



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان –

Université Aboubekr Belkaïd – Tlemcen –  
Faculté de TECHNOLOGIE

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

**Filière** : Electrotechnique

**Spécialité** : Réseaux électriques et Réseaux électriques intelligents

Par :

**HAMOUCHE ABDELKRIM**  
**MALIOUI ABDELHAMID**

**Sujet**

**Commande par mode glissant de la machine asynchrone à double  
alimentation (MADA) utilisée dans une éolienne**

Mémoire soutenu publiquement le 11 /06/2017 *devant le Jury composée de :*

<b>Président</b>	<b>S.M. MELIANI</b>	<b>M.C.A</b>	<b>Univ. Tlemcen</b>
<b>Encadreur</b>	<b>M. CHABANE</b>	<b>M.A.A</b>	<b>Univ. Tlemcen</b>
<b>Examineur</b>	<b>B.YACOUBI</b>	<b>M.A.A</b>	<b>Univ. Tlemcen</b>

Année Universitaire : 2016 – 2017

## **Remerciements**

*Avant tout, nous remercions **ALLAH** pour nous avoir donné le pouvoir de réaliser ce modeste travail.*

*Nous tenons ensuite à remercier notre encadrant Monsieur **M.CHABANE**, pour son soutien, ses conseils et son encadrement qui nous ont été bénéfique pour mener à bien ce travail.*

*Nous exprimons notre reconnaissance à Monsieur **S.M.MELIANI** pour avoir bien voulu accepter de présider le jury.*

*Nous tenons également à remercier Monsieur **B.YACOUBI** d'avoir accepté d'examiner ce travail.*

*Nous voudrions également remercier tous les enseignants que nous avons eu l'honneur d'avoir de connaître et d'apprécier durant notre scolarité.*

*Nous tenons également à remercier nos parents, pour tout le soutien moral, financier, psychologique et particulièrement pour l'amour qu'ils nous portent.*

*Enfin, Nos remerciements s'adressent à toutes les personnes qui ont contribué de loin ou de près à la réalisation de ce modeste travail, notamment l'assistance de Monsieur **Z.DEKALI***

# *DÉDICACES*

*Je dédie ce modeste travail :*

*✚ A mes chers parents en témoignage de l'amour du respect et de  
gratitude que je leur porte.*

*✚ A mes très chers frères et sœurs.*

*✚ A tous mes amis.*

*✚ A mes oncles*

***Abdelkrim***

# *DÉDICACES*

*Je dédie ce modeste travail :*

✚ *A mes chers parents en témoignage de l'amour du respect et de  
gratitude que je leur porte.*

✚ *A mes très chers frères et sœurs.*

✚ *A tous mes amis.*

✚ *A mes oncles*

***Abdelhamid***

## LISTE DES SYMBOLES

### *Paramètres de modélisation du moteur asynchrone*

$R_s$	résistances statorique par phase,
$R_r$	résistances rotorique par phase,
$L_s$	Inductance cyclique statorique,
$L_r$	Inductance cyclique rotorique,
$M$	Inductance cyclique mutuelle (entre stator et rotor),
$p$	nombre de paires de pôles,
$J$	Moment d'inertie (Kg. m <sup>2</sup> )
$C_{em}$	couple électromagnétique.
$T_s$	Constante de temps statorique,
$T_r$	Constante de temps rotorique,
$(d,q)$	Axes de référentiel de Park (tournant à la vitesse de synchronisme)
$(\alpha, \beta)$	Axes de référentiel de Park (fixe au stator)
$\theta$	position angulaire du rotor par rapport au stator,
$\theta_s$	position angulaire du stator par rapport à l'axe $(d)$ ,
$\theta_r$	position angulaire du rotor par rapport à l'axe $(d)$ ,

### *Grandeurs électriques au stator*

$v_{sa}, v_{sb}, v_{sc}$	tensions statoriques triphasées,
$V_{s,abc}$	Vecteur des tensions statoriques triphasées
$v_{s\alpha}, v_{s\beta}$	tensions statoriques diphasées dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$V_{s,\alpha\beta}$	Vecteur des tensions statoriques diphasées dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$v_{sd}, v_{sq}$	tensions statoriques diphasées dans le repère $(d,q)$ ,
$V_{s,dq}$	Vecteur des tensions statoriques diphasées dans le repère $(d,q)$ ,

$i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$	courants statoriques triphasés,
$I_{s,abc}$	Vecteur des courants statoriques triphasés,
$i_{s\alpha}, i_{s\beta}$	courants statoriques diphasés dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$I_{s,\alpha\beta}$	Vecteur des courants statoriques diphasés dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$i_{sd}, i_{sq}$	courants statoriques diphasés dans le repère tournant $(d, q)$ ,
$I_{s,dq}$	Vecteur des courants statoriques diphasés dans le repère tournant $(d, q)$

**Grandeurs électriques au rotor**

$v_{ra}, v_{rb}, v_{rc}$	tensions rotoriques triphasées,
$V_{r,abc}$	Vecteur des tensions rotoriques triphasées,
$v_{r\alpha}, v_{r\beta}$	tensions rotoriques diphasées dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$V_{r,\alpha\beta}$	Vecteur des tensions rotoriques diphasées dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$v_{rd}, v_{rq}$	tensions rotoriques diphasées dans le repère $(d, q)$ ,
$V_{r,dq}$	Vecteur des tensions rotoriques diphasées dans le repère $(d, q)$ ,
$i_{ra}, i_{rb}, i_{rc}$	courants rotoriques triphasés,
$I_{r,abc}$	Vecteur des courants rotoriques triphasés,
$i_{r\alpha}, i_{r\beta}$	courants rotoriques diphasés dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$I_{r,\alpha\beta}$	Vecteur des courants rotoriques diphasés dans le repère $(\alpha, \beta)$ ,
$i_{qr}, i_{dr}$	courants rotoriques diphasés dans le repère tournant $(d, q)$ ,
$I_{r,dq}$	Vecteur des courants rotoriques diphasés dans le repère tournant $(d, q)$

**Grandeurs magnétiques au stator**

- $\phi_{s,abc}$  Vecteur de flux magnétiques au stator,
- $\phi_{s\alpha}, \phi_{s\beta}$  flux statoriques diphasés dans le repère  $(\alpha, \beta)$ ,
- $\phi_{s,\alpha\beta}$  Vecteur de flux statoriques diphasés dans le repère  $(\alpha, \beta)$ ,
- $\phi_{sd}, \phi_{sq}$  flux statoriques diphasés dans le repère tournant  $(d, q)$ ,
- $\phi_{sdq}$  Vecteur de flux statoriques diphasés dans le repère tournant  $(d, q)$ ,

**Grandeurs magnétiques au rotor**

- $\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$  flux magnétiques au rotor,
- $\phi_{r,abc}$  Vecteur de flux magnétiques au rotor,
- $\phi_{r\alpha}, \phi_{r\beta}$  flux rotoriques diphasés dans le repère  $(\alpha, \beta)$ ,
- $\phi_{r,\alpha\beta}$  Vecteur de flux rotoriques diphasés dans le repère  $(\alpha, \beta)$ ,
- $\phi_{rd}, \phi_{rq}$  flux rotoriques diphasés dans le repère tournant  $(d, q)$ ,
- $\Phi_{r,dq}$  Vecteur de flux rotoriques diphasés dans le repère tournant  $(d, q)$ ,
- $\omega$  pulsation électrique correspondante à la vitesse de rotation,
- $\omega_s$  pulsation électrique des grandeurs statoriques,
- $\omega_r$  pulsation électrique des grandeurs rotoriques,
- $g$  Glissement de la vitesse de rotation  $(\omega_s - \omega) / \omega_s$ ,
- $N$  vitesse mécanique de rotation ( $tr / \min$ ),
- $\Omega$  vitesse mécanique de rotation ( $rad / s$ ),

**Abréviation utilisé :**

MADA	machine asynchrone double alimentation
GADA	génératrice asynchrone double alimentation
MLI	modulation de largeur d'impulsion
AC	courant alternative
DC	courant continue
PI	proportionnel intégré
FTBO	Fonction de transfert en boucle ouvert
FTBF	Fonction de transfert en boucle fermé
MG	mode glissant
RMG	Régulateur mode glissant
MC	mode de convergence
MRP	mode au régime permanent

## TABLE DE MATIERE

<b>Introduction générale</b> .....	08
<b>CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS</b>	
<b>I.1 Introduction</b> .....	11
<b>I.2 Historique de L'éolien</b> .....	11
I.2.1 Production éolienne.....	12
I.2.2 Eolien en Algérie .....	13
I.2.3 l'éolien dans le monde.....	14
<b>I.3 quelques notions sur le vent</b> .....	14
I 3.1 Direction et vitesse du vent.....	14
I.3.2 Principaux composants d'une éolienne.....	15
<b>I.4 Généralités sur les différents types d'éoliennes</b> .....	18
I.4.1Eoliennes à axe vertical.....	18
I.4.2Eoliennes à axe horizontal.....	19
I.4.2.1 Eoliennes Lentes.....	20
I.4.2.2 Eoliennes rapides.....	21
I.4.3 Type de Fonctionnement.....	21
I.4.3.1 Eoliennes a vitesse fixe.....	21
I.4.3.2 Eoliennes a vitesse variable.....	23
<b>I.5 Extraction de l'énergie apportée par le vent</b> .....	23
I.5.1 Energie cinétique d'une colonne d'air - Puissance théoriquement disponible... ..	24
I.5.2 Puissance de vent récupérable – Limite de Betz.....	24
I .5.3 Régulation de puissance.....	27
I 5.4 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	28
<b>I .6 Types des générateurs électriques</b> .....	29
I .5.1 Génératrices asynchrones à cage.....	29
I .5.2 Génératrices synchrones.....	30
I .5.3 Machine asynchrone à double alimentation.....	31
I .5.3.1 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation .....	31
I .6.3.2 Principe de fonctionnement de la MADA.....	32
I .6.3.3 Classification des machines à double alimentation.....	32
I .6.3.4 Modes de fonctionnement de la MADA .....	35
I .6.3.5 Les avantages et les inconvénients de la MADA.....	37
I .6.3.6 Domaine d'application de la MADA.....	38
<b>I .7 Conclusion</b> .....	38
<b>CHAPITRE I : COMMANDE VECTORIELLE DIRECTE ET INDIRECTE DE LA MADA</b>	
<b>II.1 Introduction</b> .....	40
<b>II. 2 Machine Asynchrone à Double Alimentation</b> .....	40
II.2.1 Modélisation.....	41
II.2.1.1 Hypothèses simplificatrices .....	41
II.2.1.2 Modèle de la MADA dans le repère triphasé.....	41
II.2.1.2.1 Equations des tensions.....	42
II.2.1.2.2 Equations des flux .....	43
II.2.1.2.3 Equation mécanique .....	43
II.2.1.3 Modèle de la MADA dans le plan (dq).....	44
II.2.1.3.1 La transformation de PARK.....	44
II.2.1.3.2 Application de la transformation de PARK.....	44
II .2.2 Modélisation de l'alimentation de la MADA .....	45



## **INTRODUCTION GENERALE**

La consommation d'énergie, dans le courant du siècle dernier, a considérablement augmenté à cause de l'industrialisation massive. Les prévisions des besoins en énergie pour les années à venir ne font que confirmer cette tendance, notamment compte tenu de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques.

Face à ces problèmes, il s'avère nécessaire de faire appel à des sources d'énergie nouvelles qui seront sans conséquences négatives pour l'homme et l'environnement.

De ce fait, l'énergie éolienne apparaît en bonne place parmi les formes d'énergie renouvelable, non pour le remplacement des ressources conventionnelles, mais comme énergie complémentaire aux énergies traditionnelles.

Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie [3].

Les premières machines électriques qui furent utilisées dans le domaine éolien étaient Les machines asynchrones à cage d'écureuil [2]. En effet, celles-ci présentent plusieurs avantages tels que leur moindre cout, leur robustesse et leur entretien réduit.

Le travail que nous avons à réaliser, consiste en une étude sur la MADA pilotée à travers les grandeurs rotoriques, intégrée dans un système éolien. L'étude portera sur l'apport d'une MADA dans l'amélioration du rendement de l'éolienne, de par sa capacité à assurer un fonctionnement à très basse vitesse [32]. Ce travail est structuré en trois chapitres, ces derniers sont énoncés de la manière suivante :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités sur l'éolienne accompagnées d'un état de l'art sur la machine utilisée à la conversion électromécanique avec leurs différentes configurations

Le deuxième chapitre on présentera la modélisation da la MADA et de l'alimentation de cette machine, sa mise en équation permettra de donner son modèle, on terminera cette partie par l'étude de la commande vectorielle appliquée au flux statorique de la MADA munie d'un

réglage de puissance active et réactive statorique par un régulateur PI classique. Les performances de cette commande vectorielle seront montrées par des résultats de simulation.

Dans le chapitre trois, nous introduisons un régulateur a mode glissant pour contrôler la puissance active et réactive du stator de la MADA. Ensuite, une étude comparative des réponses données par ce régulateur a ceux données par le régulateur PI, sera effectuée.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche futures.

# **CHAPITRE 1 : GENERALITES SUR LES SYSTEMES EOLIENS**

## I. 1. Introduction :

L'énergie du vent était utilisée depuis 5000 ans par des hommes pour traverser des mers dans des bateaux. Actuellement le système éolien sert à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique de puissance variant de quelques KW à 7.5 MW.

