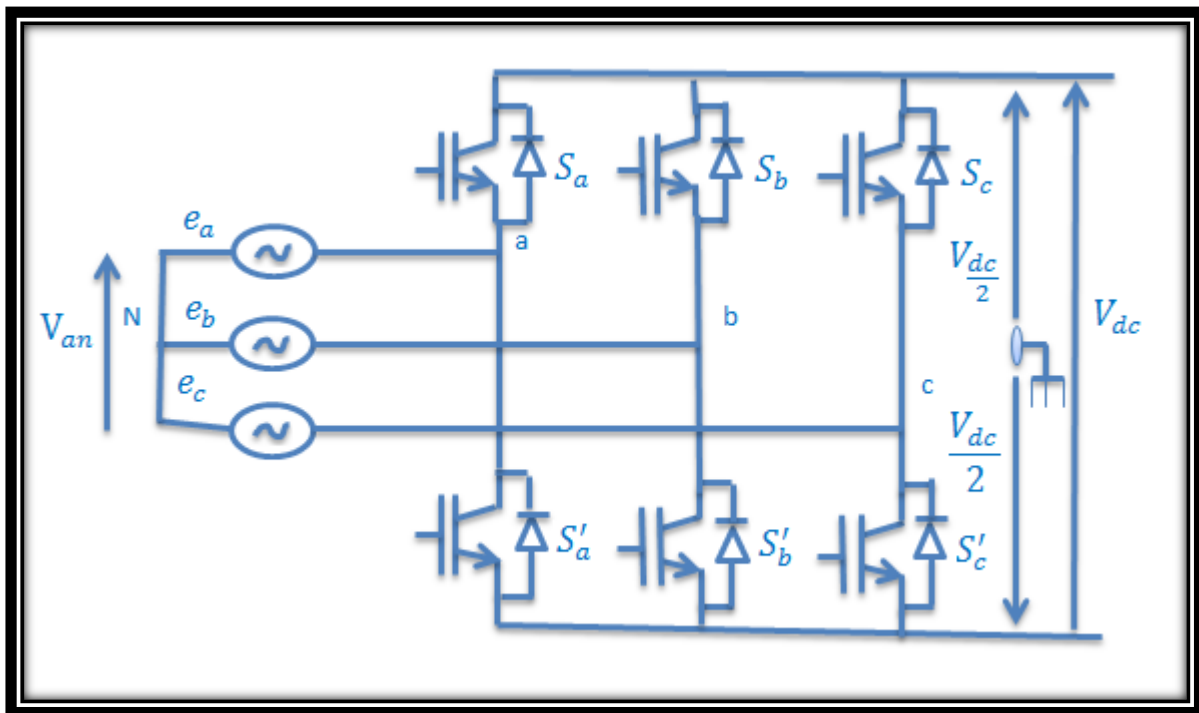


Figure II.13 : Schéma de l'onduleur de tension

II.4.1.2.1. Calcul des tensions de sortie de l'onduleur

On symbolise les tensions de sortie par  $V_s$  tel que :  $V_s = (V_a, V_b, V_c)$

$V_a, V_b, V_c$  : Les tensions simples a la sortie de l'onduleur.

$$\begin{cases} V_a = V_{an} = V_{a0} - V_{n0} \\ V_b = V_{bn} = V_{b0} - V_{n0} \\ V_c = V_{cn} = V_{c0} - V_{n0} \end{cases} \quad (II.40)$$

Avec :

$V_{a0}, V_{b0}, V_{c0}$  : Sont des tensions de phases.



$V_{n0}$  : La tension fictive entre le neutre de la MAS et le point fictif d'indice « 0 ».

Pour un système équilibré  $V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0$ , on obtient :

$$V_{n0} = \frac{1}{3}(V_{a0} + V_{b0} + V_{c0}) \quad (\text{II.41})$$

On obtient :

$$\begin{cases} V_a = \frac{V_{dc}}{3} (2S'_a - S'_b - S'_c) \\ V_b = \frac{V_{dc}}{3} (-S'_a + 2S'_b - S'_c) \\ V_c = \frac{V_{dc}}{3} (-S'_a - S'_b + 2S'_c) \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

Avec :

$S'_a, S'_b, S'_c$  : sont des fonctions logiques correspondant aux états logiques de l'interrupteur.

- $S_i = 1$  état de conduction.
- $S_i = 0$  état de blocage.

La matrice de connexion de l'onduleur est donnée par l'équation matricielle suivante :

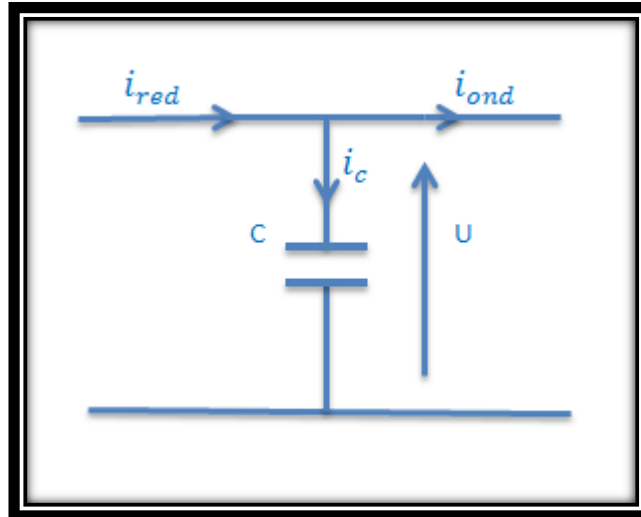
$$\begin{bmatrix} V_{cha} \\ V_{chb} \\ V_{chc} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S'_a \\ S'_b \\ S'_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.43})$$

$$i_{on} = S'_a i_{cha} + S'_b i_{cha} + S'_c i_{cha} \quad (\text{II.44})$$

### II.4.1.3. Modélisation du bus continu

Le condensateur du bus continu est modélisé par :

$$\frac{d}{dt} V_{dc} = \frac{1}{C} i_c \quad (\text{II.45})$$



**Figure II .14 :** Courant du bus continu

Le courant du condensateur est issu d'un nœud ou circulent deux courants modulés par chaque convertisseur :

$$i_c = i_{red} - i_{ond} \quad (II.46)$$

Ainsi :

$$u = \int \frac{du}{dt} + u(t_0) \quad (II.47)$$

Avec :

$u(t_0)$  est la tension initial du condensateur.

C :La capacité de filtrage du bus continu.

u :La tension aux borne de la capacité.

### **II.5. Modélisation de la liaison au réseau**

La liaison au réseau est constituée d'un filtre  $R_{res} L_{res}$ , une source E et d'un transformateur Parfait de gain N. [3]

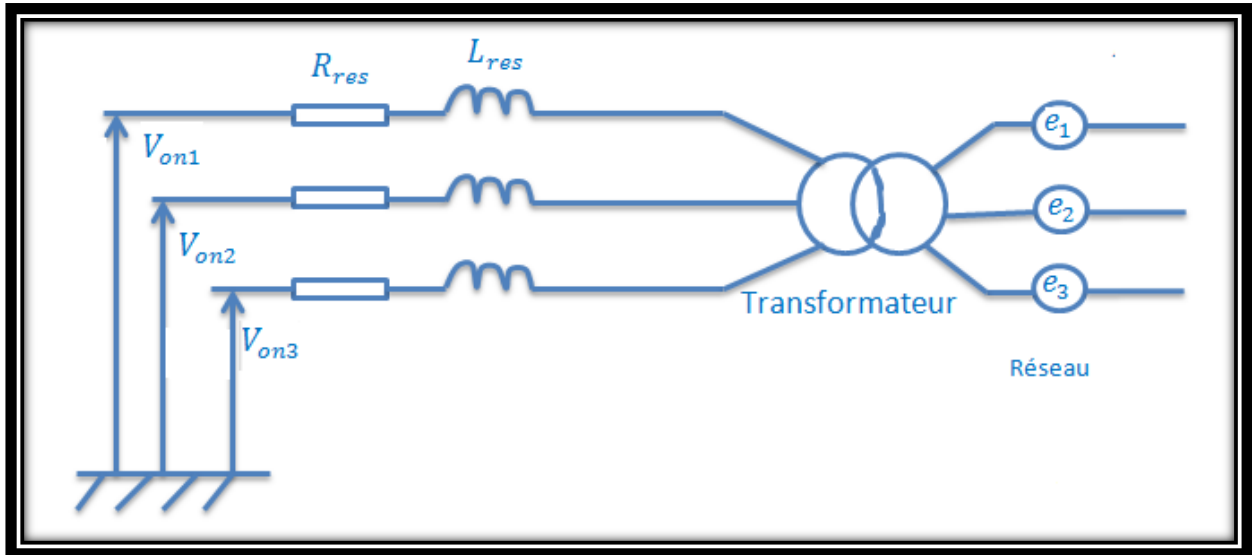


Figure II.15: Schéma électrique de la liaison réseau

### II.5.1. Modélisation du filtre

Il s'agit d'un filtre passif série ( $R_{res}, L_{res}$ ) raccordé entre le convertisseur de puissance et le réseau (figure.16) pour réduire la propagation de l'harmonique dans le réseau électrique. [15]

$$i_x = \frac{1}{L_{res} \cdot s + R_s} v_x \quad (II.48)$$

Avec :

- $i_x = i_a, i_b, i_c$  les courants des trois phases.
- $v_x = v_a, v_b, v_c$ , les tensions des trois phases.

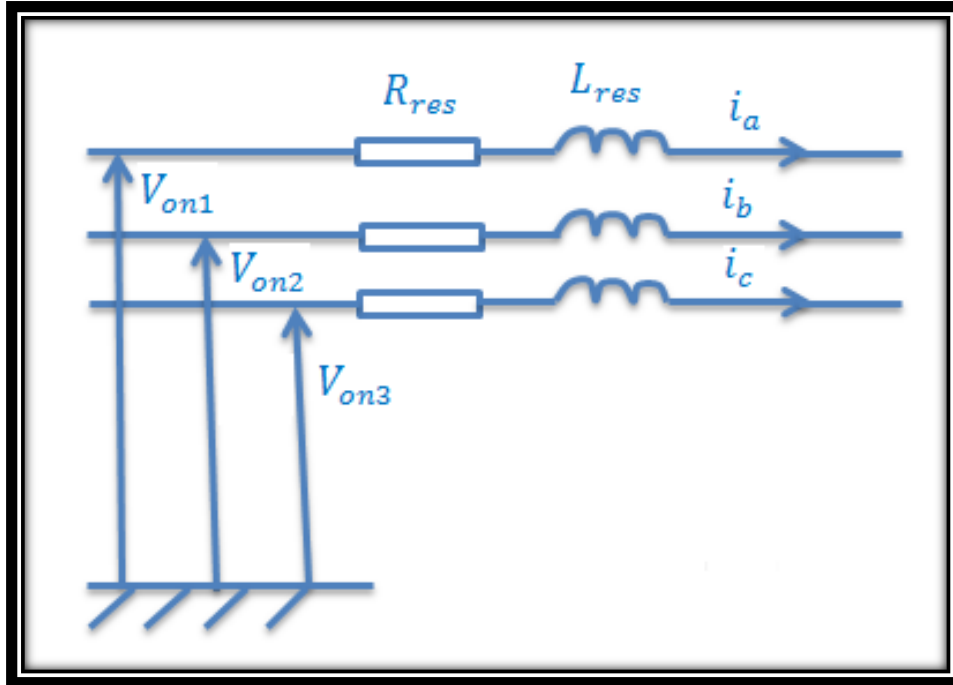


Figure II.16 : Le filtre

II.5.2. Modélisation du transformateur

La fonction de transfert d'un transformateur parfait, de gain N, est donnée par la (figure II.17). [15]

$$F(s) = \frac{V_{\text{secondaire}}}{V_{\text{primaire}}} = N \quad (\text{II.49})$$