Il se compose d'une nacelle, d'un mât, des pales et d'un multiplicateur de vitesse. La fabrication de ces différents éléments est d'une technologie avancée, ce qui les rend par conséquent onéreux.

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux dispositifs de production d'électricité à énergie renouvelable propre proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire dont le problème de stockage des déchets radioactifs demeure sans solution mais qu'elle ne peut 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 pour maximiser la conversion énergétique ; il est impératif d'avoir une bonne concordance entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique [9].

Une éolienne se compose :

- d'un système qui permet de la contrôler électriquement (machine électrique associée à la commande).
- d'un système qui permet de la contrôler mécaniquement (orientation des pales de l'éolienne, orientation de la nacelle).

Dans ce chapitre, Nous allons nous intéresser essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement et l'étude de l'énergie cinétique du vent. La dernière partie de ce chapitre est consacré aux différents types de génératrices.

## I.2 Historique de l'éolien

Il y a plus de 3000 ans déjà, que l'énergie du vent a été transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins et des systèmes de pompage de l'eau, d'autre part en mer, par les bateaux [5]. La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du 19eme siècle. Parmi les pionniers on peut citer **Paul La Cour** au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950. **Johannes Juul** (élève de Paul La Cour) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif. La première crise pétrolière en 1973

contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MW en 1981 à 386 MW en 1985 d'énergie cumulée.

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pâles par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, fonctionnant à vitesse fixe et directement reliée au réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion d'électronique entre la génératrice et le réseau, et d'autre part vers l'utilisation de génératrices spéciales tournant à basse vitesse afin de s'affranchir du réducteur de vitesse [6].

### I.2.1 Production éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (figure 1.1).

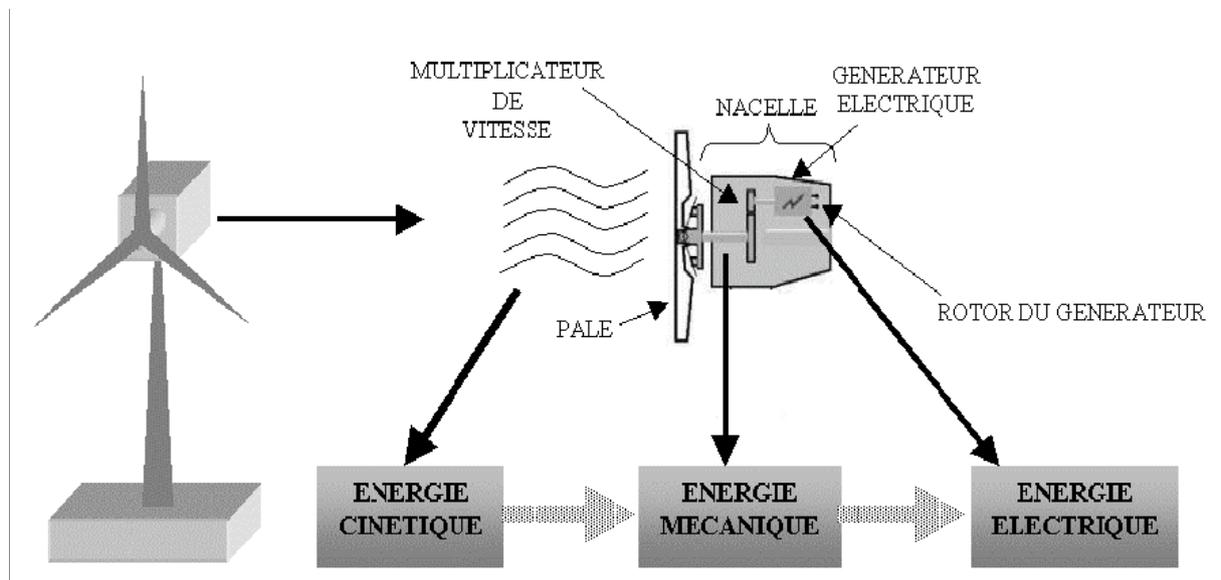


Figure 1.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent [3]

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, Géographiquement diffuse, 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). 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 pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs Mégawatts) dans des zones géographiquement d'engagées pour éviter les phénomènes de turbulences [3].

### I.2.2 Eolien en Algérie

L'évaluation globale du gisement éolien dans notre pays se fait en première phase à partir des données des stations météorologiques classiques, les vents sont mesurés à un ou deux mètres du sol. Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production de la vitesse du vent des atlas et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie [18]. Ceci a permis l'identification de huit zones ventées susceptibles de recevoir des installations éoliennes :

- deux zones sur le littoral ;
- trois zones sur les hauts plateaux ;
- quatre zones en sites sahariens.

La réalisation de la première ferme éolienne en Algérie, d'une puissance de 10 MW À Adrar (sud-ouest), a été confiée jeudi 21/01/2010 au groupe français VERGNET. Ce dernier a été retenu par la Compagnie de l'engineering de l'électricité et du gaz (CEEG), filiale du groupe SONELGAZ.

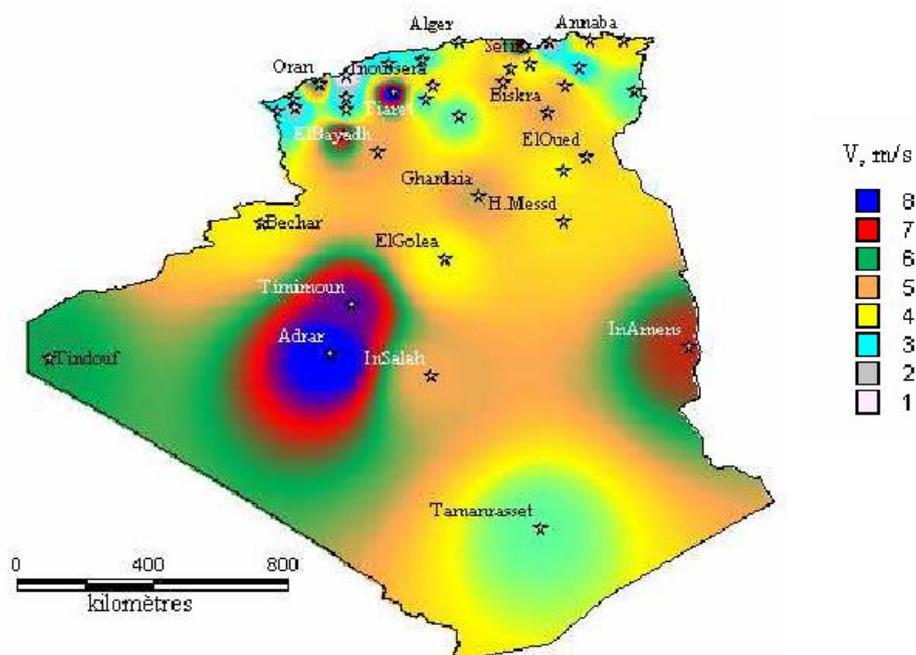


Figure1-2 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

### I.2.3 L'éolien dans le monde

Avec une capacité mondiale installée de 432.4 GW, l'éolien maintient sa place dans le Mix énergétique à long terme

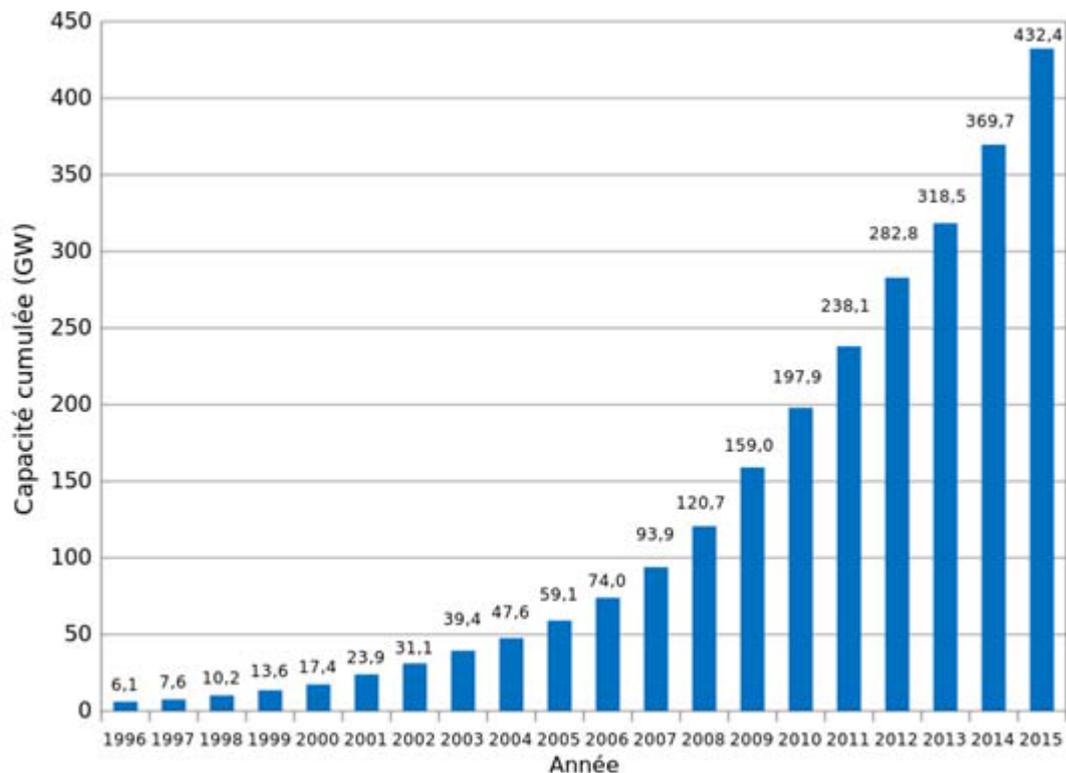


Figure 1.4 : capacité éolienne cumulée dans le monde

### I.3 Quelques notions sur le vent

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette énergie est renouvelable, non dégradée et non polluante. La vitesse du vent varie selon les zones géographiques et les saisons, elle est surtout élevée pendant la période d'hiver et au niveau des mers (offshore). Le vent est défini par sa direction et sa vitesse.

#### I.3.1 Direction et vitesse du vent :

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des

aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques-unes au tableau 1.1 [3].

Degrés Beaufort	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse du vent (km/h)	Description générale	Pression sur surface plane (daN/m <sup>2</sup> )
0	0 à 0.4	< 1	Calme	
3	3.5 à 5.5	12 à 19	Petite brise	3.2 (5 m/s)
4	5.5 à 8	20 à 28	Jolie brise	6.4 (7 m/s)
6	11.4 à 13.9	39 à 49	Vent frais	22 (13 m/s)
8	17.4 à 20.4	62 à 74	Coup de vent	52 (20 m/s)
11	28.4 à 32.5	103 à 117	Violente tempête	117 (30 m/s)
17	54.1 à 60	202 à 220	Cyclone	470 (60 m/s)

**Tableau 1.1 : échelle Beaufort**

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le Premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s. [3]

### I.3.2 Principaux composants d'une éolienne

Une centrale éolienne classique est composée essentiellement des parties suivantes Figure (1.5)

**Le mat** : qui supporte la nacelle et le rotor de la turbine. Il est important que le mat

Soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent en hauteur. A titre d'exemple Le mat d'une éolienne de 500 kW a une hauteur de 40 à 60m, il peut être plein ou Tubulaire. Ce dernier est plus coûteux mais il a l'avantage de permettre un accès aisé à La nacelle pour la maintenance

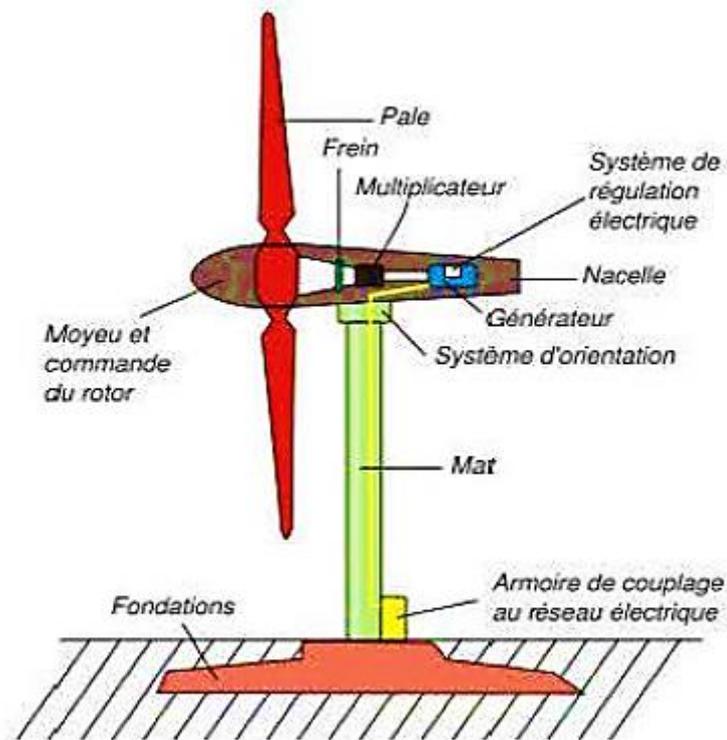


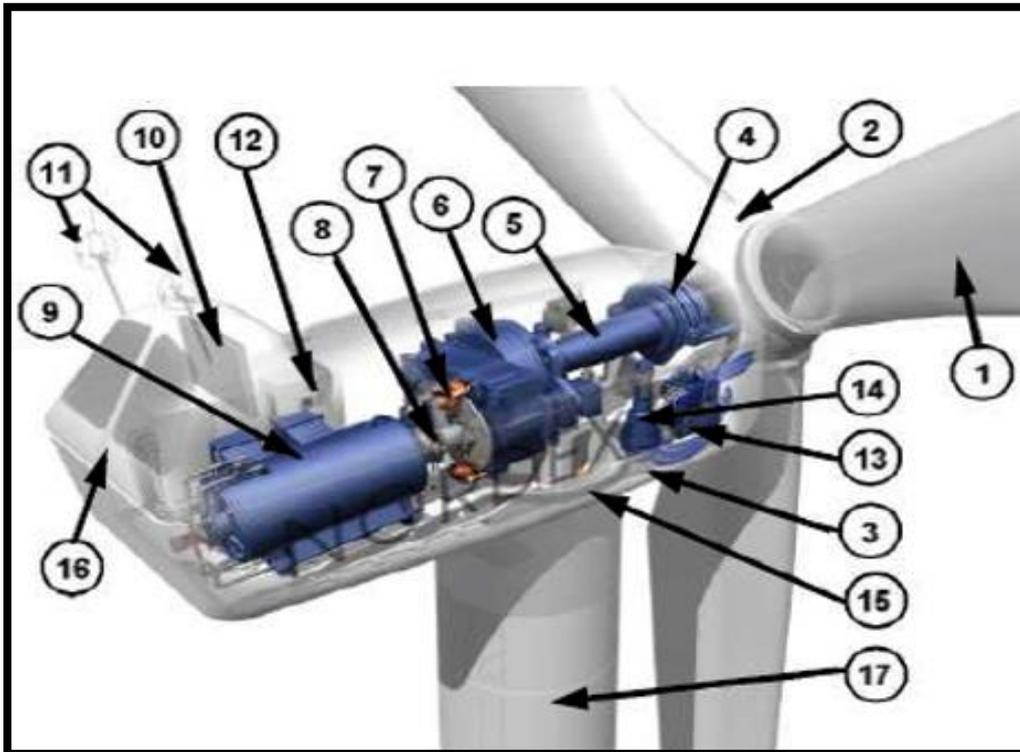
Figure 1.5 : Constitution d'une centrale éolienne

**Les pales** : qui permettent de capter la puissance du vent et la transférer au rotor. Le nombre de pales peut varier suivant les éoliennes. Actuellement, le système tripale est le plus utilisé car il permet de limiter les vibrations, le bruit et la fatigue du rotor par rapport à un système bipale ou monopale et d'améliorer le coefficient de 10% en passant d'une pale à deux et de 3% en passant de deux à trois. Enfin, un bon compromis entre le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien plus des aspects Esthétiques du système tripale par rapport au système bipale constituent des atouts supplémentaires

**La fondation** : une fondation solide assurant la résistance de l'ensemble par grands vents et dans des conditions de givrage.

**La nacelle** : qui regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres, multiplicateur, roulement, le frein à disque 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 de la nacelle (nécessaire Pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du Vent). A cela vient s'ajouter le système électronique de gestion de l'éolienne comme La montre la Figure (1.6)



**Figure 1.6 : Différentes parties d'une éolienne Nordex N60 (1300 kW).**

- 1 : Pales** en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrocha aérodynamique).
- 2 : Moyeu** du rotor en fonte.
- 3 : Structure de la turbine** en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
- 4 : Paliers** du rotor à double rangée de billes.
- 5 : Arbre lent** du rotor en acier haute résistance.
- 6 : Multiplicateur** de vitesse à 3 étages (1 train épicycloïdal et 2 trains parallèles).
- 7 : Frein à disque** sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
- 8 : Accouplement** avec la génératrice de type flexible.
- 9 : Génératrice** (800/2000 kW) asynchrone refroidie à l'eau.
- 10 : Radiateur de refroidissement** intégré au système multiplicateur-génératrice.
- 11 : Système de mesure de vent** (anémomètre et girouette).
- 12 : Système de contrôle** surveille et pilote la turbine.

**13 : Système hydraulique** pour les freins d'extrémité de la pale et le système d'orientation.

**14 : Entraînement d'orientation** de la tourelle à deux trains d'engrenages.

**15 : Paliers du système d'orientation** équipés d'un frein à disque.

**16 : Capot de la nacelle** en structure acier recouvert de composite fibre de verre.

**17 : Tour** en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

## I.4 Généralités sur les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical qui tendent à disparaître, les éoliennes lentes à axe horizontal utilisées surtout pour le pompage et les éoliennes rapides à axe horizontal plus particulièrement utilisées dans la production d'énergie électrique.

### I.4.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. 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 (du nom de son inventeur, breveté en 1925) Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est basé sur le principe de "Trainée différentielle", les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (Figure 1.7). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

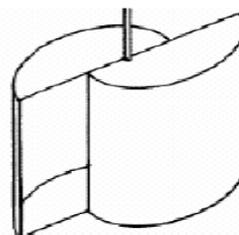


Figure 1.7 : éolienne de Savonius

- Le rotor de Darrieux (ingénieur français, breveté au début des années 30) Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air Selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La Combinaison de ces forces génère alors un couple moteur. En fait, les différents angles Auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de Déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent, ce Principe s'appelle la variation cyclique d'incidence.

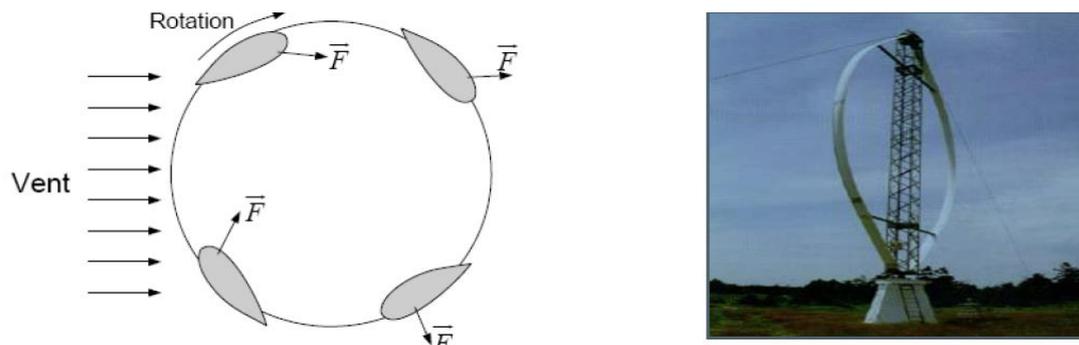


Figure 1.8 : éolienne de Darrieux [11]

### Les avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical

Les avantages et les inconvénients différents d'une éolienne à une autre :

#### ➤ Avantages des éoliennes à axe vertical

- Les organes de commande et le générateur sont au niveau du sol donc facilement Accessibles.
- L'éolien reçoit le vent de n'importe quelle direction.
- Conception simple des pales et prix de fabrication réduit [12].

#### ➤ Inconvénients des éoliennes à axe vertical

- Difficulté de contrôle des pales dans la survitesse ;
- La présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient De vent ce qui réduit son efficacité
- La surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances Elevées [12].

### I.4.2 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais

pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilise pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le cout et la vitesse de rotation du capteur éolien [3], [4].

La caractéristique de puissance  $C_p(\lambda)$  dépend principalement du nombre de pales et des propriétés aérodynamiques de la voilure [2].



**Figure 1.9 : Éoliennes à axes horizontales [11]**

#### **Les avantages et inconvénients des éoliennes `a axe horizontal :**

##### **➤ Avantages des éoliennes à axe horizontal**

- Un rendement plus élève ;
- Un coût moins important ;
- La position du récepteur `a plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie l'efficacité.

##### **➤ Inconvénients des ´éoliennes à axe horizontal**

- Conception plus complexe à exiger en raison du besoin de commande des pales ;
- Le générateur et multiplicateur de vitesse devraient être montés sur une tour, de ce fait l'entretien devient vulnérable [12].

#### **I .4.2.1 Eoliennes lentes**

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multiples sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que

les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau. La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [1] :

$$P = 0.15 \cdot D^2 \cdot V^3$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.

#### I.4.2.2 Eoliennes rapides

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible. Le tableau (1.2) propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

<b>Echelle</b>	<b>Diamètre de l'hélice</b>	<b>Puissance délivrée</b>
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1MW

**Tableau 1.2 : classification des turbines éoliennes [1]**

En effet, les éoliennes ont différentes dimensions, et puisque l'air est une ressource diffuse, la tendance générale favorise les appareils de plus en plus gros. Les progrès en science des matériaux ont permis la fabrication de pales plus légères et plus solides ainsi que l'amélioration de la conception des tours et des fondations, ce qui permet la construction d'appareils de plus en plus imposants. En 1995, les éoliennes de 500 kW étaient la dernière nouveauté. Aujourd'hui, des appareils individuels de 4,5 MW (4 500 kW) sont en production commerciale [7].

Dans ce qui suit, notre étude se portera spécialement sur les éoliennes rapides dont nous essayerons de donner une description globale du modèle. Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen :

$$P=0,2*D^2*V^3$$

### I.4.3 Type de Fonctionnement

Il existe deux types de fonctionnement d'éolienne.

#### I.4.3.1 Les éoliennes à vitesse fixe.

Elles sont des éoliennes simples, elles ne nécessitent pas de dispositif électronique de Puissance. Généralement ce sont des machines asynchrones à cage d'écurieil car la Connexion au réseau est plus facile grâce à la variation du glissement entre la vitesse de Rotation du rotor et le flux du stator. Afin de faire fonctionner la machine Asynchrone à la vitesse de synchronisme, on utilise un système d'orientation des pales (angle de calage par exemple). Ces éoliennes sont de ce fait moins chères mais leur rendement est Moins bon [3]

#### I.4.3.2 Les éoliennes à vitesse variable (type MADA ou PMSG).

Elles peuvent fonctionner sur une plus large plage de vitesse de vent. On peut ainsi tirer le Maximum de puissance possible pour chaque vitesse de vent (voir Figure 1.12).

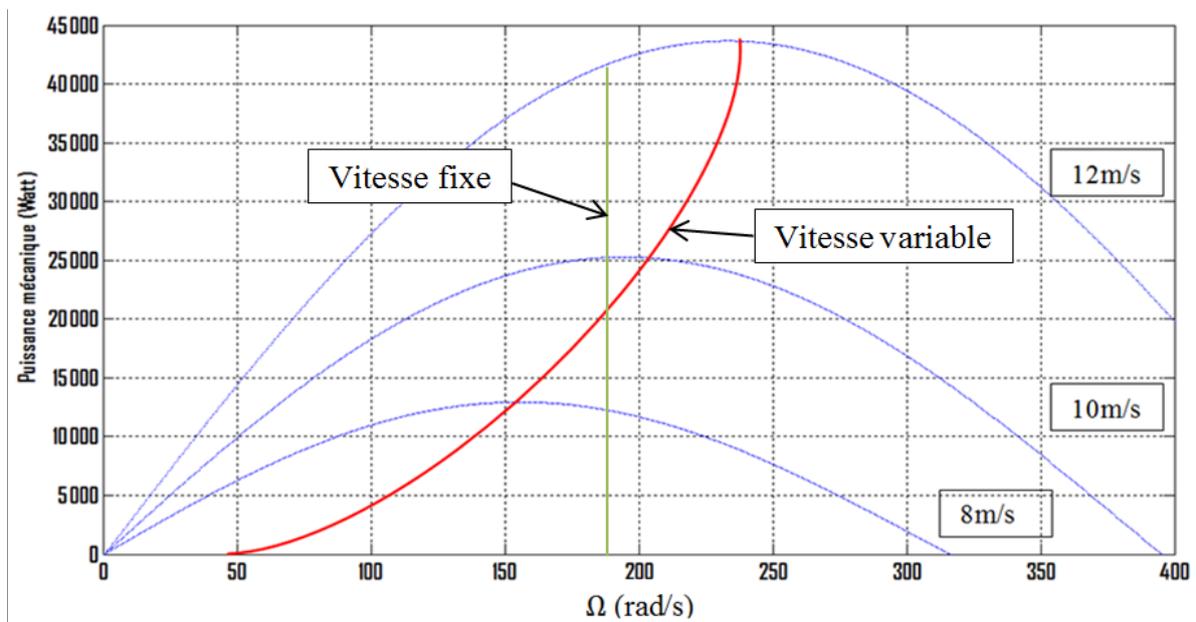


Figure 1.12 : Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur et de la vitesse du vent

Sur ce schéma, on a tracé deux traits. Le premier trait est le trait vertical vert. Ce trait correspond à la puissance que peut fournir une éolienne à vitesse fixe. Pour une vitesse de Vent de 12m/s elle fournira 42MW au réseau. Pour une vitesse de vent de 8m/s elle fournira Une puissance de 12MW au réseau. Le deuxième trait est le trait rouge passant par tous les Sommets des courbes de puissance. Ce trait correspond à la puissance que peut fournir La même éolienne mais fonctionnant à vitesse variable. Pour une vitesse de vent de 14m/s elle Fournira 44MW au réseau. Pour une vitesse de vent de 8m/s elle fournira une puissance de 13MW au réseau. On constate donc qu'une éolienne fonctionnant à vitesse variable fournit Une plus grande puissance au réseau. Ce type d'éolienne nous permet un contrôle du transfert De puissances envoyées sur le réseau. L'inconvénient est que l'on utilise un système MPPT et Des commandes complexes à base d'électronique de puissance pour réguler les variations de vitesse de vent et ce type de méthode a un coût. Ces éoliennes sont donc plus chères mais Présentent un rendement nettement meilleur.