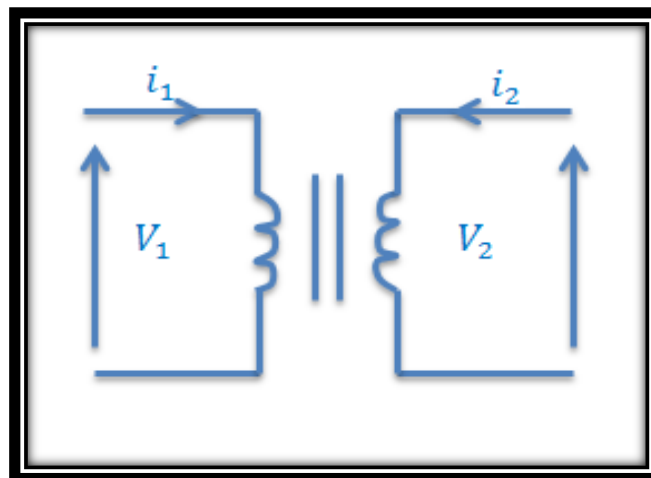


Figure II.17 : Le transformateur





## **II.6. Conclusion**

Dans ce chapitre on a présenté la modélisation des différentes parties de la chaîne de conversion éolienne.

Afin de pouvoir représenter le modèle de la machine asynchrone à cage d'écureuil dans le repère (d-q), nous avons fait appel à la transformation de PARK qui nous a simplifié notre système tout en tenant des hypothèses de simplificatrices.

Les modèles exposés dans ce chapitre seront dédiés à la commande que nous allons essayer d'exposer dans le chapitre suivant, on parle ici d'une commande direct du couple appelée (DTC).

**Introduction**

Les méthodes de commande direct de couple DTC (direct torque control) des machines asynchrones sont initiées dans la deuxième moitié des années 1980 par Takahashi et Depenbrock comme concurrentielles des méthodes classiques [24].

La commande DTC est un type de commande vectorielle pour un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone. Son objectif est de réguler le flux statorique et le couple électromagnétique sans disposer de mesures de vitesse, de flux ou de couple. Les seules mesures utilisées sont les tensions et les courants alimentant le stator de la machine. Le flux et le couple sont entièrement estimés à partir de ces mesures.

La DTC consiste à commander directement la fermeture et l'ouverture des interrupteurs de l'onduleur selon l'évolution des valeurs du flux statorique et du couple électromagnétique de la machine.

**III.1. Caractéristiques générales d'une commande directe de couple**

- La DTC est basée sur la sélection des vecteurs optimaux de commutation de l'onduleur.
- La commande indirecte des intensités et tensions statorique de la machine.
- L'obtention des flux et des courants statoriques proches des formes sinusoïdales.
- La réponse dynamique du couple de la machine est très rapide.
- L'existence des oscillations de couple qui dépend de la largeur des bandes des comparateurs à hystérésis.
- La fréquence de commutation de l'onduleur dépend de l'amplitude des bandes d'hystérésis. [18], [25].

**III.2. Les avantages et les inconvénients de la DTC****III.2.1. Les avantage**

- Une très bonne dynamique du couple qui peut se caractériser par des faibles temps de réponse.



- Absence de calculs dans le repère rotorique ( $d, q$ ) et donc l'utilisation d'une matrice de rotation.
- Absence de bloc de calcul de modulation de tension MLI.
- Il n'est pas nécessaire de faire un découplage des courants par rapport aux tensions de commande comme dans le cas de la commande vectorielle.
- Pas d'obligation de connaître avec une grande précision la position rotorique, car seule l'information sur le secteur dans lequel se trouve le vecteur flux statorique est nécessaire.
- Robustesse vis-à-vis des variations paramétriques.
- Possibilité d'appliquer les algorithmes du système avec des cartes d'acquisition.
- Utilisation d'un modèle simplifié du moteur à induction.

### **III.2.2. Les inconvénients**

- Problèmes de commande à basse vitesse.
- Nécessité de disposer d'estimateurs du flux statorique et du couple.
- Existence d'oscillations de couple.
- Fréquences de commutation non constantes (utilisation de régulateurs à hystérésis).  
Cela conduit à un contenu harmonique riche augmentant les pertes, les bruits acoustiques et les oscillations du couple qui peuvent exciter des résonances mécaniques.

### **III.3. Principe de la commande DTC**

La commande directe du couple (DTC) a pour objectif la régulation directe du couple de la machine par l'application des différents vecteurs de tensions de l'onduleur.

Les variables contrôlées sont le flux statorique et le couple électromagnétique qui sont habituellement commandés par des régulateurs à hystérésis. Il s'agit de maintenir ces deux grandeurs instantanées à l'intérieur d'une bande autour de la valeur désirée.

La sortie de ces régulateurs détermine le vecteur optimal de tension de l'onduleur à appliquer à chaque instant de commutation. [18], [25]



**III.4. Modélisation vectorielle de la machine asynchrone et de l'onduleur de tension**

Dans les conditions précédentes, les tensions statorique de la machine asynchrone sont données par : [26]

$$V_s = R_s i_s + \frac{d\phi_s}{dt}$$

$$V_s = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} \tag{III.1}$$

$V_{s\alpha}$  et  $V_{s\beta}$  : Ce sont des projections des vecteurs tension  $V_s$  dans le repère orthogonal ( $\alpha$ ,  $\beta$ ).

Le vecteur  $V_s$  est produit par l'onduleur de tension qu'on suppose parfait, et exprimé ainsi en fonction des trois grandeurs logiques ( $S_a, S_b, S_c$ ) déjà démontrées précédemment. Par l'application de la forme vectorielle, on aura :

$$V_s = \sqrt{\frac{2}{3}}(V_a + aV_b + a^2V_c) \tag{III.2}$$

Avec:

$$a = e^{j\frac{2\pi}{3}}$$

A l'aide des variables booliennes d'états des interrupteurs, le vecteur tension aura la forme suivante :

$$V_s = \sqrt{\frac{3}{2}} V_{dc}(S_a + aS_b + a^2S_c) \tag{III.3}$$

En utilisant, la matrice de Concordia sur les tensions statoriques, on aura les composantes du vecteur tension sur le repère ( $\alpha \beta$ ) comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sqrt{2} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} & -\frac{\sqrt{3}}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \tag{III.4}$$

Les positions spatiales dans le plan ( $\alpha, \beta$ ), des vecteurs tensions générées par l'onduleur sont présentées dans la (figure III.1) :

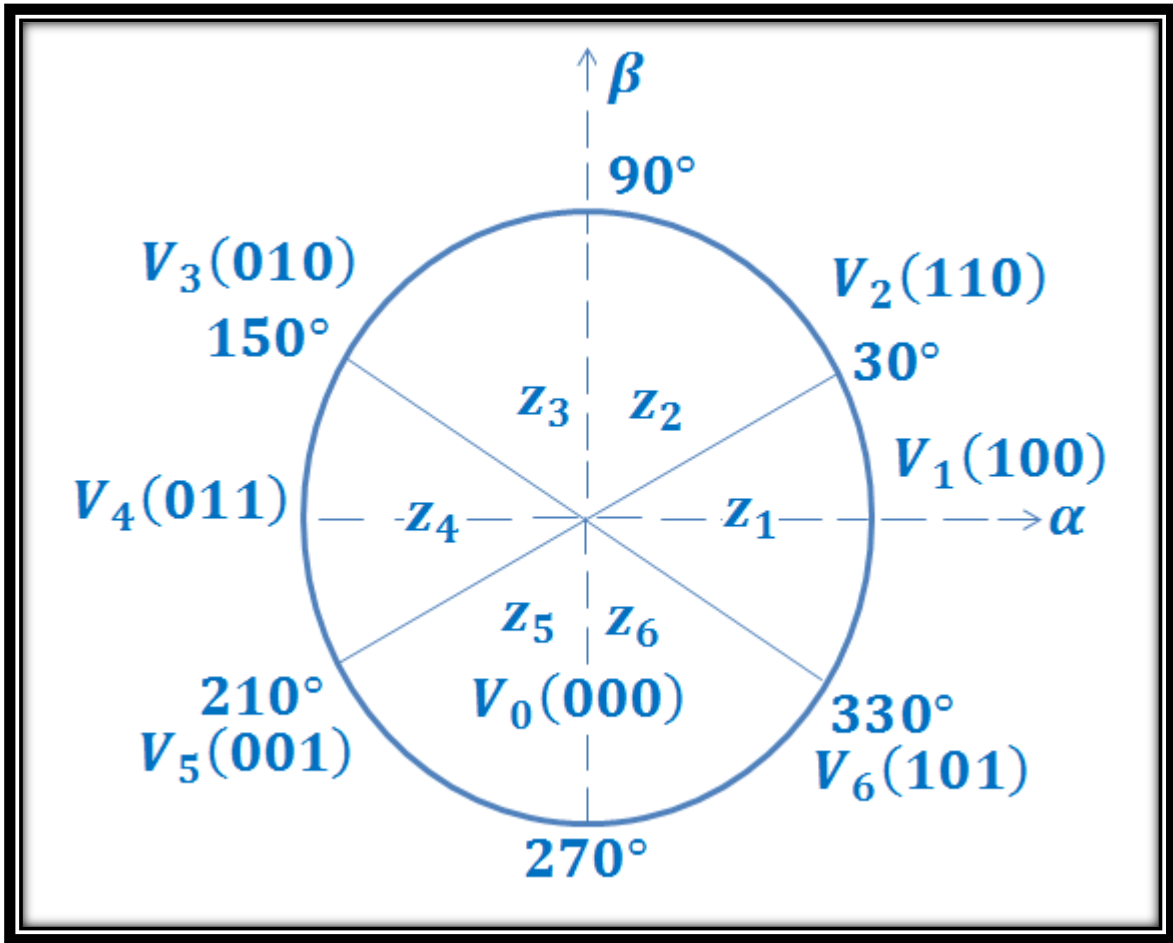


Figure III.1 : Représentation des vecteurs tensions générés par l'onduleur

### III.5. Contrôle de flux et de couple électromagnétique

#### III.5.1. Contrôle vectoriel de couple

Le modèle de la machine dans le référentiel  $(\alpha, \beta)$  est donné par les équations :

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + \frac{d\phi_s}{dt} \\ V_r = 0 = R_r I_r + \frac{d\phi_r}{dt} - j\omega_r \phi_r \end{cases} \quad (\text{III.5})$$

A partir des expressions des flux, l'expression des courants rotoriques s'écrivent :

$$I_r = \frac{1}{\sigma} \left( \frac{\phi_r}{L_r} - \frac{M}{L_r L_s} V_s \right)$$



Avec  $\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_r L_s}$  (coefficient de dispersion) on aura :

$$\begin{cases} V_s = R_s I_s + \frac{d\varphi_s}{dt} \\ \left( \frac{d\varphi_s}{dt} + \left( \frac{1}{\sigma\tau_r} - j\omega \right) \varphi_r \right) = \frac{M}{\sigma L_s} \frac{1}{\tau_r} \varphi_s \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

$\tau_r = \frac{L_r}{R_r}$  est la constante de temps rotorique de la machine.