## I.5 Extraction de l'énergie apportée par le vent

### I.5.1 Energie cinétique d'une colonne d'air - Puissance théoriquement disponible

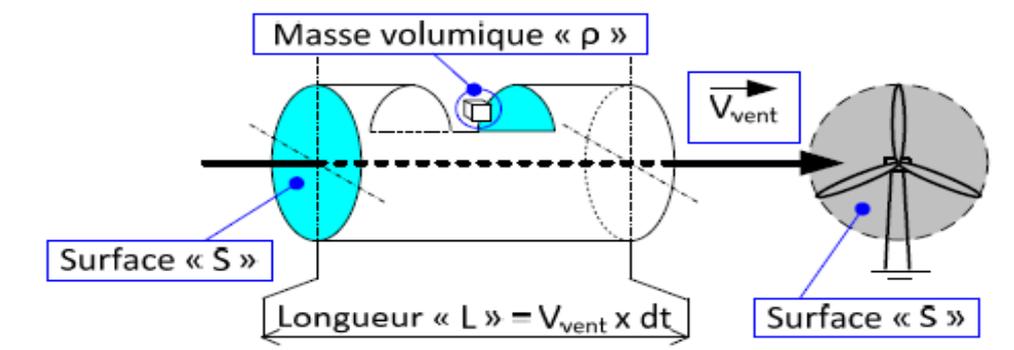


Figure 1.14 : Représentation d'une colonne d'air

Nous considérons une colonne d'air de section  $S$ , de longueur  $L$  contenant une quantité d'air de masse volumique  $\rho$  animée d'une vitesse constante  $V_{vent}$  telle que représentée sur la Figure 1.14. La masse de cette colonne d'air,  $m_{colonne}$  s'exprime ainsi :

$$m_{colonne} = S \cdot L \cdot \rho \quad (1.1)$$

L'énergie cinétique  $E_{cin-col}$  de cette colonne d'air en mouvement s'exprime de la façon

Suivante :

$$E_{cin-col} = \frac{1}{2} m_{colonne} \cdot V_{vent}^2 = \frac{1}{2} S \cdot L \cdot \rho \cdot V_{vent}^2 \quad (1.2)$$

Cette colonne d'air est aussi la représentation de la quantité d'air traversant la surface  $S$  pendant une durée  $dt$ , la longueur  $L$  étant directement issue de cette durée. La puissance  $P_{colonne}$  étant la dérivée de l'énergie  $E_{cin-col}$  pendant une quantité de temps donnée, nous pouvons écrire :

$$\begin{aligned} P_{cin-col} &= \frac{d}{dx} (E_{cin-col}) = \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{2} m_{colonne} \cdot V_{vent}^2 \right) = \frac{d}{dx} \left( \frac{1}{2} S \cdot L \cdot \rho \cdot V_{vent}^2 \right) \quad (1.3) \\ &= \frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot V_{vent}^2 \cdot \frac{d}{dx} L \quad \Longrightarrow \quad \text{avec} \quad \frac{d}{dx} L = V_{vent} \end{aligned}$$

Finalement nous en déduisons une expression simple de la puissance  $P_{colonne}$  :

$$P_{colonne} = \frac{1}{2} \cdot S \cdot \rho \cdot V_{vent}^3 \quad (1.4)$$

### I.5.2 Puissance de vent recuperable – Limite de Betz

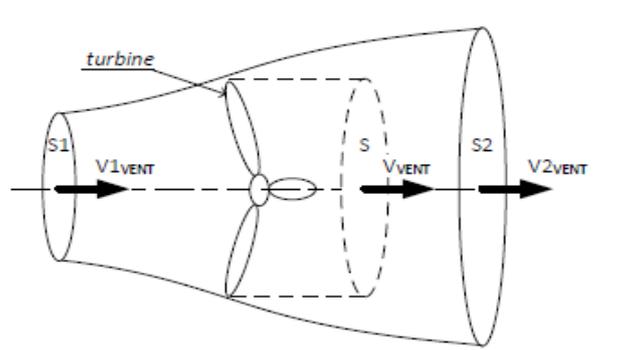


Figure 1.15 : Tube de courant sur la turbine d'un aérogénérateur [19]

Une éolienne ne peut extraire qu'une partie de la puissance d'une colonne d'air. En effet, la masse d'air arrivant sur l'éolienne perd de sa vitesse transmettant une partie de son énergie cinétique à la turbine, mais continue sa progression en aval de celle-ci. Il existe donc un coefficient entre la puissance de la colonne d'air  $P_{colonne}$  et l'énergie récupérable au niveau de la turbine  $P_{turb}$ . Ce coefficient est couramment désigné sous l'appellation  $C_p$ . L'expression de  $C_p$  est la suivante :

$$C_p = \frac{P_{turb}}{P_{colonne}} = \frac{P_{turb}}{\frac{1}{2} S \cdot \rho \cdot V_{vent}^3} \quad (1.5)$$

Prenons le cas d'un tube de courant s'appuyant sur une turbine d'éolienne (Figure 1.15). Si l'on considère l'air comme un fluide incompressible, le débit volumique de celui-ci

$D_{vair}$  (orienté dans le sens du courant de S1 vers S2) est le même à travers toutes les sections droites de l'écoulement. Nous pouvons donc écrire :

$$D_{vair} = S1.V1_{vent} = S.V_{vent} = S2.V2_{vent} \quad (1.6)$$

Cette égalité implique que  $S2 > S1$  puisque  $V2_{vent} < V1_{vent}$ . La récupération d'énergie par l'éolienne nécessite l'exercice d'une force de la turbine sur l'air en mouvement. D'après le théorème d'Euler, l'expression de cette force  $F_{TURB}$  est :

$$F_{turb} = S \rho . V_{vent} . (V1_{vent} - V2_{vent}) \quad (1.7)$$

La puissance mécanique  $P_{turb}$  récupérable par la turbine dans ces conditions est :

$$P_{turb} = F_{turb} . V_{vent} = S \rho . V_{vent}^2 . (V1_{vent} - V2_{vent}) \quad (1.8)$$

La variation de l'énergie cinétique entre la surface S1 et S2, permet aussi d'exprimer cette puissance mécanique  $P_{turb}$  comme étant la moitié du produit de la masse d'air (qui traverse l'éolienne par seconde) et de la diminution de la vitesse du vent [3] :

$$P_{turb} = \frac{1}{2} S \rho . V_{vent} . (V1_{vent}^2 - V2_{vent}^2) \quad (1.9)$$

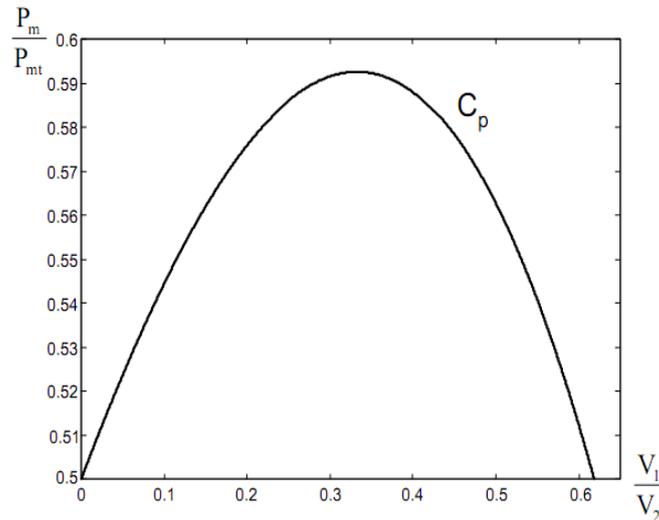
L'égalité entre les équations (1.8) et (1.9) permet d'obtenir la vitesse du vent au niveau de la turbine :

$$V_{vent} = \frac{V1_{vent} + V2_{vent}}{2} \quad (1.10)$$

En tenant compte de cette relation, nous pouvons réécrire l'équation (1.5) en exprimant  $C_p$  en fonction du rapport  $x = \frac{V2_{vent}}{V1_{vent}}$

$$C_p = \frac{P_{turb}}{P_{colonne}} = \frac{\frac{1}{2} S \rho . V_{vent} . (V1_{vent}^2 - V2_{vent}^2)}{\frac{1}{2} . S . \rho . V_{vent}^3} = \frac{1}{2} (1 - x^2)(1 + x) \quad (1.11)$$

La Figure 1.16 représente le tracé de la fonction  $C_p=f(x)$ . On constate que cette fonction atteint une valeur maximale pour  $x = 1/3$ . Cette valeur maximale est  $C_{p\_max} = 16/27 = 0,593$ , c'est la limite de Betz. Cette limite ne peut jamais être atteinte dans la pratique, car elle a été obtenue en tenant compte d'hypothèses idéales pour l'air.



**Figure 1.16 : Equation  $C_p = f(x)$  [3]**

Afin de pouvoir permettre une utilisation pratique du coefficient de puissance  $C_p$ , nous introduisons la variable  $\lambda$  appelée vitesse relative et définie par la relation suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turb} \cdot R}{V_{vent}} \quad (1.12)$$

Avec :

$\Omega_{turb}$  ; Vitesse de rotation de la turbine - arbre lent (mesurable au tachymètre)

$R$  ; Rayon de la turbine (connu)

$V_{vent}$  ; Vitesse du vent libre (mesurable par un anémomètre)

Pour chaque type d'éolienne, il existe une courbe  $C_p = f(\lambda)$  exprimant la relation entre  $C_p$  et les paramètres  $R$ ,  $\Omega_{turb}$  et  $V_{vent}$  telle que nous le montre la Figure 1.17. Pour chacune des courbes présentées, le coefficient de puissance atteint une valeur maximale ( $C_{p\_max}$ ) pour une valeur de  $\lambda$  dite optimale ( $\lambda_{opt}$ ). Une éolienne tripale classique présente par Exemple  $C_{p\_max} = 0,48$  pour une valeur  $\lambda_{opt} = 7$

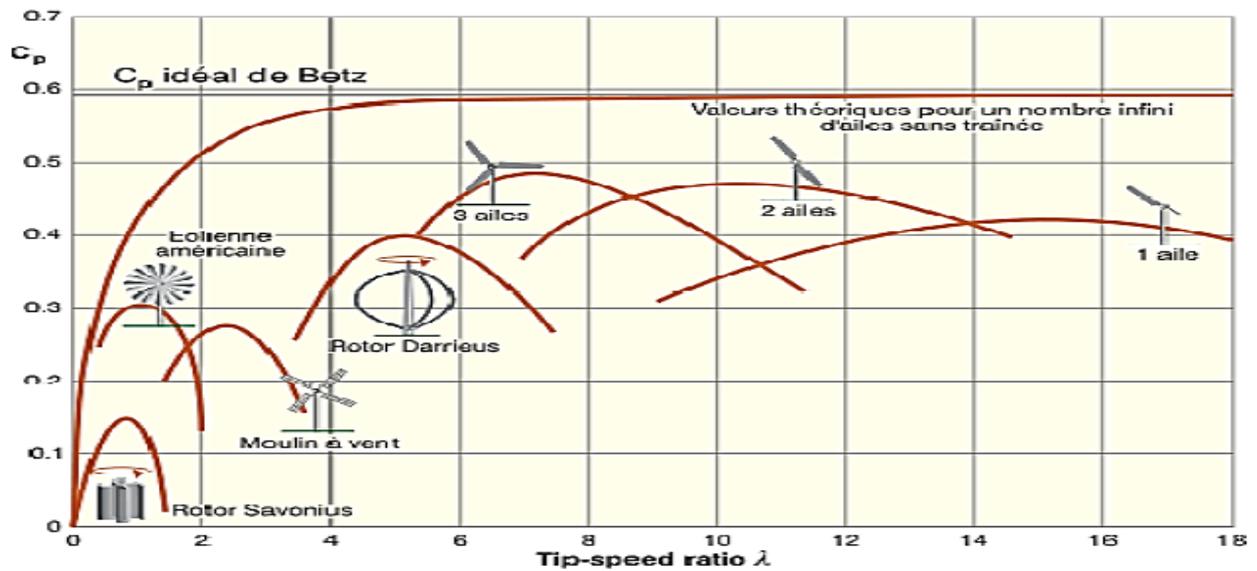


Figure 1.17 :  $C_p=f(\lambda)$  pour plusieurs types d'éolienne [21]

### I.5.3 Régulation de puissance

Dans la partie précédente, nous avons fait état d'une courbe  $C_p=f(\lambda)$  propre à chaque type d'éolienne. Pour permettre de faire varier  $C_p$ , agir sur la variable  $\lambda$  (la vitesse relative) n'est pas le seul moyen. En effet, les pales peuvent être pourvues de dispositifs actifs ou passifs afin de pouvoir dégrader le coefficient de puissance  $C_p$ . Il est ainsi possible de réguler la puissance mais aussi d'empêcher l'emballement du rotor pour de fortes vitesses de vent (en complément du frein de sécurité).

#### I.5.3.1 Dispositif actif de calage d'angle des pales (Pitch Control)

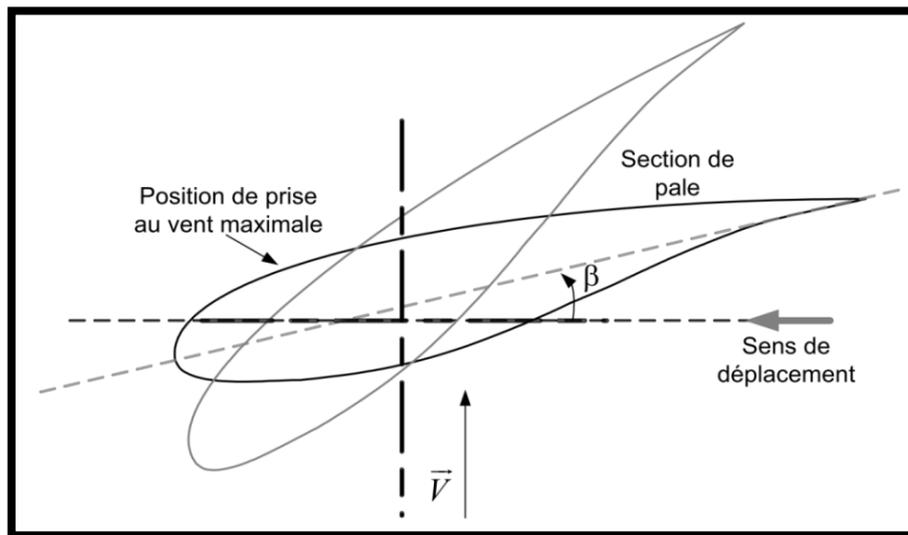


Figure 1.18 : Variation de l'angle de calage d'une pale [3]

Ce dispositif permet de positionner les pales suivant un angle  $\beta$  choisi. Un angle nul correspond à une pale face au vent (Figure 1.18). Généralement, on conserve un calage d'angle minimal pour les vitesses de vent faibles jusqu'à nominales. Au-delà, on peut augmenter l'angle  $\beta$ , ce qui va entraîner la dégradation de  $C_p$ . il est possible de donner une expression approchée de l'équation  $C_p=f(\lambda, \beta)$  pour une éolienne de 1,5 KW :

$$C_p = C_1 \left( \frac{C_2}{\lambda} - C_3\beta - C_4 \right) \exp \left( -\frac{C_5}{\lambda} \right) + C_6\lambda \quad (1.13)$$

La Figure 1.19 donne les allures de  $C_p$  en fonction de  $\lambda$  pour des valeurs de  $\beta$  allant de  $0^\circ$  à  $15^\circ$ . La variation de l'angle de calage des pales permet donc de travailler sur des courbes  $C_p=f(\lambda)$  différentes qui d'ailleurs ne présente pas forcément la même vitesse relative optimale  $\lambda_{opt}$ . On remarque sur cette courbe qu'une inclinaison de  $\beta=0^\circ$  dégrade le coefficient de puissance de la turbine à  $C_p \max=0.50$

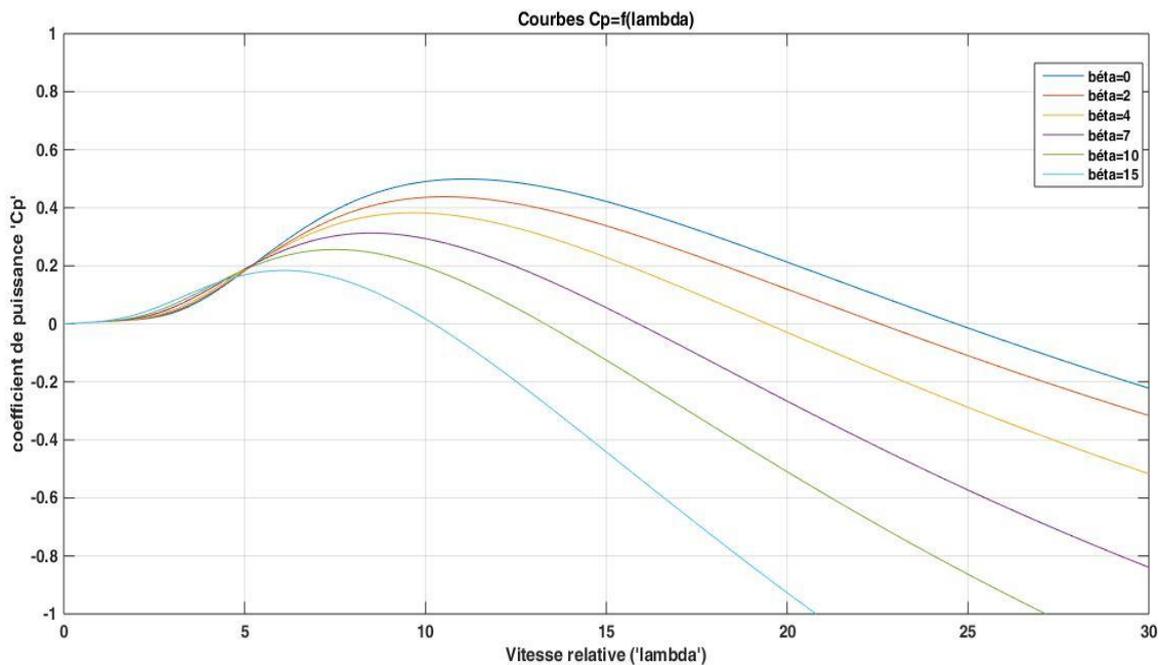


Figure 1.19 :  $C_p=f(\lambda, \beta)$  pour différentes valeurs de  $\beta$

#### I.5.4 Les Avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

##### A. les Avantages

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

- L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas de CO<sub>2</sub>,
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable,
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie de risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs,
- Les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées,
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [16],
- peut être rentable dans les régions éloignées et venteuses (sites isolés),
- peut-être complémentaire des filières traditionnelles [17],
- La période de haute productivité se situe en hiver (vent plus forts), ce qui correspond à la période de l'année où la demande est plus forte.

### **B. Les inconvénients :**

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques inconvénients :

- L'impact visuel. Ça reste néanmoins un thème subjectif [13],
- Le bruit des pales,
- L'impact sur les oiseaux (les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux),
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante [13].

## **I.6 Types des générateurs électriques**

De nombreux types de générateurs électriques sont utilisés dans les aérogénérateurs à vitesse fixe ou variable. Nous évoquerons ici les technologies les plus répandues dans les Éoliennes de grandes puissances : la machine asynchrone à cage, la machine synchrone et la Machine asynchrone double alimentation.

### **I.6.1 Génératrices asynchrones à cage :**

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce qui nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse comme le montre la figure (1.20) [14].

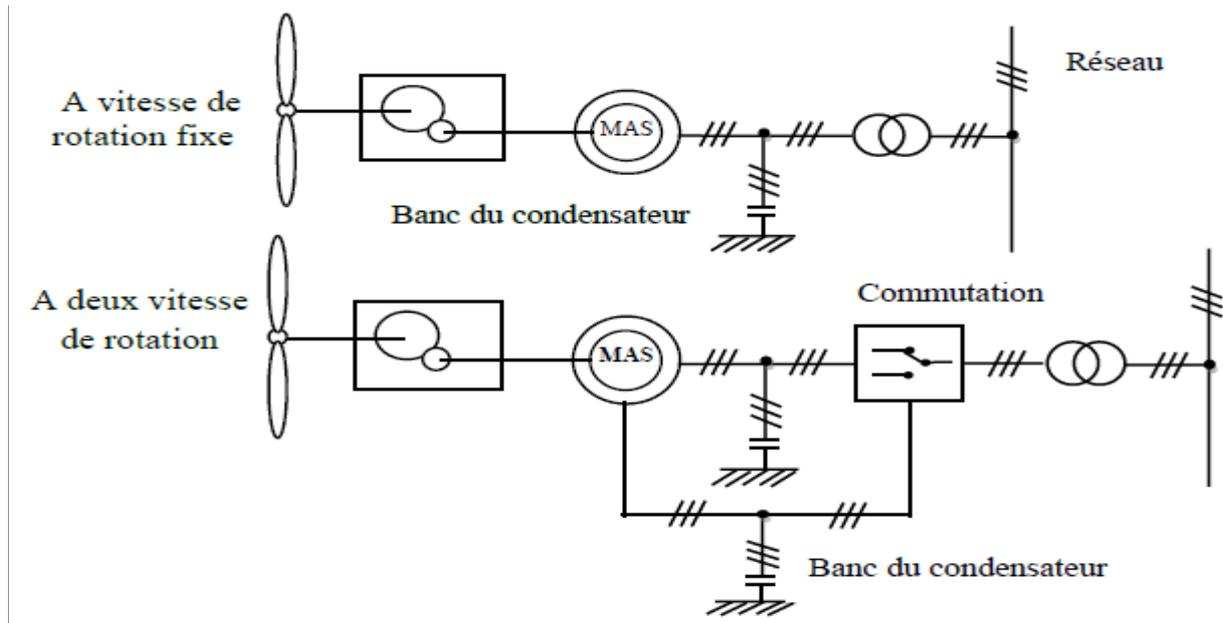


Figure 1.20 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée figure (1.21) [14].

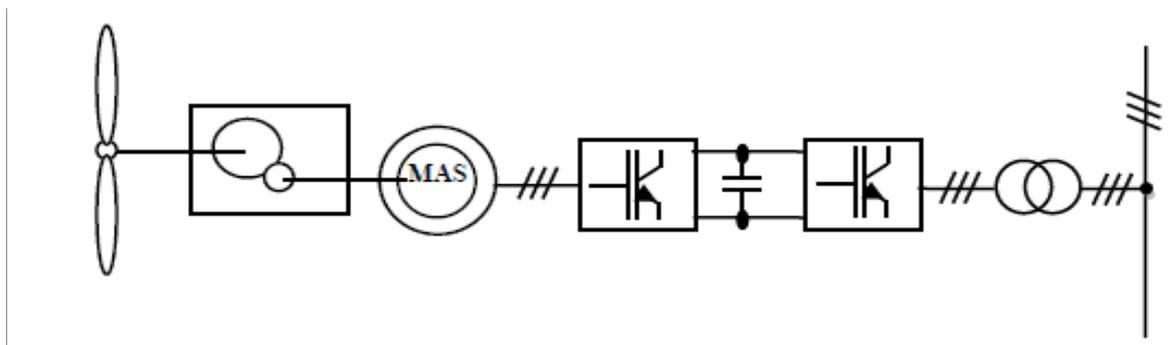


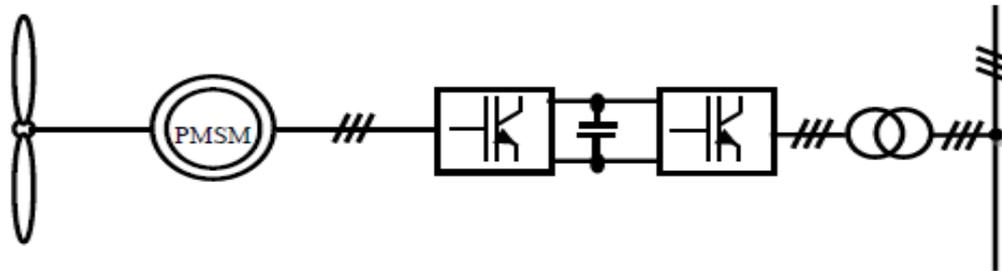
Figure 1.21 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

**I.6.2 Génératrices synchrones :**

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont pas adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie de condensateurs ou d'une source de tension indépendante. Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de

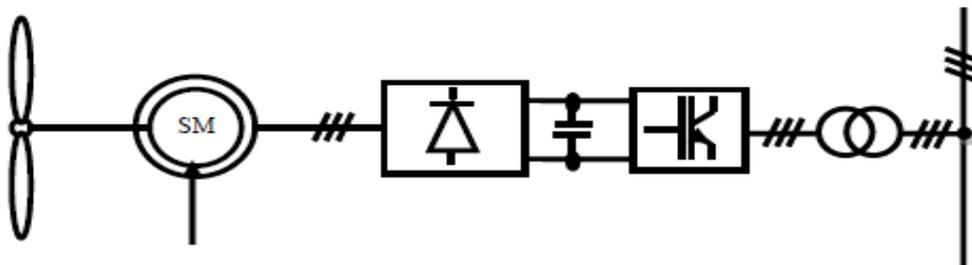
machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables.

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation, figure (1.22) [2].



**Figure 1.22 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents**

Une autre solution (figure 1.23) est le redressement à diodes placé directement derrière la génératrice. L'optimisation de la gestion énergétique n'est alors possible que si l'excitation est réglable [2].



**Figure 1.23 : Système éolien basé sur la machine synchrone**

### I.6.3 Machine asynchrone à double alimentation

#### I.6.3.1 Présentation de la machine asynchrone à double alimentation

La première apparition de cette machine date de l'année 1899 ; il ne s'agit pas d'une nouvelle structure mais d'un nouveau mode d'alimentation [44]

Pour être classé comme machine à double alimentation, il faut qu'il y ait des sources actives sur le stator et le rotor à la fois. Dans les systèmes modernes, une de ces sources est dérivée électroniquement, et peut être commandée pour fournir l'opération vitesse variable du

système. L'autre source (réseau) a typiquement une fréquence et une tension nominalement fixées, qui est habituellement un raccordement direct au stator [41].