L'équation (III.1) montre qu'il est possible de contrôler le vecteur  $\varphi_s$  à partir du vecteur  $V_s$  à la chute de tension  $R_s I_s$  près ; et l'équation (III.6) montre que Le flux  $\varphi_r$  suit les variations de  $\varphi_s$  avec une constante de temps  $\sigma\tau_r$  qui détermine aussi la rapidité de variation de l'angle  $\theta_{sr}$  entre les deux flux statorique et rotorique; Le rotor agit comme un filtre de constante de temps  $\sigma\tau_r$  entre les flux  $\varphi_s$  et  $\varphi_r$ . En régime permanent l'équation (III.6) s'écrit :

$$\varphi_r = \frac{M}{L_s} \frac{\varphi_s}{1 - j\omega\sigma\tau_r} \quad (\text{III.7})$$

En posant  $\theta_{sr} = (\varphi_s, \varphi_r)$  angle entre les vecteurs flux, le couple s'exprime par :

$$\Gamma_e = p \frac{L_m}{\sigma L_s L_r} \varphi_s \varphi_r \sin \theta_{sr} \quad (\text{III.8})$$

Les équations (III.1), (III.6), et (III.7) montrent que:

Le couple dépend des amplitudes des deux vecteurs  $\varphi_s, \varphi_r$  et de leur position relative ; Si l'on parvient à contrôler le vecteur de flux  $\varphi_s$  en module et en position, on peut donc contrôler  $\varphi_r$  en module et en position, et donc le couple. Ceci est possible à condition que la période d'échantillonnage est telle que  $T_e \ll \sigma\tau_r$  [18], [27].

### III.5.2. Contrôle du flux statorique

On se place dans le repère fixe  $(\alpha, \beta)$  lié au stator de la machine. Le flux statorique de la MAS est obtenu à partir de l'équation (III.1).



La commande directe du couple est basée sur l'orientation du flux statorique.  
L'expression du flux statorique dans le référentiel de Concordia est:

$$\varphi_s = \int_0^{T_e} (V_s - R_s I_s) dt \quad (III.9)$$

Pendant une période de commutation, le vecteur de tension appliquée à la MAS reste constant, on peut écrire alors :

$$\varphi_s(t) = \varphi_s(0) + T_e V_s - \int_0^{T_e} (R_s I_s) dt \quad (III.10)$$

Avec  $R_s$  supposée constante au cours du temps.

La chute de tension due à la résistance du stator peut être négligée (pour les grandes vitesses),  $\varphi_s(0)=0$ .

Pour une période de commutation constante,  $\Delta\varphi_s$  est proportionnel au vecteur de tension appliquée au stator de la MAS, la figure (III.2) montre l'évolution du vecteur de flux statorique dans le plan  $(\alpha, \beta)$ .

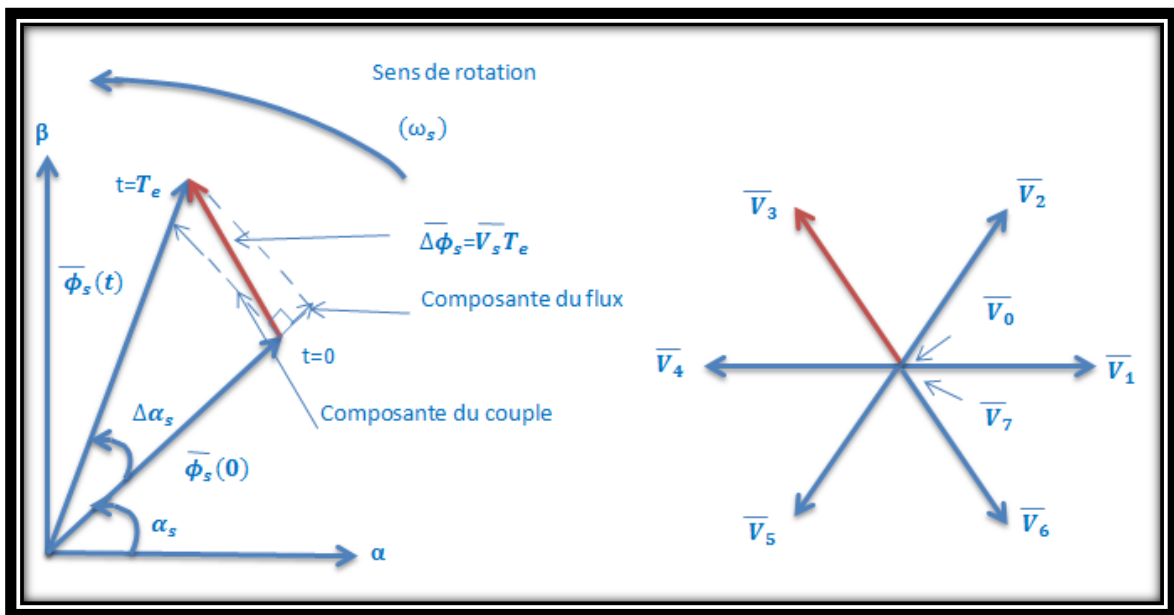


Figure III.2 : évolution du vecteur flux stator



Lorsqu'on applique un vecteur tension constant quelconque  $V_s$ , l'extrémité du vecteur flux stator se déplace selon une droite parallèle au vecteur tension, ceci avec une vitesse (en Wb/s) égale à l'amplitude de ce vecteur. [18], [27]

### III.6. Présentation de structure de commande

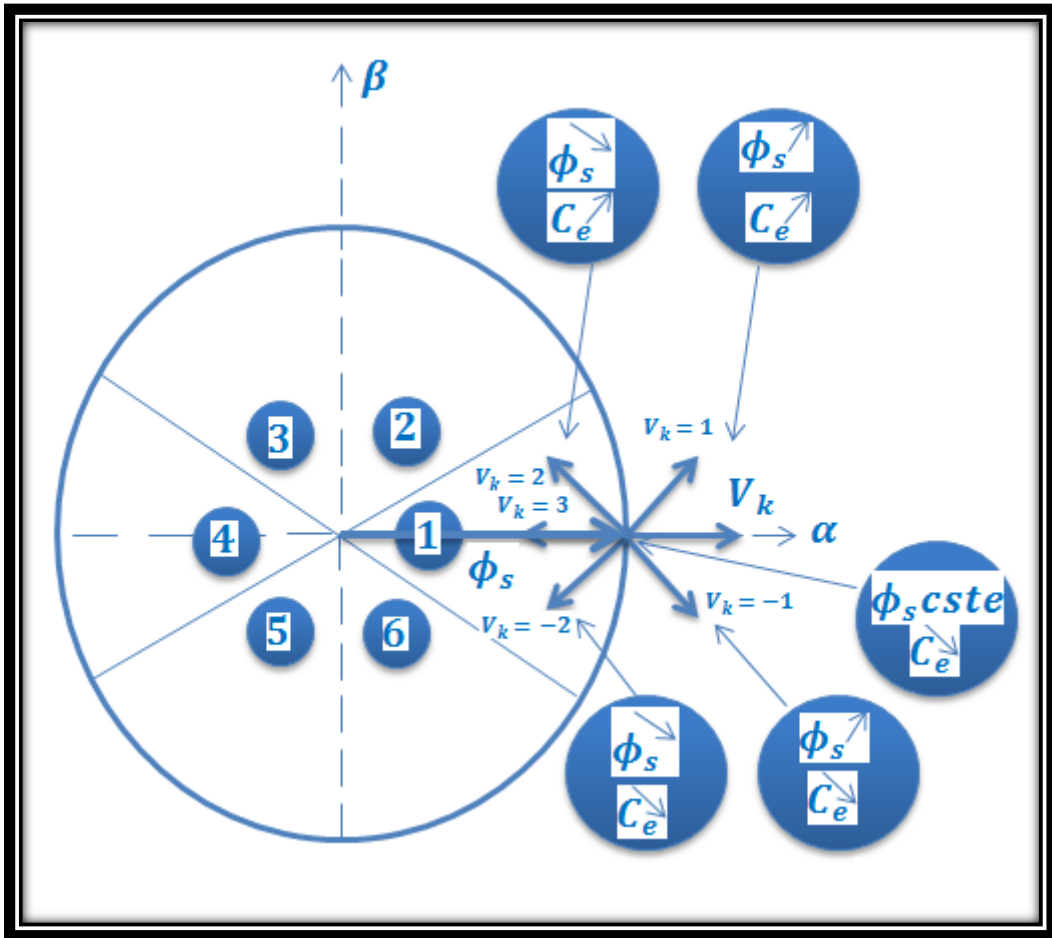
#### III.6.1. Choix du vecteur $V_s$

Le choix de  $V_s$  dépend de la position du flux  $\varphi_s$ , de la variation souhaitée de son module, de l'évolution souhaitée pour sa vitesse de rotation et par conséquent du couple. On peut voir que l'espace d'évolution de  $\varphi_s$  se compose en six zones  $i$ , avec  $i=[1:6]$ .

Lorsque le flux se localise dans une zone  $k= [V_{i+1}, V_{i-1}, V_{i+2}, V_{i-2}]$ , le contrôle du couple et du flux est assuré en sélectionnant l'un des huit vecteurs tension suivants :

- Si  $V_{i+1}$  est sélectionné alors  $\varphi_s$  croît et  $C_e$  croît.
- Si  $V_{i-1}$  est sélectionné alors  $\varphi_s$  croît et  $C_e$  décroît.
- Si  $V_{i+2}$  est sélectionné alors  $\varphi_s$  décroît et  $C_e$  croît.
- Si  $V_{i-2}$  est sélectionné alors  $\varphi_s$  décroît et  $C_e$  décroît.
- Si  $V_0$  ou  $V_7$  sont sélectionnés, alors la rotation du flux  $\varphi_s$  est arrêtée, ce qui conduit à une décroissance du couple alors que le module de flux  $\varphi_s$  reste inchangé (Figure III.3)





**Figure III.3 :** Choix du vecteur tension

La position du flux dans la zone  $i$ , influe sur le niveau d'efficacité des vecteurs de tension choisis.

En début de zone, les vecteurs tensions  $V_{i+1}$  et  $V_{i+2}$  sont perpendiculaire à  $\varphi_s$  d'où une variation rapide pour le couple et lente pour l'amplitude du flux, à la fin de zone, on aura une évolution inverse.

Donc quel que soit le sens d'évolution du couple et du flux dans la zone  $i$ , ils ne sont jamais utilisés.

L'effet sur le couple dépend de la position du flux de la zone  $i$ , avec un vecteur nul en milieu de zone.

Le vecteur de tension statorique ( $V_s$ ) à la sortie de l'onduleur est déduit à partir des écarts de couple et de flux  $\varphi_s$  estimés par rapport à leur référence, ainsi que de la position



du vecteur. Pour cela, on aura besoin des estimateurs de flux statorique et du couple électromagnétique.