### I .6.3.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de  $f_{mms}$  des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse Angulaire  $\omega_s = 2. \pi. f_s$  et le rotor tourne avec la vitesse  $\omega_r$ , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des  $f_{mms}$  des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse  $\omega_{gl}$  telle que [44] :

$$\omega_{gl} = \omega_s - \omega_r = P. \Omega \quad (1.14)$$

Où : g est le glissement et  $\omega_{gl}$  est la vitesse angulaire de glissement.

Pour  $\omega_r = \omega_s$  le rotor est à l'arrêt. Dès que  $\omega_r$  est légèrement différents de  $\omega_s$ , la machine se met en rotation dans un sens ou dans l'autre selon que  $\omega_r$  soit < ou > à  $\omega_s$ . Par contre, si  $\omega_r$  est très différents de  $\omega_s$  la machine ne peut pas démarrer [42].

Pour que la rotation du vecteur résultant des  $f_{mms}$  par rapport au rotor se réalise, le courant dans l'enroulement rotorique doit avoir une fréquence  $f_r$  [2], définie à partir de  $\omega_{gl} = 2. \pi. f_r$  ; c'est-à-dire :

$$f_r = g. f_s \quad (1.15)$$

### I .6.3.3. Classification des machines à double alimentation

Dans la littérature du domaine des machines asynchrone à double alimentation, on trouvera la classification suivante [22], [44], [45], [46], [47] :

#### I .6.3.3.1. Machine à double alimentation simple

La machine à double alimentation simple (MADA), est une machine asynchrone à rotor bobiné occupée par un système balais-bague (Single Doubly Fed Induction Machine). La figure 1.24 illustre le schéma de principe de cette dernière [44], [45], [46], [47]

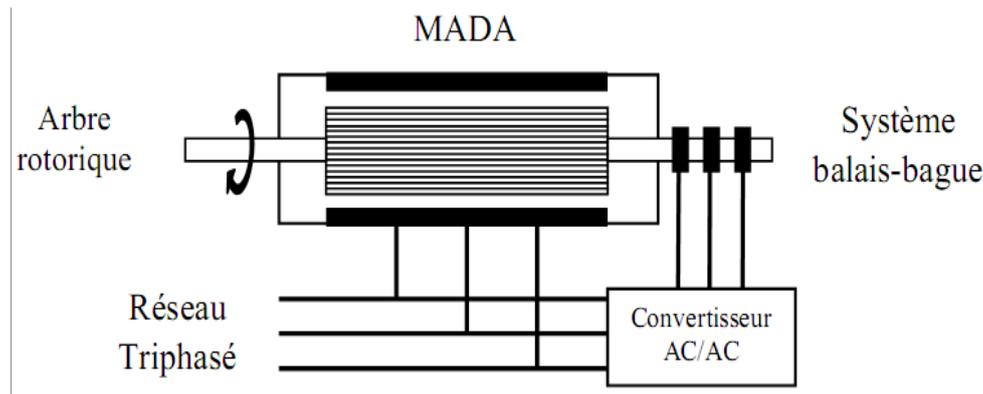


Figure 1.24 : Schéma de principe de la machine à double alimentation simple.

#### I.6.3.3.2. Machine à double alimentation en cascade

Cette machine est constituée de deux MADA dont les rotors sont couplés électriquement et mécaniquement, (Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La figure 1.25 présente le schéma de principe de deux machines asynchrones à rotor bobiné permettant d'obtenir un système à double alimentation.

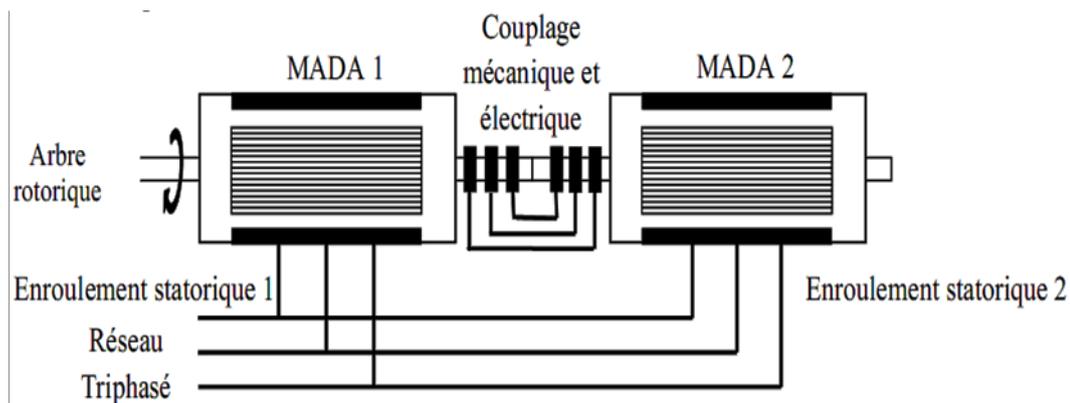
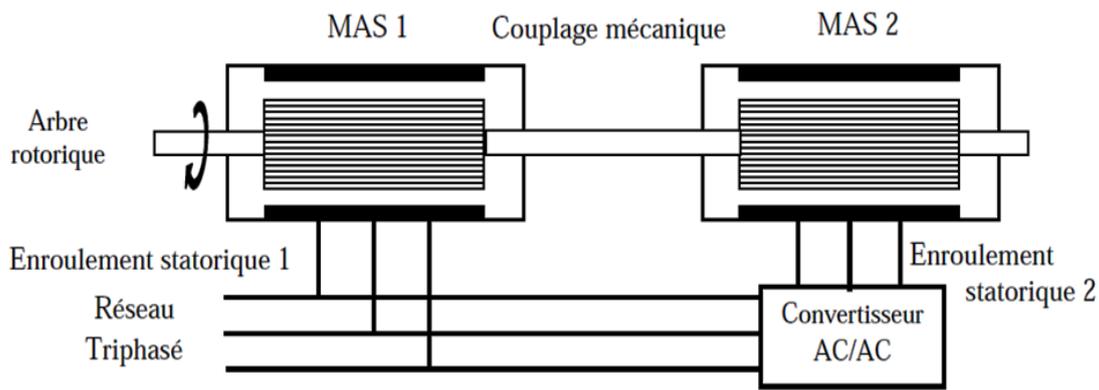


Figure 1.25 : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade.

#### I.6.3.3.3 Machine à double alimentation cascade à un repère

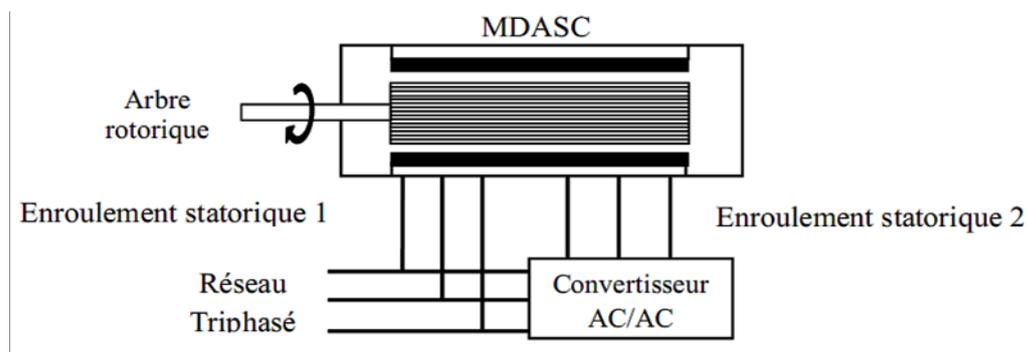
La machine à double alimentation en cascade à un repère consiste de deux machines asynchrones à cage connectés mécaniquement, (Single Frame Cascaded Doubly Fed Induction Machine). La figure 1.26 présente le schéma de principe, tel que le stator de l'une des deux machines est connecté directement au réseau alors que l'autre est connecté à celui-ci par l'intermédiaire d'un convertisseur alternatif-alternatif [48].



**Figure 1.26 : Schéma de principe de la machine à double alimentation en cascade à un repère.**

#### I.6.3.3.4 Machine à double alimentation sans collecteur

Cette machine est constituée par deux enroulements prolongés dans un seul stator. L'un des deux enroulements est alimenté directement par le réseau et l'autre par un convertisseur AC/AC, figure 1.27 Ce type de machine consiste de deux enroulements statoriques ayant des nombres de paires de pôles différents ; ainsi que celui du rotor doit être la somme de ces deux nombres de paires de pôles [48].

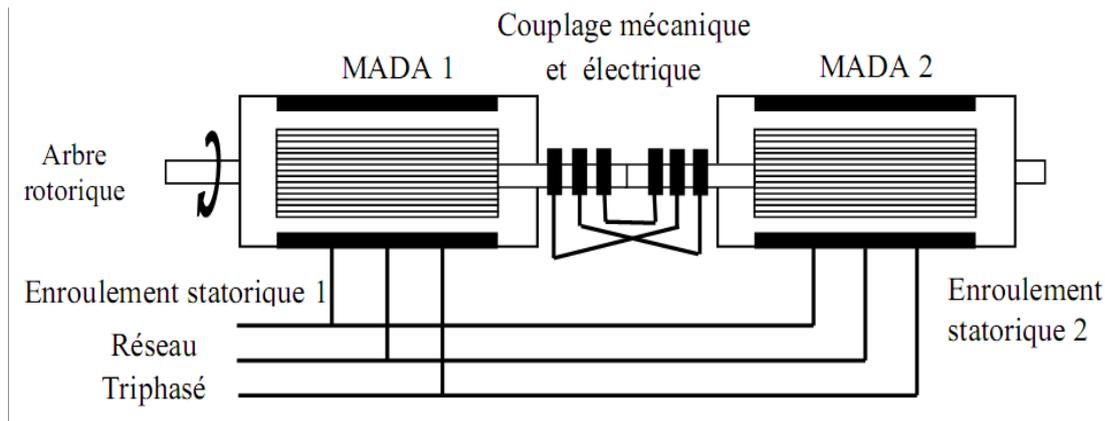


**Figure 1.27 : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans collecteur.**

#### I.6.3.3.5 Machine à double alimentation sans balai

Le schéma de montage de la machine à double alimentation sans balais (BDFIM) est montré dans la figure 1.28 où deux machines à rotor bobiné ont été calées sur le même axe.

Les enroulements statoriques des deux machines sont reliés au réseau, alors que les enroulements rotoriques sont interconnectés entre eux et par conséquent les bagues sont de facto éliminées. La puissance de glissement de la première machine est donc employée pour exciter la deuxième machine. Ce concept élégant a longtemps été dans les perspectives des concepteurs comme solution efficace pour les applications des grandes puissances [49].



**Figure 1.28 : Schéma de principe de la machine à double alimentation sans balai.**

#### I.6.3.4 Modes de fonctionnement de la MADA

Seul le mode de fonctionnement avec le stator directement connecté au réseau et rotor alimenté par un onduleur nous concerne dans cette étude.

La machine asynchrone classique fonctionne en moteur en dessous de la vitesse de synchronisme et ne peut fonctionner en génératrice qu'au-dessus de celle-ci. Par contre, la MADA offre la possibilité de fonctionner dans les quatre quadrants, figure 1.29. C'est-à-dire que ce n'est plus la vitesse de rotation qui définit le mode de fonctionnement en moteur ou en générateur [32].

##### - Fonctionnement en mode générateur hypo-synchrone [32] :

La figure 1.29.a montré que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est réabsorbée par le rotor. Nous avons dans ce cas un fonctionnement en mode générateur en dessous de la vitesse de synchronisme.

##### -Fonctionnement en mode générateur hyper-synchrone [32] :

La figure 1.24.b montre que la puissance est fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a ainsi un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme.

##### - Fonctionnement en mode moteur hypo-synchrone [32] :

Lors du fonctionnement de la MADA en moteur, la puissance  $sP$  est fournie par le réseau au stator. Durant le mode hypo-synchrone, où la vitesse de rotation est inférieure à celle du synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée vers le réseau figure 1.24.c.

- Fonctionnement en mode moteur hyper-synchrone [32] :

Pendant le mode hyper-synchrone, le réseau fournit la puissance au stator et au rotor de la MADA. Une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique figure 1.29.d.

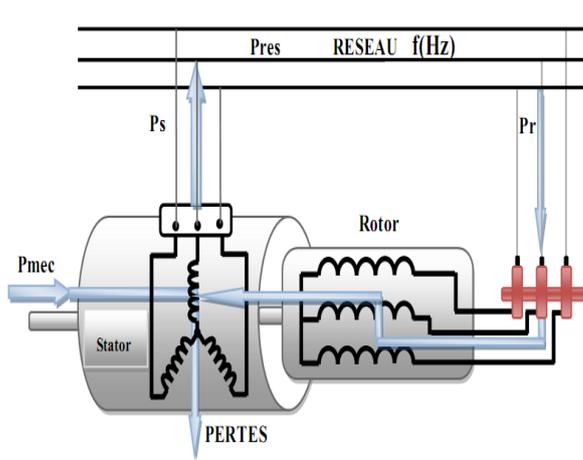


Figure 1.29.a : Fonctionnement génératrice hypo-synchrone.

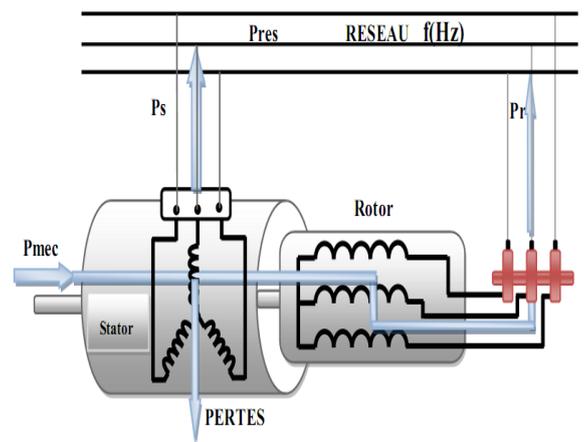


Figure 1.29.b : Fonctionnement génératrice hyper-synchrone.

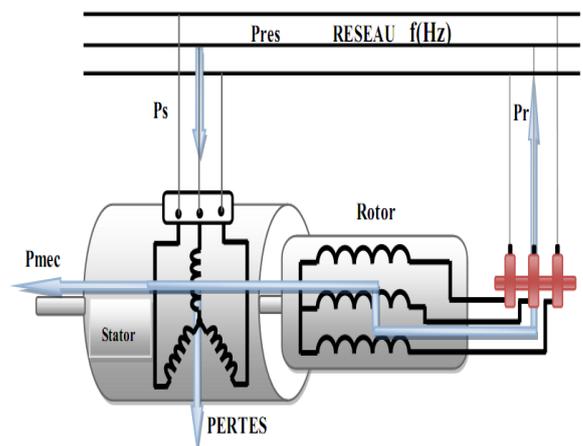


Figure 1.29.c : Fonctionnement moteur hypo-synchrone.

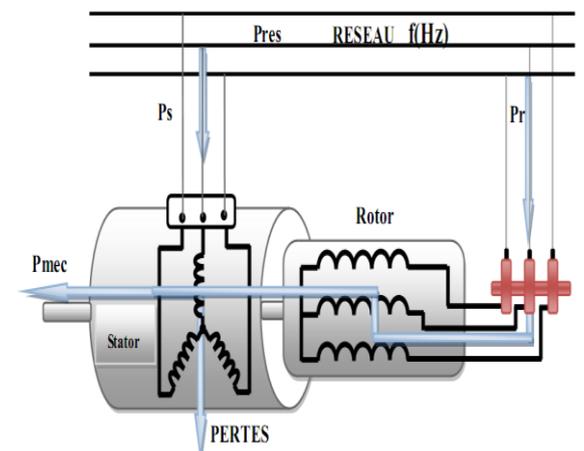


Figure 1.29.d : Fonctionnement moteur hyper-synchrone.

Figure 1.29 : Modes de fonctionnement de la MADA.

### I.6.3.5 Les avantages et les inconvénients de la MADA

Nous introduisons succinctement dans ce paragraphe les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation lors de son fonctionnement à vitesse variable.

#### Les avantages de la MADA

La MADA présente plusieurs avantages :

- La mesure des courants au stator et rotor, donnant ainsi une plus grande flexibilité et précision au contrôle du flux et du couple électromagnétique [49].
- La possibilité de fonctionner à couple constant au-delà de la vitesse nominale [45].
- La MADA se comporte comme une machine synchrone et l'on peut pratiquer des rapports de démagnétisation très importants (de l'ordre de 1 à 6) [47].
- Un fonctionnement en régime dégradé plus souple que la machine à simple alimentation, quand un onduleur tombe en panne [49].
- La double alimentation permet de réduire les dimensions des convertisseurs statiques, réduisant ainsi les pertes fer de la machine et augmentant son rendement [39].
- Transfert bidirectionnel de la puissance rotorique [39].
- Le fonctionnement en hypo ou hyper synchronisme offre une large plage de variation de la vitesse [39].
- La MADA réunit les avantages de la machine synchrone et de la machine asynchrone, à savoir [39] :
  - Fonctionnement à vitesse de rotation variable ;
  - Régulation découplée des puissances active et réactive.

#### Inconvénients de la MADA

Contrairement à ses avantages, la MADA présente aussi des inconvénients tels que :

- Elle est plus longue à causes des balais [47].
- Utilisation d'un nombre de convertisseurs statiques plus que celle de la machine classique [39].
- Le coût total de la machine est plus important par rapport aux autres machines électriques [39].

### **I.6.3.6 Domaine d'application de la MADA**

La littérature atteste du grand intérêt accordé aujourd'hui à la machine doublement alimentée pour diverses applications : en tant que génératrice pour les énergies renouvelables (pour divers éoliens) ou en tant que moteur pour certaines applications industrielles comme le laminage, la traction ferroviaire ou encore la propulsion maritime [27] [44], [45].

### **I.7 Conclusion :**

Dans le contexte des énergies renouvelables, la production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement des nouvelles technologies dans le champ des matériaux de construction et de l'électronique de Puissance. Un point très important abordé dans ce chapitre a été la présentation des différentes Structures utilisées pour la conversion électromécanique et les différentes génératrices Utilisées.

Donner les avantages et les inconvénients de chacune de ces structures était dans L'intérêt de trouver une meilleure solution qui convient au critère d'exploiter un maximum de Puissance quel que soit la vitesse du vent. Cette recherche s'est conclue par le choix de la Machine asynchrone à double alimentation qui va être étudiée en détail dans le chapitre Suivant.

**CHAPITRE 2**

**LA COMMANDE**

**VECTORIELLE DIRECTE**

**ET INIDRECTE DE LA**

**MADA**

## II.1 Introduction

La présentation des processus physique par des modèles mathématiques est une étape très importante dans l'asservissement des systèmes. Afin d'élaborer une structure de commande performante, il est important de disposer d'un modèle mathématique représentant fidèlement les dynamiques du processus.

Dans le présent chapitre, Nous donnerons le modèle mathématique de la MADA et de son alimentation. Nous débuterons par la mise en équation de la MADA en exprimant les équations qui régissent son fonctionnement dans le référentiel triphasé que l'on notera (a, b, c). Nous réduirons l'ordre du système par la transformation de Park. et nous aborderons la modélisation de l'onduleur de tension et leur commande MLI de type sinus triangle.

Ensuite Dans cette optique, nous avons proposé une technique de commande dite la commande vectorielle (*field oriented control*) ou la commande par orientation du flux pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau.

## II. 2 Machine Asynchrone à Double Alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone à cage ou synchrone) constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements. L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée, mais constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lors de la rotation de la machine En comparaison avec la machine asynchrone à cage, la MADA permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variable de  $\pm 30\%$  autour de la vitesse de synchronisme. [35]

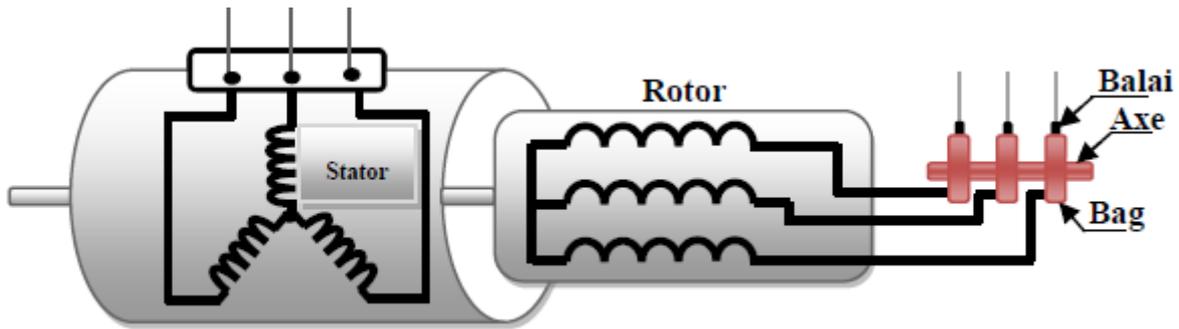


Figure 2.1 Représentation de la machine asynchrone à double alimentation.

## II. 2.1 Modélisation de LA MADA

### II. 2.1.1 Hypothèses simplificatrices

Afin d'établir un modèle simple de la MADA, nous avons pris en considération certaines hypothèses simplificatrices à savoir :

- ✓ La géométrie de la machine est symétrique.
- ✓ Le circuit magnétique n'est pas saturé, ce qui permet d'exprimer les flux comme fonctions linéaires des courants.
- ✓ Les pertes par hystérésis et courant de Foucault sont négligées.
- ✓ Les résistances ne varient pas avec la température et l'effet de peau est négligé.
- ✓ Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer.
- ✓ L'épaisseur de l'entrefer est uniforme.

De ce fait, tous les coefficients des inductances propres sont constants et les coefficients des inductances mutuelles ne dépendent que de la position des enroulements [3]. Après avoir pris en considération

### II. 2.1.2 Modèle de la MADA dans le repère triphasé

La représentation schématique d'une machine triphasée asynchrone à double alimentation dans le repère triphasé est donnée par la figure 2.2 [45].

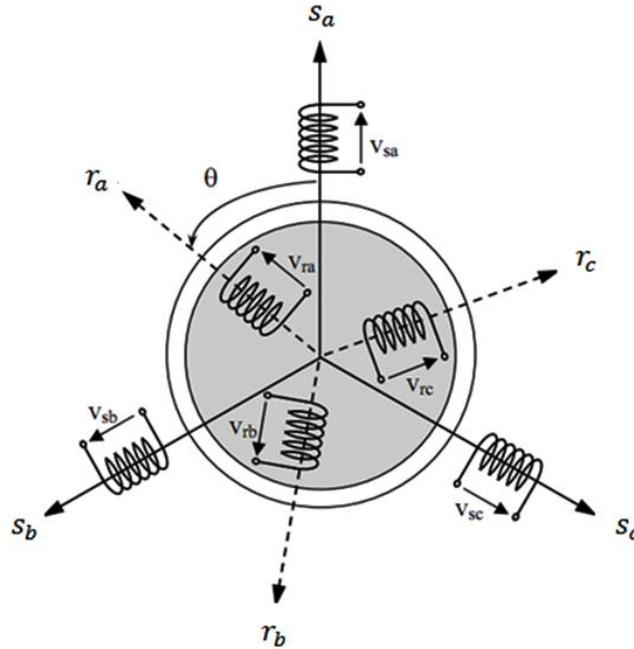


Figure 2.2 : Représentation de la MADA dans le système triphasé.

Les trois enroulements du stator sont représentés schématiquement sur leurs axes magnétiques respectifs  $s_a$ ,  $s_b$  et  $s_c$ , ainsi que les trois enroulements du rotor sur leurs axes magnétiques respectifs  $r_a$ ,  $r_b$  et  $r_c$ .

Avec les hypothèses citées ci-dessus, les équations électriques des phases statoriques et rotoriques qui décrivent le fonctionnement de la machine s'écrivent comme suit :

### II. 2.1.2.1 Equations des tensions

$$\begin{cases} [V_s] = [R_s] \cdot [I_s] + \frac{d}{dt} [\Phi_s] \\ [V_r] = [R_r] \cdot [I_r] + \frac{d}{dt} [\Phi_r] \end{cases} \quad (2.1)$$

Avec :

Grandeurs statoriques :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix}; \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix}; \quad [R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}; \quad [\Phi_s] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix}$$

Grandeurs rotoriques :

$$[V_r] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}; \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}; \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}; \quad [\Phi_r] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Avec respectivement :

- $[V_s]$  et  $[V_r]$ : les tensions statoriques et rotoriques de la machine ;
- $[I_s]$  et  $[I_r]$  : les courants statoriques et rotoriques de la machine ;
- $[\Phi_s]$  et  $[\Phi_r]$  : les flux statoriques et rotoriques de la machine ;
- $[R_s]$  et  $[R_r]$  : les résistances des enroulements statoriques et rotoriques de la machine.

### II. 2.1.2.2 Equations des flux

$$\begin{cases} [\Phi_s] = L_s[I_s] + M[I_r] \\ [\Phi_r] = L_r[I_r] + M[I_s] \end{cases} \quad (2.2)$$

$$\text{Tel que : } L_s = l_s - M_s, \quad L_r = l_r - M_r, \quad M = \frac{3}{2}M_{sr}$$

Avec respectivement :

- $L_s$  et  $L_r$  : les inductances cycliques statoriques et rotoriques de la machine ;
- $l_s$  et  $l_r$  : les inductances propres statoriques et rotoriques de la machine ;
- $M_s$  et  $M_r$  : les inductances mutuelles entre deux phases statoriques et entre deux phases rotoriques de la machine ;
- $M$  : l'inductance magnétisante ;
- $M_{sr}$  : la valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et une phase du rotor.

### II. 2.1.2.3 Equation mécanique

L'équation mécanique est régie par l'équation suivante :

$$C_{em} = C_r + f_v \cdot \Omega_r + J \cdot \frac{d\Omega_r}{dt} \quad (2.3)$$

Avec :

- $C_{em}$  : Le couple électromagnétique de la machine ;
- $C_r$  : Le couple résistant ;
- $f_v$  : Le coefficient de frottement visqueux de la MADA ;
- $\Omega_r$  : La vitesse de rotation de l'axe de la MADA ;
- $J$  : L'inertie des parties tournantes.