[27], [28]

**III.6.2. Estimations**

**III.6.2.1. Estimation du flux statorique**

L'estimation du flux peut être réalisée à partir des mesures des grandeurs statoriques courant et tension de machine. [19]

A partir de l'équation :  $\varphi_s = \int_0^{T_e} (V_s - R_s I_s) dt$

On obtient les composantes  $\alpha$  et  $\beta$  du vecteur  $\varphi_s$  :

$$\begin{cases} \varphi_{s\alpha} = \int_0^{T_e} (V_{s\alpha} - R_s I_{s\alpha}) dt \\ \varphi_{s\beta} = \int_0^{T_e} (V_{s\beta} - R_s I_{s\beta}) dt \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

On obtient les tensions  $V_{s\alpha}$  et  $V_{s\beta}$  à partir des commandes  $(S_a, S_b, S_c)$ , et de la mesure de la tension  $V_{dc}$  et en appliquant la transformée de Concordia.

$$\begin{cases} V_{s\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} V_{dc} + \left( S_a - \frac{1}{2} (S_b + S_c) \right) \\ V_{s\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} V_{dc} (S_b - S_c) \end{cases} \quad \text{(III.12)}$$

On peut écrire alors :

$$V_s = V_{s\alpha} + jV_{s\beta} \quad \text{(III.13)}$$

De même les courants  $I_\alpha$  et  $I_\beta$  sont obtenus à partir de la mesure des courants réels  $I_{s\alpha}$ ,  $I_{s\beta}$  et  $I_{sc}$  ( $I_{s\alpha} + I_{s\beta} + I_{sc} = 0$ ) et par application de la transformation de Concordia.



$$\begin{cases} I_{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{sa} \\ I_{\beta} = \frac{1}{\sqrt{2}} (I_{sb} - I_{sc}) \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

On peut écrire alors :

$$I_s = I_{\alpha} + jI_{\beta} \quad (\text{III.15})$$

Le module du flux statorique s'écrit:

$$\varphi_s = \sqrt{\varphi_{s\alpha}^2 + \varphi_{s\beta}^2}$$

La zone  $N_i$  dans laquelle se situe le vecteur  $\varphi_s$  est déterminée à partir des composantes  $\varphi_{s\alpha}$  et  $\varphi_{s\beta}$ . L'angle  $\theta_s$  entre le référentiel  $(\alpha, \beta)$  et le vecteur  $\varphi_s$  est égale à :

$$\theta_s = \arctg \frac{\varphi_{s\beta}}{\varphi_{s\alpha}}$$

### III.6.2.2. Estimation du couple électromagnétique

L'expression générale du couple, permet d'estimer le couple uniquement à partir des grandeurs estimées du flux et courant.

$$\Gamma_{em} = p(\varphi_{s\alpha} I_{s\beta} - \varphi_{s\beta} I_{s\alpha}) \quad (\text{III.16})$$

On remarque que l'exactitude de l'expression du couple dépend de la qualité d'estimation du flux.

### III.6.3. Elaboration de vecteur de commande

#### III.6.3.1. Correcteur du flux

Ce correcteur est simple dans son application. Son but est de maintenir l'extrémité du vecteur de flux statorique  $\varphi_s$  dans une couronne circulaire, (FigIII.4).

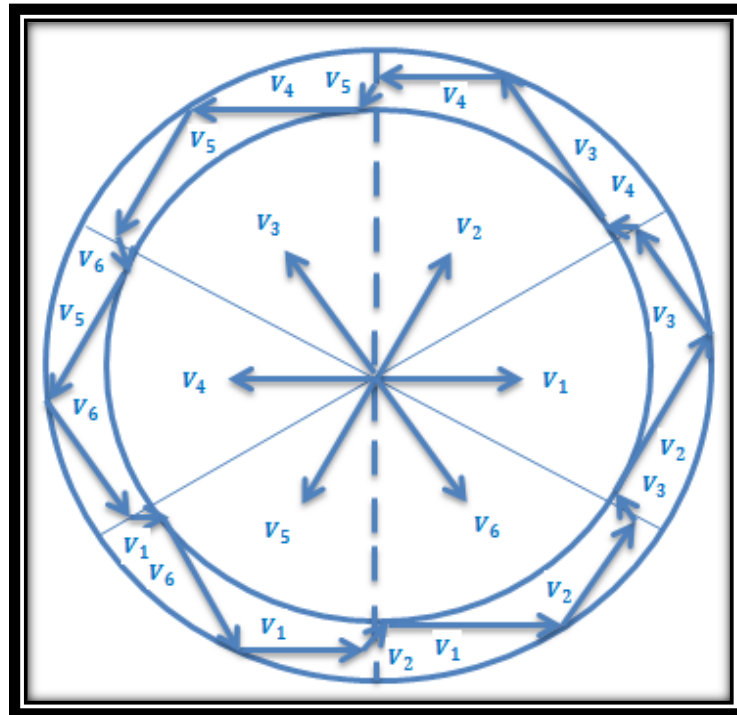
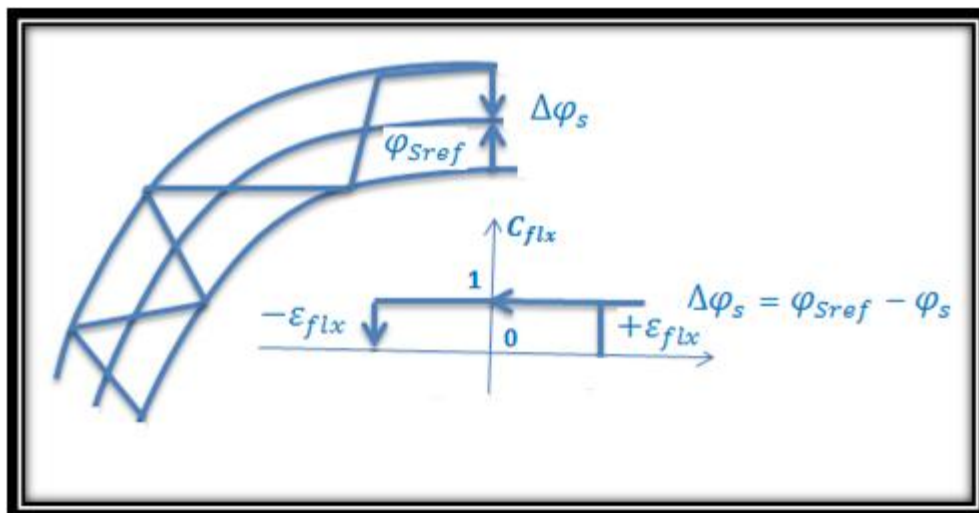


Figure III.4 : Sélection des tensions  $V_i$  correspondant au contrôle de l'amplitude de flux statorique  $\varphi_s$



figureIII.5 : Comparateur à hystérésis utilisé pour contrôler le module de vecteur de flux statorique



On peut écrire ainsi :

$$\begin{cases}
 \text{si } \Delta\varphi_s > +\varepsilon_{flx} & \text{alors } C_{flx} = 1 \\
 \text{si } 0 \leq \Delta\varphi_s \leq +\varepsilon_{flx} & \text{et } \frac{d\Delta\varphi_s}{dt} > 0 & \text{alors } C_{flx} = 0 \\
 \text{si } 0 \leq \Delta\varphi_s \leq +\varepsilon_{flx} & \text{et } \frac{d\Delta\varphi_s}{dt} < 0 & \text{alors } C_{flx} = 1 \\
 \text{si } \Delta\varphi_s < -\varepsilon_{flx} & \text{alors } C_{flx} = 1
 \end{cases} \quad (III.16)$$

En effet, si on introduit l'écart ( $\Delta\varphi_s$ ), entre le flux de référence  $\varphi_{sref}$  et le flux estimé  $\varphi_s$  dans un comparateur à hystérésis à deux niveaux (figure III.5), celui-ci génère à sa sortie la valeur  $C_{flx} = +1$  pour augmenter le flux (erreur de flux positive) et  $C_{flx} = 0$  pour le réduire (erreur de flux négative) cela permet de plus, d'obtenir une très bonne performance dynamique du flux.

Ainsi, pour augmenter l'amplitude du flux ( $\varphi_s$ ), les  $V_i, V_{i+1}$  et  $V_{i-1}$  peuvent être sélectionnés, les vecteurs  $V_{i+2}, V_{i-2}$  et  $V_{i+3}$  sont appliqués pour le diminuer.

Par contre, ce correcteur ne permet pas l'inversion du sens de rotation du vecteur de flux  $\varphi_s$ , donc pour aller en « marche arrière », on s'impose un croisement d'un bras du convertisseur. [28]

### III.6.3.2. Contrôle du couple

Pour contrôler le couple, les deux types de comparateurs à hystérésis peuvent être utilisés :

- Correcteur à deux niveaux ;
- Correcteur à trois niveaux ;

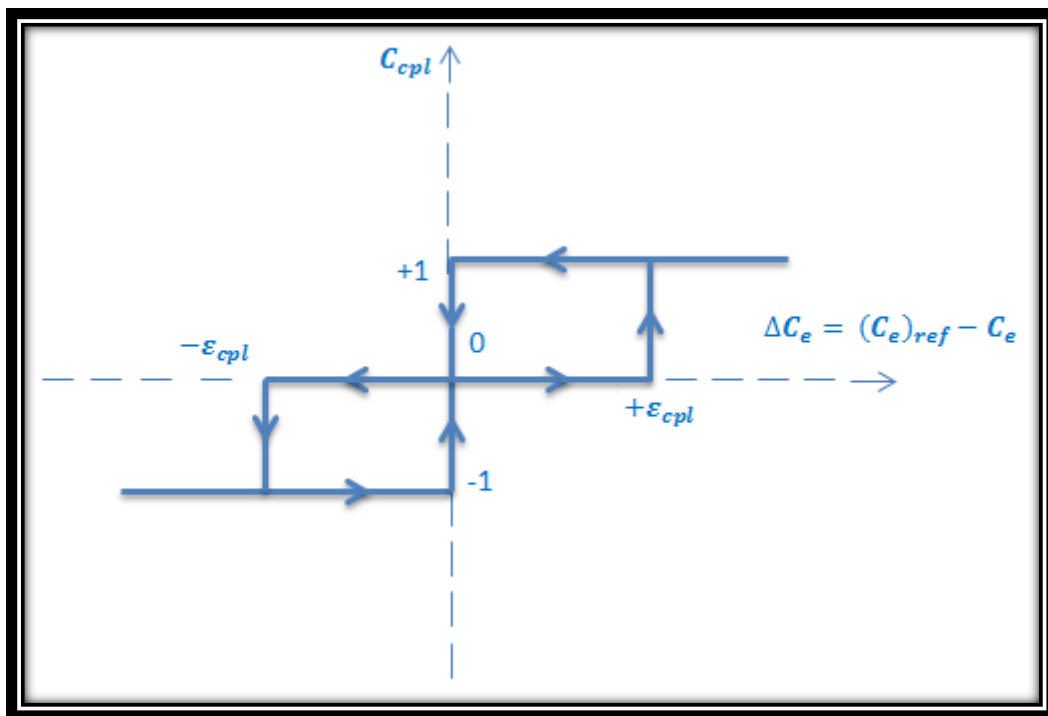
#### III.6.3.2.1. Correcteur à deux niveaux

Ce correcteur est identique à celui utilisé pour le contrôle du module du flux statorique. Il n'autorise le contrôle du couple que dans un seul sens de rotation. Ainsi, seuls les vecteurs nuls, peuvent être sélectionnés pour faire diminuer le couple. Dans le cas d'utilisation de ce correcteur le changement de sens de rotation ne peut se réaliser que par la permutation des deux phases de la machine asynchrone. [28]



**III.6.3.2.2. Correcteur à trois niveaux**

Un comparateur à hystérésis à trois niveaux (-1, 0, 1), permet de contrôler la machine dans les deux sens de rotation, en générant soit un couple positif, ou un couple négatif, il confère à la commande la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants. Ce comparateur est modélisé par l’algorithme (III.17) tels que  $C_{cpl}$  représente l’état de sortie de comparateur et  $\varepsilon_{cpl}$  la limite de la bande d’hystérésis (figure III.4). [28]



**Figure III.6 :** Comparateur à hystérésis à trois niveaux utilisés pour le réglage du couple



On peut écrire alors :

$$\left\{ \begin{array}{lll}
 \text{si } \Delta C_e > +\varepsilon_{cpl} & & \text{alors } C_{cpl} = 1 \\
 \text{si } 0 \leq \Delta C_e \leq +\varepsilon_{cpl} & \text{et } \frac{d\Delta C_e}{dt} > 0 & \text{alors } C_{cpl} = 0 \\
 \text{si } 0 \leq \Delta C_e \leq +\varepsilon_{cpl} & \text{et } \frac{d\Delta C_e}{dt} < 0 & \text{alors } C_{cpl} = 1 \\
 \text{si } \Delta C_e < -\varepsilon_{cpl} & & \text{alors } C_{cpl} = -1 \\
 \text{si } -\varepsilon_{cpl} \leq \Delta C_e \leq 0 & \text{et } \frac{d\Delta C_e}{dt} > 0 & \text{alors } C_{cpl} = 0 \\
 \text{si } -\varepsilon_{cpl} \leq \Delta C_e \leq +\varepsilon_{cpl} & \text{et } \frac{d\Delta C_e}{dt} < 0 & \text{alors } C_{cpl} = -1
 \end{array} \right. \quad \text{(III.17)}$$

En introduisant l'écart ( $\Delta C_e$ ), entre le couple électromagnétique de référence ( $\Delta C_{eref}$ ) et celui estimé ( $\Delta C_e$ ), dans un comparateur à hystérésis à trois niveaux (III.5), celui-ci génère la valeur  $C_{cpl}=1$  pour augmenter le couple,  $C_{cpl}=-1$  pour le réduire et  $C_{cpl}=0$  pour le maintenir constant dans une bande  $\varepsilon_{cpl}$  autour de sa référence. Ce choix d'augmenter le nombre de niveaux est proposé afin de minimiser la fréquence de commutation moyenne des interrupteurs, car la dynamique du couple est généralement plus rapide que celle de flux. De plus, ce correcteur autorise une décroissance rapide du couple, en effet, pour diminuer la valeur de celui-ci, en plus des vecteurs nuls (arrêt de la rotation de  $\varphi_s$ ), par exemple on peut appliquer les vecteurs  $V_{i-1}$  ou  $V_{i-2}$  si l'on choisit un sens de rotation positif (sens trigonométrique). Dans ce cas, le flux  $\varphi_r$  rattrapera d'autant plus vite le flux  $\varphi_s$  que ce dernier ne se contente pas de l'attendre, mais va à sa rencontre (inversion de sens de rotation du flux  $\varphi_s$ ). [28]

**III.6.3.3. La table de commutation**

Comme on l'a vu il est possible d'utiliser deux vecteurs tension pour chaque sens de rotation, l'un fait croître et l'autre fait décroître le vecteur flux statorique, pour cela le couple peut être contrôlé, en utilisant un tableau nommé « table logique de commutation optimal » qui permet de définir le vecteur qu'il faut appliquer dans chaque secteur à partir des sorties des correcteurs et la position du vecteur flux statorique, le tableau(III.1) présente cette table.



A noter que la fréquence de commutation dépend de la bande d’hystérésis du flux utilisée, si cette bande est petite alors la fréquence est élevée, sino la fréquence est moins élevée.  
[19]

N		1	2	3	4	5	6
$C_{flx}=1$	$C_{cpl}=1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$
	$C_{cpl}=0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$
	$C_{cpl}=-1$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
$C_{flx}=0$	$C_{cpl}=1$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$
	$C_{cpl}=0$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$	$V_0$	$V_7$
	$C_{cpl}=-1$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$

**Tableau III.1 :** La table de commutation de la commande directe du couple

Avec :

$$V_0=[0\ 0\ 0]; V_1=[1\ 0\ 0]; V_2=[1\ 1\ 0]; V_3=[0\ 1\ 0]; V_4=[0\ 1\ 1]; V_5=[0\ 0\ 1]; V_6=[1\ 0\ 1];$$

$$V_7=[1\ 1\ 1];$$

Les vecteurs  $V_0$  et  $V_7$  sont choisis alternativement de manière à minimiser le nombre de commutations dans les bras de l’onduleur.

Il est à noter que dans le cas de la commande directe du couple, l’effet de non linéarité des matériaux est implicitement pris en compte étant donné que les grandeurs d’état électriques sont constituées par les flux.

### III.7. Commande de convertisseur côté génératrice

#### III.7.1. Commande MLI

La MLI, permet d’obtenir des alternances de la tension de sortie qui est formée de plusieurs créneaux, Ceci peut être fait en adoptant des techniques de commande des interrupteurs, il en existe plusieurs, à savoir la stratégie triangulo-sinusoidale, la stratégie hystérésis. Dans ce contexte nous nous intéressons à la première technique.



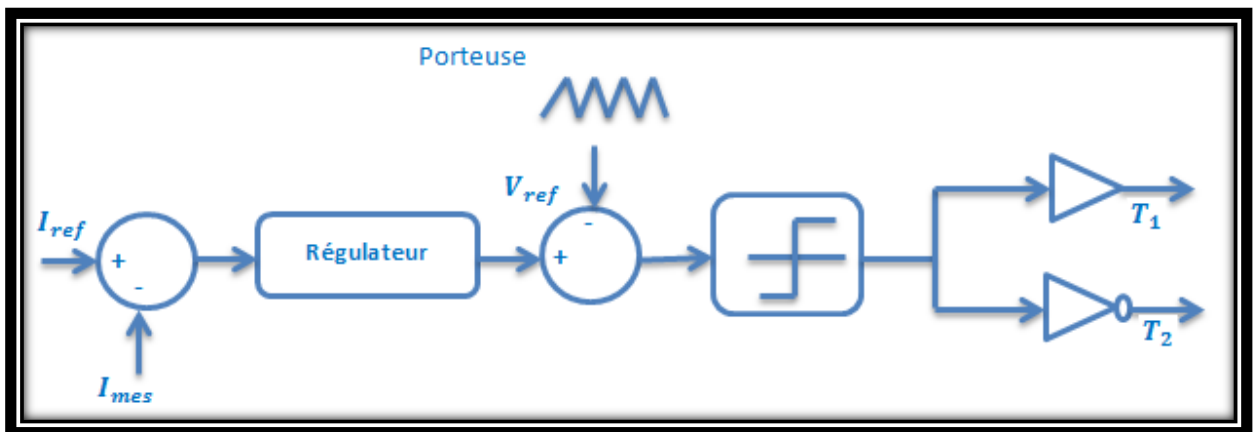


Cette stratégie dont le principe est basée sur la variation de l'amplitude de la référence "V<sub>r</sub>" et la fixation de celle de porteuse "U<sub>p</sub>" qui est représentée par un signal triangulaire de fréquence élevée.

L'onde de sortie est alors obtenue par une simple comparaison de la sinusoïde de fréquence "f" au signal triangulaire donnant ainsi l'ordre d'allumage ou d'extinction aux composants constituant l'onduleur.

Dans cette technique, il faut définir deux paramètres qui sont :

- L'indice de modulation « m » qui représente le rapport entre la fréquence de la porteuse « f<sub>p</sub> » et la fréquence de la référence « f » désirée.
- Le coefficient de réglage en tension « r » qui représente le rapport entre l'amplitude de l'onde de référence et la valeur de crête de l'onde de porteuse. [29],[30]



**Figure III.7** : Schéma de principe de la commande MLI

**III.7.2. Contrôle de puissance**

Le dispositif de commande permet d'imposer les courants transités à suivre leurs références. Cela entraîne les puissances actives et réactives transitées suivantes :

$$P = E_d \cdot i_{resd} + E_q \cdot i_{resq} \tag{III. 18}$$

$$Q = E_q \cdot i_{resd} - E_d \cdot i_{resq} \tag{III. 19}$$

En multipliant l'équation (III.18) par E<sub>d</sub> et l'équation (III.19) par E<sub>q</sub> , on aura :



$$P \cdot E_d = E_d^2 \cdot i_{resd} + E_q \cdot E_d \cdot i_{resq} \quad (III. 20)$$

$$Q \cdot E_q = E_q^2 \cdot i_{resd} - E_d \cdot E_q \cdot i_{resq} \quad (III. 21)$$

En faisant la somme de ses deux équations, l'expression du courant  $i_{resd}$  est donnée par :

$$i_{resd} = \frac{P \cdot E_d + Q \cdot E_q}{E_d^2 + E_q^2} \quad (III. 22)$$

De la même manière, on aura l'expression du courant  $i_{resq}$  :

$$i_{resq} = \frac{P \cdot E_q - Q \cdot E_d}{E_d^2 + E_q^2} \quad (III. 23)$$

Il est donc possible d'imposer des références pour la puissance active  $P_{ref}$  et la puissance réactive  $Q_{ref}$ , en imposant les courants de références comme suit :

$$i_{resd_{ref}} = \frac{P_{ref} E_{d_{mes}} + Q_{ref} E_{q_{mes}}}{E_{d_{mes}}^2 + E_{q_{mes}}^2} \quad (III. 24)$$

$$i_{resq_{ref}} = \frac{P_{ref} E_{q_{mes}} - Q_{ref} E_{d_{mes}}}{E_{d_{mes}}^2 + E_{q_{mes}}^2} \quad (III. 25)$$

La composante directe du courant est utilisée pour réguler la tension du bus continu. Ce dernier est contrôlé à l'aide d'un régulateur (PI). La composante en quadrature est utilisée pour réguler la puissance réactive transitée [32].

Le système de commande doit permettre de maintenir la tension du bus continu constante, et d'obtenir des tensions sinusoïdales au primaire du transformateur d'amplitude et de fréquences identiques à celles du réseau. La puissance réactive est imposée nulle  $Q_{ref} = 0$ .

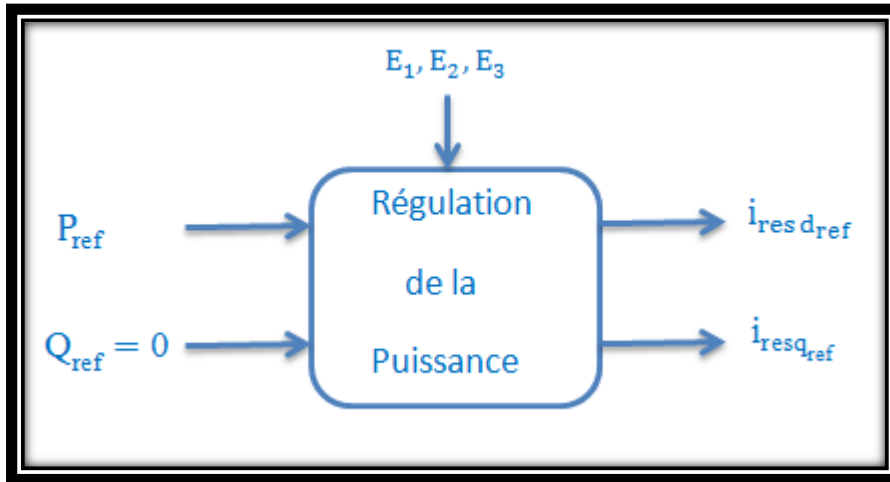


Figure III.8 : Contrôle de la puissance

III.8. Structure générale de la commande DTC classique

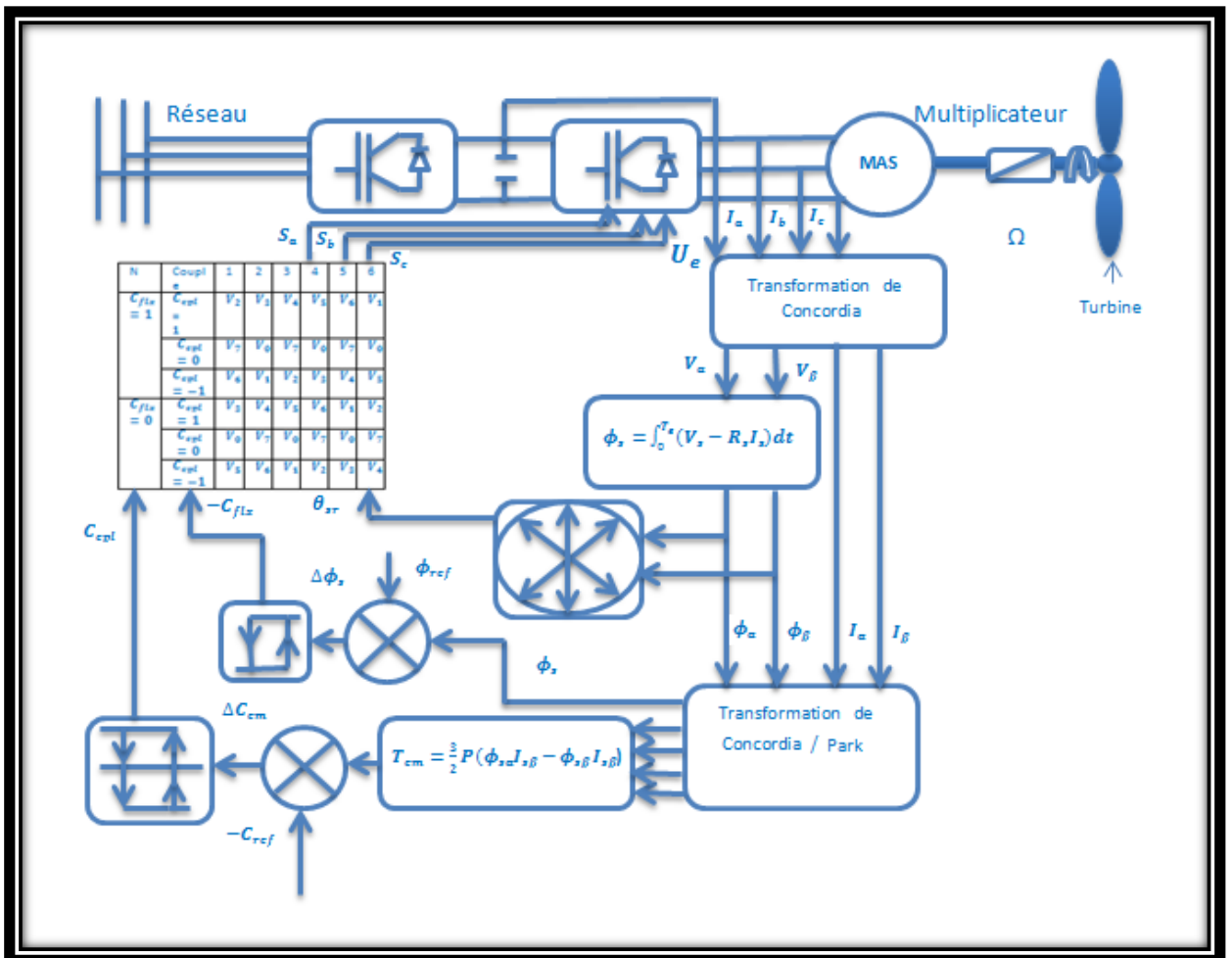


Figure III.9 : Schéma de principe de commande direct du couple étudiée



### **III.9. Conclusion**

Nous avons présenté la structure de la commande directe du couple (DTC) qui est une technique simple pour la commande d'une machine asynchrone, et qui présente une solution aux problèmes de la robustesse par rapport aux contrôles vectoriels.

Le modèle présenté dans ce chapitre fera l'objet d'une simulation numérique avec présentation et interprétation des résultats dans la prochaine partie de notre travail.



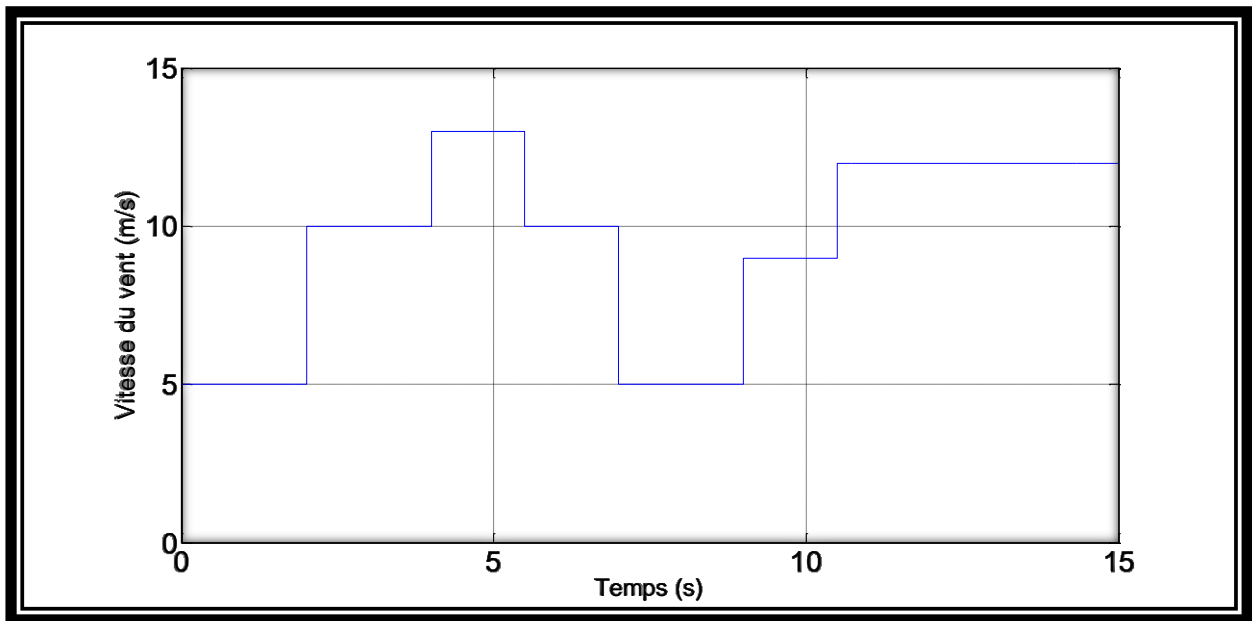
**IV.1. Introduction**

Ce dernier chapitre est consacré à la simulation de la chaîne de conversion avec la commande (DTC) qui a déjà été modélisée dans les chapitres précédents, tout en représentant les résultats et les interprétations de chaque figure.

**IV.2. Présentation et interprétation des résultats**

Après avoir simulé notre système de commande avec le MATLAB/SIMULINK, on a opté pour la présentation des résultats de simulation de la (GAS) commandée par la (DTC), et cela en appliquant le profil de vent (vitesse variable) illustré dans la figure (IV.1) avec :

$\phi_{sref}=0.7$  (Wb),  $V_{dc}=465$  (v).



**Figure IV.1 : Vitesse du vent**

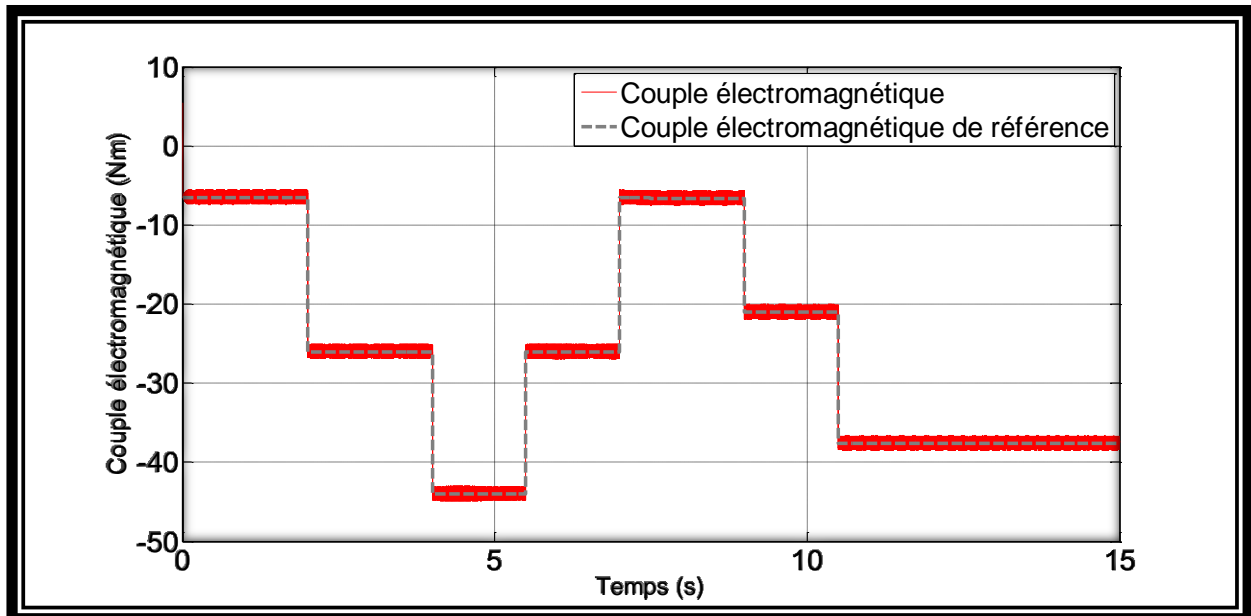


Figure IV.2 : Réponse dynamique du couple pour des différentes références du couple

$C_{emref} = -7$  (N.m) à  $t = 0$  s,  $C_{emref} = -27$  (N.m) à  $t = 2$  s,

$C_{emref} = -44$  (N.m) à  $t = 4$  s,  $C_{emref} = -27$  (N.m) à  $t = 5.5$  s,

$C_{emref} = -7$  à  $t = 7$  s,  $C_{emref} = -21$  (N.m) à  $t = 9$  s

$C_{emref} = -39$  (N.m) à  $t = 10.5$  s.

D'après la figure (IV.2) on constate que le couple électromagnétique suit sa référence qui correspond bien au profil du vent appliqué.

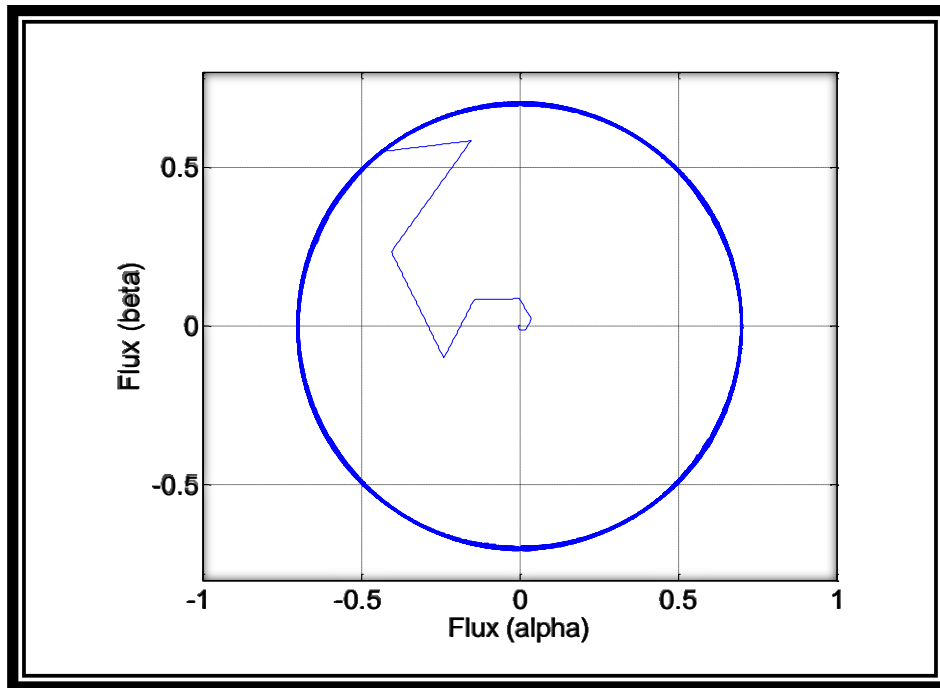


Figure IV.3 : Réponse dynamique du flux statorique

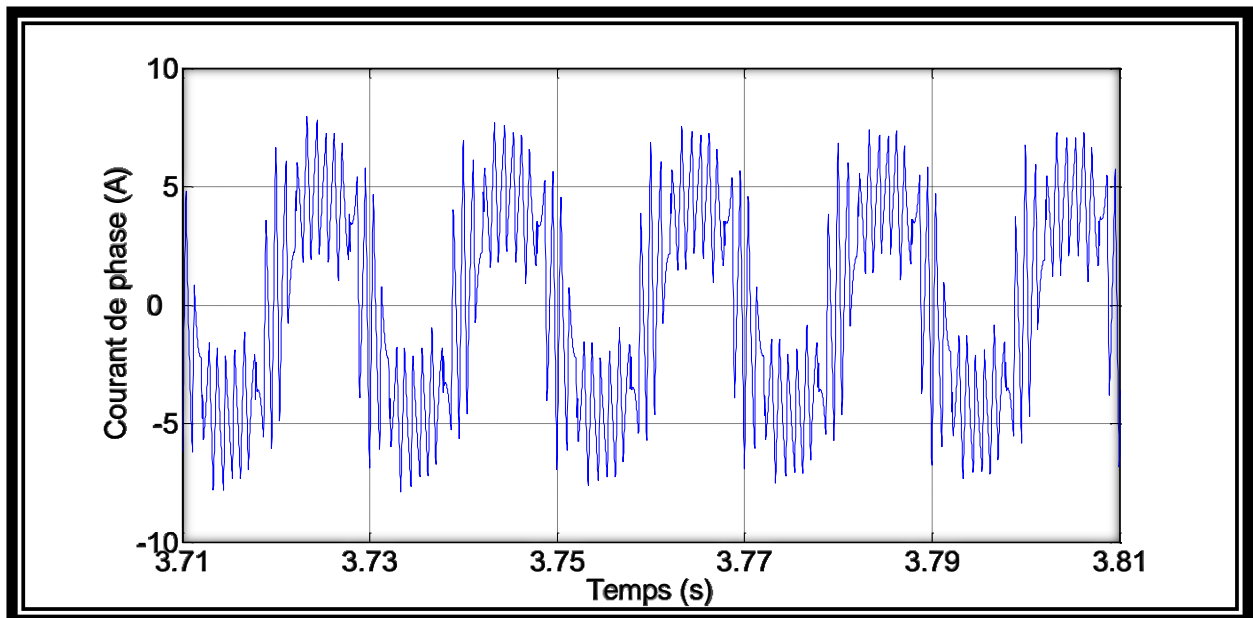


Figure IV.4 : Courant de phase envoyée au réseau



La figure (IV.3) montre l'allure de flux statorique comme on pouvait le prévoir elle est circulaire.

On remarque que la valeur du module du flux reste proche de celle de référence (0.7wb), et on peut constater aussi que la variation de vitesse n'a pas d'influence sur le flux.

Le courant envoyé au réseau suit bien la variation du vent tout en étant de forme sinusoïdale comme le montre la figure (IV.4).

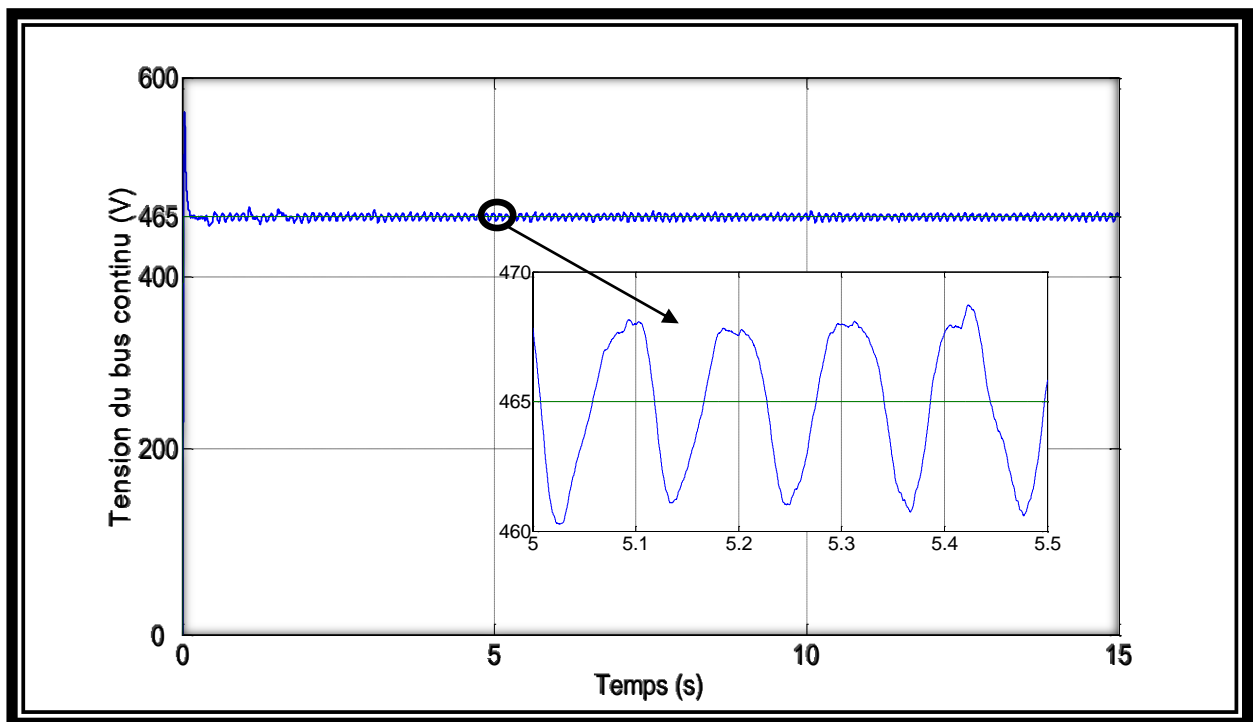


Figure IV.5 : Tension de bus continu ( $v_{dc}$ )

La figure (IV.5) montre que la tension du bus continu ( $v_{dc}$ ) est maintenue constante autour de sa valeur de référence, ce qui permet aussi d'avoir les tensions de phase constantes à la sortie de l'onduleur.



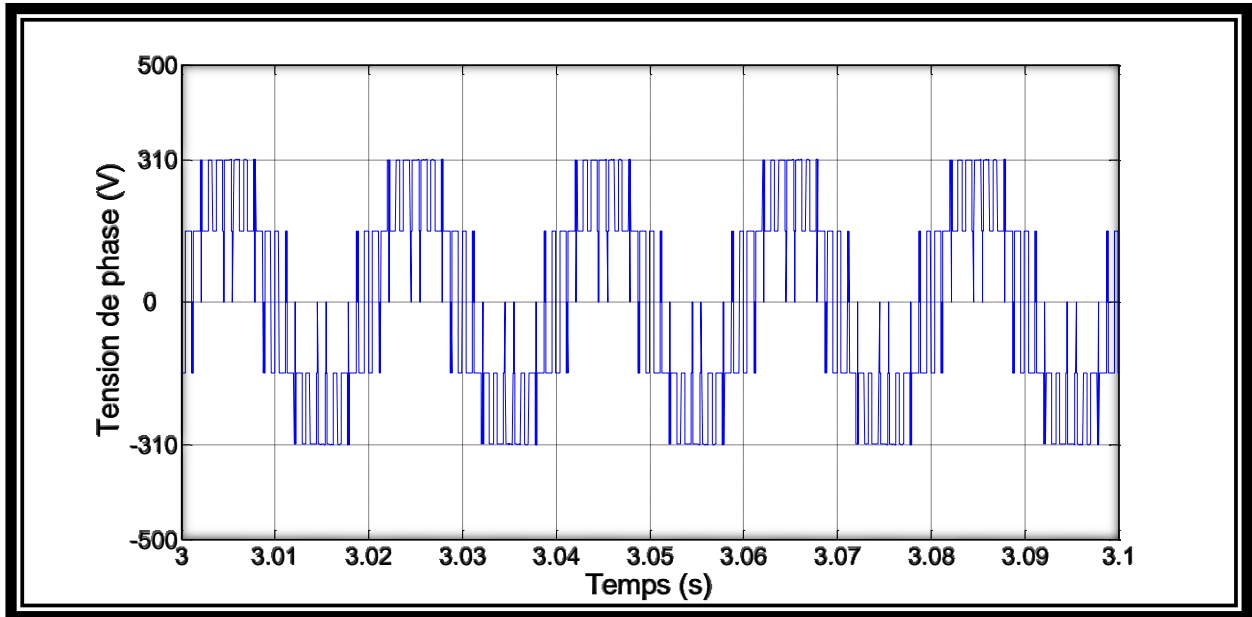


Figure IV.6 : Tension de phase

On constate à partir de la figure (IV.6) que les tensions statorique dans le repère (a, b, c) ont la même amplitude ( $v_{dc}$  impose constante  $v = \sqrt{\frac{3}{2}} v_{dc}$ ).

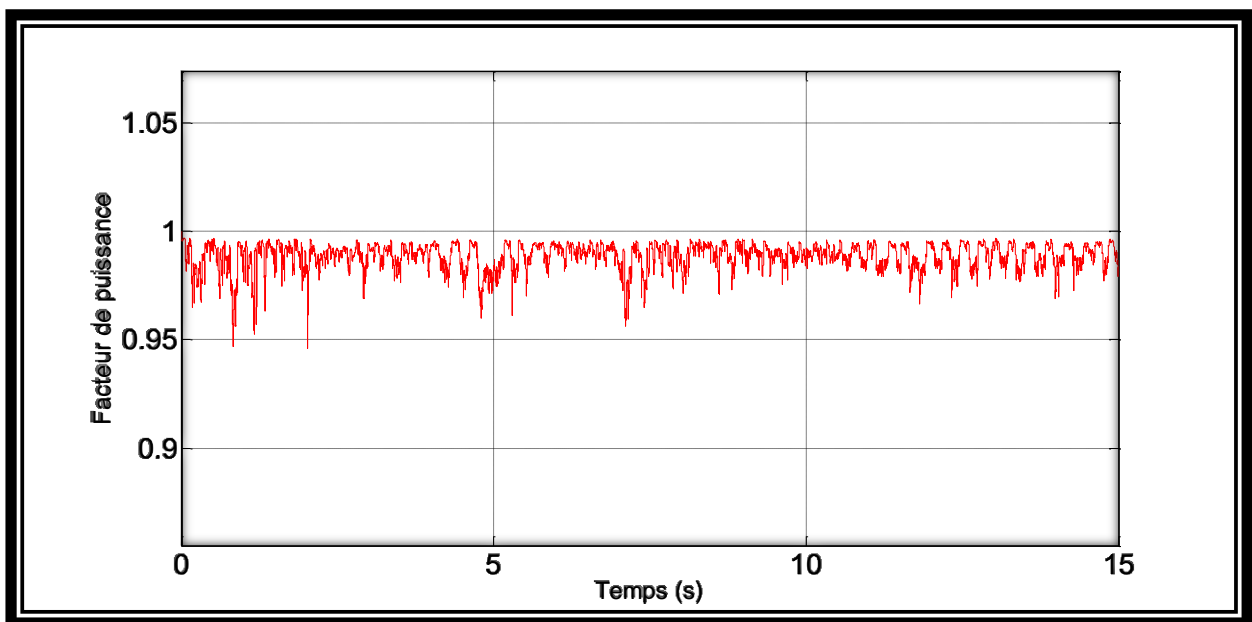


Figure IV.7 : Facteur de puissance ( $\cos\varphi$ )



La figure (IV.7) montre l'allure du facteur de puissance qui est presque unitaire et ces résultats montrent une bonne régulation de la puissance envoyée au réseau.

#### **IV.4. Conclusion**

Les résultats de simulation obtenus montrent une bonne régulation de la puissance active envoyée au réseau avec une bonne régulation du flux et du couple électromagnétique.

Cette stratégie de commande est insensible aux variations des paramètres rotoriques de la machine, car l'estimation de flux ne dépend que de la résistance du stator.

La régulation du couple et du flux et la réduction des ondulations dépendent de la période d'échantillonnage  $T_e$  et de la largeur de la bande d'hystérésis du couple et celle de flux.

## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire est consacré à la commande directe du couple (DTC) de la machine asynchrone à cage fonctionnant en mode génératrice dans un système éolien.

Le but de ce travail est d'améliorer les performances de ce contrôle (réduction d'ondulation du flux et couple, temps de réponse rapide).

Pour se placer dans le contexte général du travail et de choisir le système global à commander, il était important d'élaborer un document de synthèse illustrant les concepts fondamentaux d'une chaîne de conversion éolienne. Pour cela le premier chapitre contient une présentation de quelques généralités sur les éoliennes ainsi qu'un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Bien évidemment toute implantation d'algorithme de commande nécessite la connaissance des modèles mathématiques des différentes parties du système à commander. La modélisation complète du système a été abordée dans le deuxième chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous avons abordé la commande de la génératrice qui nous a permis la simulation de l'ensemble du système éolien. Enfin, le dernier chapitre est réservé à l'interprétation des résultats de simulation de la commande directe du couple.

Etant donné que la méthode DTC utilise des régulateurs hystérésis ce qui est l'un de ses plus grands inconvénients, de futurs développements peuvent être orientés vers l'utilisation de techniques de l'intelligence artificielle, tel que les réseaux de neurones ou d'autre encore afin d'améliorer cette méthode DTC et réduire ses inconvénients.

## Annexe

### Paramètres de la turbine

La puissance nominale :

Rayon :  $R_t = 2,1 \text{ m}$

Vitesse moyenne du vent :  $V_v = 13 \text{ m/s}$

Le multiplicateur :  $G = 3,41$

### Paramètres de la machine asynchrone

Les caractéristiques électriques :

- Rotor de type de cage d'écureuil
- 2 paires de pôles
- $R_s = 1.07131 \Omega$
- $R_r = 1,29511 \Omega$
- $L_s = 0.1137 \text{ mH}$
- $L_r = 0.1096 \text{ mH}$

Les paramètres mécaniques

- $J = 0,0075 \text{ kg.m}^2$
- $f = 0 \text{ N.m/rad.s}^{-1}$

### Paramètres de simulation

Les paramètres du bus continu

- La tension redresser de 465 V
- Capacité du bus continu  $C = 1000 \mu\text{F}$

Pas de simulation est de 0.0001s

## Références Bibliographiques

[1] : F. Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne » Thèse de doctorat, a l'école polytechnique, Nontes, 2003.

[2] : Nawel Hamdi « Modélisation et commande des génératrice éoliennes. Mémoire de magister », université de Constantine, 2008.

[3] : Ait abdelmalek Massinissa et tatah kamel « Application de la commande vectorielle sur un système d'énergie éolien reliée au réseau », Mémoire de fin d'étude, université A. mira de Bejaia, 2009.

[4] : Brice Beltran « contribution a la commande robuste des éoliennes a base de génératrice asynchrone double alimentation : on mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de doctorat, université de Brigande accidentelle, 2010.

[5] : Site Internet de l'association danoise de l'industrie éolienne « <http://www.windpower.org/fr/core.htm> ».

[6] : Khaled Ferkous « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne. Mémoire de magister », universite Mentouri, Constantine, 2009.

[7] : Moussa Siddou Abdoulaziz « Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne ». Projet de fin d'étude, à l'école national de polytechnique, 2007.

[8] : Boumezoued faouzi et Messahli abd elhak « Modélisation et commande d'une chaine de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de fin d'étude, universite A. mira de Bejaia, 2006.

[9] : Smati Naoual et Gheufa Saida « Commande en couple d'une génératrice asynchrone a double alimentation "GADA" », Mémoire de fin d'étude, université A. mira de Bejaia, 2006.

[10] : Brahim Fouzia, « l'étude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une central hybride PV/éolien », Mémoire de magister, université de mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2012.

[11] : Adam Mirecki : « Etude comparative de chaines de conversion d'énergie dédiées a une éolienne de petite puissance ». Thèse de doctorat, a l'institut national de polytechnique, Toulouse, 2005.

[12] : Menasri Idir et Menasri Loucif« Commande d'un systèmes éolien autonome basée sur une génératrice asynchrone avec stockage », Mémoire de fin d'étude, université A. mira de Bejaia, 2008.

[13] : Gabriel O.Cimuca : « système inertie de stockage d'énergie associe à des générateur éoliens ». Thèse de doctorat, à Ecole national D'arts et Matiers, Centre de Lille France, 2005.

[14] : Armande Boyette : « contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », Thèse de doctorat, université Henri Poincaré, Nancy I, 2006.

[15] : Bouhedda Ali : « Contribution a l'étude de système de commande d'une éolienne », Mémoire de Magister, université de Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2011.

[16] : Ibrir Farés et Mammasse Hamza « Commande et optimisation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne, Mémoire de fin d'étude, université A. mira de Bejaia, 2008.

[17] : Mohamed Adjoudj, Mohamed Abid, Abdelghani Aissaoui, Youcef Ramdani, Houria Bounaua : « Commande par mode glissant d'une machine asynchrone a double alimentation monté dans une éolienne », université Djilali liabes BP89, Sidi bel Abbes, Algérie.

[18] : Kr.Hachemi ammaoui et El mahdi bouzera « Etude de la commande directe du couple d'une machine asynchrone avec optimisation énergétique » Ingénieur d'état en électromécanique. Université A. mira de Bejaia, 2007.

[19] : M. ramli aziz «Contribution à l'amélioration des performance d'un aérogénérateur base sur une MSAP » Ingénieur d'état en électromécanique. Université A. mira de Bejaia, 2010.

[20] : Boudrahem Naïma, « étude et commande d'une éolienne à vitesse variable » ingénieur d'état en électronique, université A. mira de Bejaia, 2007.

[21] : Melle.Boubet wahida et Azib samir«Modélisation, simulation et la commande vectorielle sous les conditions de défaut de la machine double étoile » Ingénieur d'état en électrotechnique. Université A. mira de Bejaia, 2005.

[22] : M.Abdoune fateh et Idir Abdelhakim «Étude et simulation de chaîne conversion éolienne à base d'une machine asynchrone double alimentée » Ingénieur d'état en électromécanique. Université A. mira de Bejaia, 2008.

[23] : Toufouti riad « Contribution à la commande directe de couple de la machine asynchrone » Thèse de doctorat, université Mentouri, Constantine, 2008.

[24] : M.tamssaout karim et M.belbessai Sofiane «contrôle directe modulé du couple d'une génératrice asynchrone dédiée à une éolienne. », Mémoire de fin d'étude université A. mira de Bejaia, 2007.

[25] : Zekkour Abdelhamid<sup>(1)</sup>, Abdessemed Djallal<sup>(2)</sup>, and Naceri Farid<sup>(3)</sup> «Contrôle Direct de Couple (DTC) de La Machine à Induction »<sup>(1)</sup> Université de Batna, <sup>(2)</sup> Université de Ouargla <sup>(3)</sup> Université de Batna.2013.

[26] : M.Ikni djamel et Soualmi younes«Contrôle directe de couple d'une machine asynchrone par estimateur flou de la résistance statorique. Ingénieur d'état en électrotechnique. Université A. mira de Bejaia, 2007.

[27] : B. François, B. Robyns, E. Dejaeger «Solutions pour la connexion et l'apport aux services "système" d'éoliennes connectées au réseau de moyenne tension», journée SEE-SRBE : « Eoliennes et réseaux : Enjeux », Lille, France 2005.

[28] : L. BAGHLI<< Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques>>Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, France, 1999

[29] : M.Hamour Slimane « Modélisation et simulation des différentes techniques d'auto-amorçage d'une génératrice asynchrone dédiée à l'éolienne » » ingénieur d'état en électrotechnique, université A. mira de Bejaia, 2006.

[30] : Saim samir et Chalane youcef « Etude et calcul d'une génératrice asynchrone pour un système éolien autonome » ingénieur d'état en électrotechnique, université A. mira de Bejaia, 2004.



## **Résumé :**

Le développement durable et les énergies renouvelables suscitent aujourd'hui l'intérêt de plusieurs équipes de recherches. Le développement des éoliennes représente un grand investissement dans le domaine de la recherche technologique. Ces machines qui produisent de l'énergie électrique à partir du vent peuvent constituer une alternative technologique et économique aux différentes sources d'énergies épuisables.

Le travail de ce mémoire a pour objectif d'étudier la machine asynchrone à cage dans le contexte d'une conversion de l'énergie éolienne. Après un bref rappel des concepts de la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Le second chapitre est dédié à la modélisation de la machine asynchrone à cage. Le modèle linéaire de la machine asynchrone présentant des limites, une modélisation originale et simple.

Nous avons finalisé ce travail par et une simulation de l'ensemble sous *SIMULINK*.