### II. 2.2.3 Modèle de la MADA dans le plan (d q)

Nous allons maintenant décrire la modélisation dans un repère tournant diphasé d, q en utilisant les transformations de Park permettant la conservation des puissances [35].

#### II. 2.2.3.1 La transformation de PARK

La transformation de Park permet de ramener les variables du repère triphasé (a, b, c) sur les axes du repère (d, q). Les grandeurs statoriques et rotoriques sont alors exprimées dans un même repère comme le montre la figure 2.3 Le produit matriciel définissant la transformée de Park et de Concordia est le suivant [22] :

$$[x_{dq}] = [P(-\theta_i)][T_{32}]^t[x_{abc}] \quad (2.4)$$

$$\text{Avec : } [P(-\theta_i)] = \begin{bmatrix} \cos \theta_i & -\sin \theta_i \\ \sin \theta_i & \cos \theta_i \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

Avec  $\theta_i = \theta_s$  pour les grandeurs statoriques et  $\theta_i = \theta_r$  pour les grandeurs rotoriques.

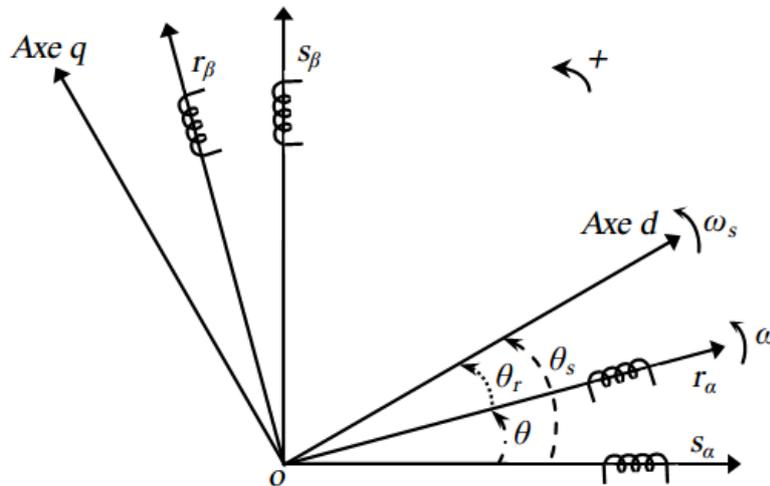


Figure 2.3 : Repères de référence : statorique  $s_{\alpha,\beta}$ , rotorique  $r_{\alpha,\beta}$  et tournant d,q.

#### II. 2.1.3.2 Application de la transformation de PARK

En appliquant cette transformation aux tensions et aux flux statoriques et rotoriques, nous obtenons le modèle biphasé d'une machine asynchrone (avec  $\omega_s = \dot{\theta}_s$  et  $\omega_r = \dot{\theta}_r$ ).

**a). Equations des tensions :**

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} - \omega_s \cdot \phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\phi_{sq}}{dt} + \omega_s \cdot \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \cdot \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \cdot \phi_{rd} \end{cases} \quad (2.5)$$

**b). Equations des flux :**

$$\begin{cases} \phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ \phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r \cdot I_{rd} + M \cdot I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r \cdot I_{rq} + M \cdot I_{sq} \end{cases} \quad (2.6)$$

Avec respectivement :

- $V_{sd}, V_{sq}, V_{rd}, V_{rq}$  : Les tensions statoriques et rotoriques directes et en quadrature ;
- $I_{sd}, I_{sq}, I_{rd}$  et  $I_{rq}$  : les courants statoriques et rotoriques directs et en quadrature ;
- $\theta_s$  : L'angle électrique du champ tournant statorique ;
- $\theta_r$  : L'angle électrique du champ tournant par rapport au rotor ;
- $\phi_{sd}, \phi_{sq}, \phi_{rd}$  et  $\phi_{rq}$  : les flux statorique et rotorique direct et en quadrature.

**c). Equations du couple électromagnétique :**

Le couple électromagnétique s'exprime quant à lui en fonction des courants et des flux par [10] :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (I_{rd} \phi_{sq} - I_{rq} \phi_{sd}) \quad (2.7)$$

Avec p le nombre de paires de pôles de la MADA.

**II. 2.2 Modélisation de l'alimentation de la MADA**

Grâce à l'évolution de l'électronique de puissance et à l'utilisation de la technique MLI (Modulation de largeur d'impulsion), les convertisseurs statiques permettent par un contrôle adéquat des signaux de commande des interrupteurs, d'imposer à la machine des ondes de tensions à amplitudes et fréquences variables à partir du réseau standard 220/380V, 50Hz..

La structure du convertisseur statique qui alimente la machine est constituée essentiellement, d'un pont redresseur (AC/DC), après redressement, la tension de l'étage

continu est filtrée par des composants passifs C ou LC, pour être finalement appliquée à l'onduleur [35].

L'association redresseur-filtre-onduleur de tension est représentée dans la figure 2.4

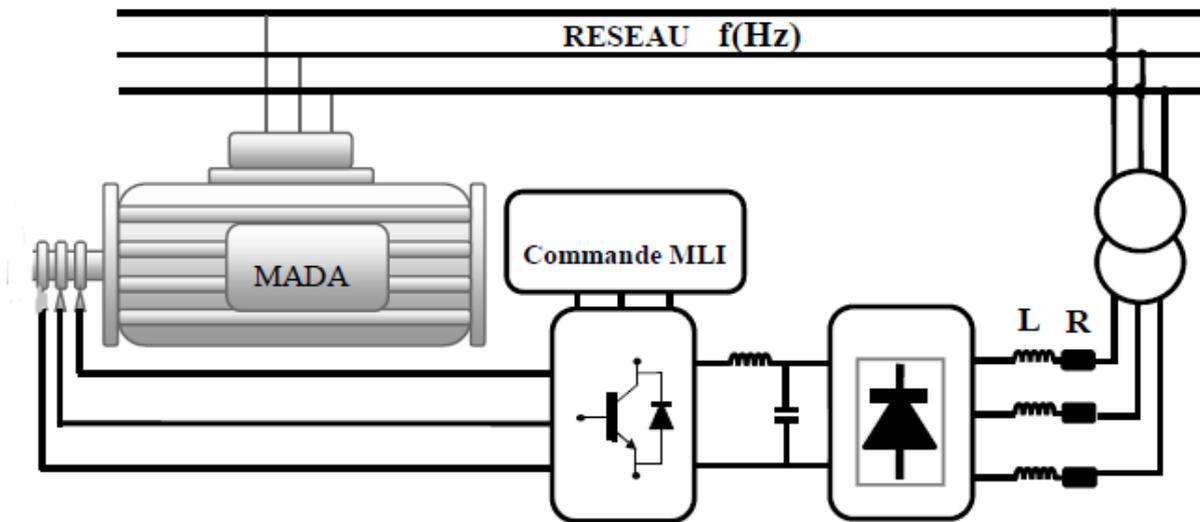


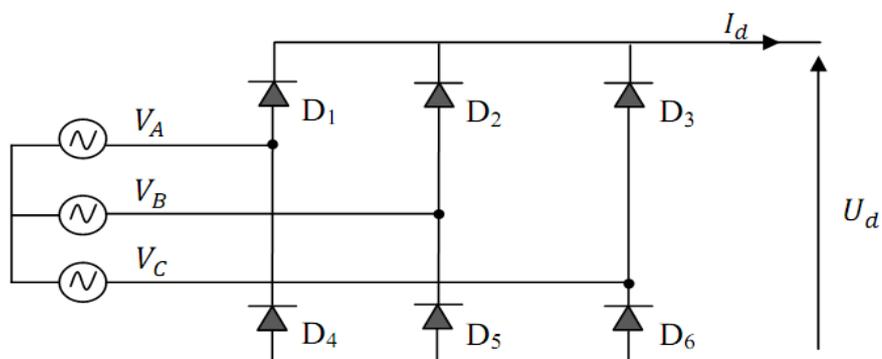
Figure 2.4 : L'ensemble convertisseur machine.

### II. 2.2.1 Modélisation du redresseur

Le redresseur est un convertisseur statique capable de transformer l'énergie d'une source alternative en une source continue. Il existe plusieurs montages, et le choix se fait selon les performances désirées [47].

Dans notre travail, nous nous intéressons seulement au redresseur triphasé à double alternance non commandé dont les composants sont des diodes Figure 2.5

L'alimentation du redresseur se fait par le réseau électrique triphasé où le système de tension est équilibré.



2.5 : Figure Représentation du redresseur triphasé à diodes

Ce redresseur comporte trois diodes D1, D2, D3 à cathode commune assurant l'aller du courant  $I_d$  et trois diodes D4, D5, D6 à anode commune assurant le retour du courant  $I_d$ . Si on suppose que le redresseur est alimenté par un réseau triphasé équilibré de tension :

$$\begin{cases} V_A(t) = V_m \sin(2\pi ft) \\ V_B(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{2\pi}{3}\right) \\ V_C(t) = V_m \sin\left(2\pi ft - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.8)$$

Et si on néglige l'effet d'empiètement, la tension de sortie du redresseur sera définie comme suit :

$$U_d(t) = \text{Max}[V_A(t), V_B(t), V_C(t)] - \text{Min}[V_A(t), V_B(t), V_C(t)] \quad (2.9)$$

La tension obtenue par ce redresseur présente des ondulations importantes, ce qui nécessite un filtre pour diminuer ces ondulations.

### II. 2.2.2 Modélisation du filtre

On utilise un filtre passe bas « LC », pour éliminer les hautes fréquences. Il permet de réduire les ondulations de la tension et du courant redressé. Ce filtre est schématisé par la figure 2.6 [23].

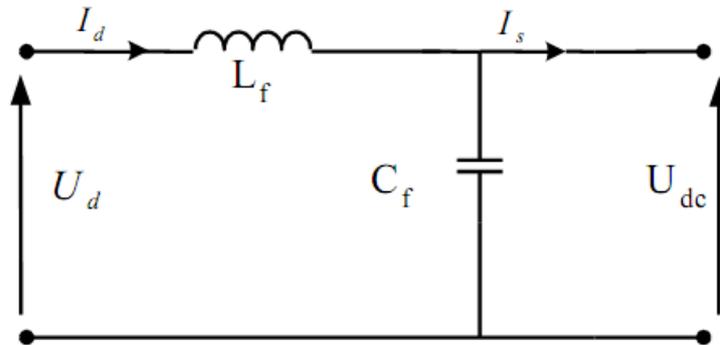


Figure 2.6 : Représentation d'un filtre passe-bas.

Le modèle du filtre est défini par le système d'équations suivant :

$$\begin{cases} U_d(t) = L_f \frac{dI_d}{dt} + U_{dc}(t) \\ \frac{dU_{dc}(t)}{dt} = \frac{1}{C_f} (I_d(t) - I_s(t)) \end{cases} \quad (2.10)$$

La fonction de transfert du filtre est donnée par :

$$F(s) = \frac{U_{dc}(s)}{U_d(s)} = \frac{1}{1+(\sqrt{L_f C_f} s)^2} \quad (2.11)$$

C'est un filtre de deuxième ordre avec une fréquence de coupure égale à :

$$f_c = \frac{1}{\sqrt{L_f C_f}} \quad (2.12)$$

### II. 2.2.3 Modélisation de l'onduleur

Dans notre étude, nous considérons le cas d'un onduleur triphasé idéal à deux niveaux de tension, à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI), modélisé par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. Le point milieu de la source de tension est fictif.

Un onduleur de tension est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif de la tension [24].

Il est constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou à thyristors GTO pour les grandes puissances. Il permet d'imposer à la machine des ondes à amplitudes et fréquences variables à partir d'un réseau standard 220/380 V-50 Hz [25].

#### II. 2.2.3.1 Principe de fonctionnement

Le montage onduleur est constitué de six interrupteurs bidirectionnels, chaque interrupteur est constitué d'un transistor (T) et d'une diode (D) montés en tête-bêche Figure 2.7 Les couples d'interrupteurs ( $K_{11}, K_{21}$ ), ( $K_{12}, K_{22}$ ), ( $K_{13}, K_{23}$ ) sont commandés d'une manière complémentaire, pour assurer la continuité des courants dans la charge d'une part, et d'éviter le court-circuit de la source d'autre part [2]. Pour se prémunir d'un court-circuit intempestif, il est nécessaire laisser un petit intervalle de temps entre la commande à la fermeture de  $T_{21}$  (ou  $T_{22}$  ou  $T_{23}$ ) et la commande à l'ouverture de  $T_{11}$  (ou  $T_{12}$  ou  $T_{13}$ ) et inversement [24].

Les diodes  $D_{ij}$  ( $i \in [1,2], j \in [1,2,3]$ ) sont des diodes à roue libre assurant la protection des thyristors [47].

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande  $S_j$  ( $j = 1,2,3$ ) [26] :

- $S_j = 1$  le cas où l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $S_j = 0$  le cas où l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

On peut écrire les tensions  $V_{ko}$  ( $k = A, B, C$ ) en fonction des signaux de commande  $S_j$  et en tenant compte du point fictif "o" représenté sur la Figure 2.7 :

$$V_{ko} = U_{dc} \left( S_j - \frac{1}{2} \right) \quad (2.13)$$

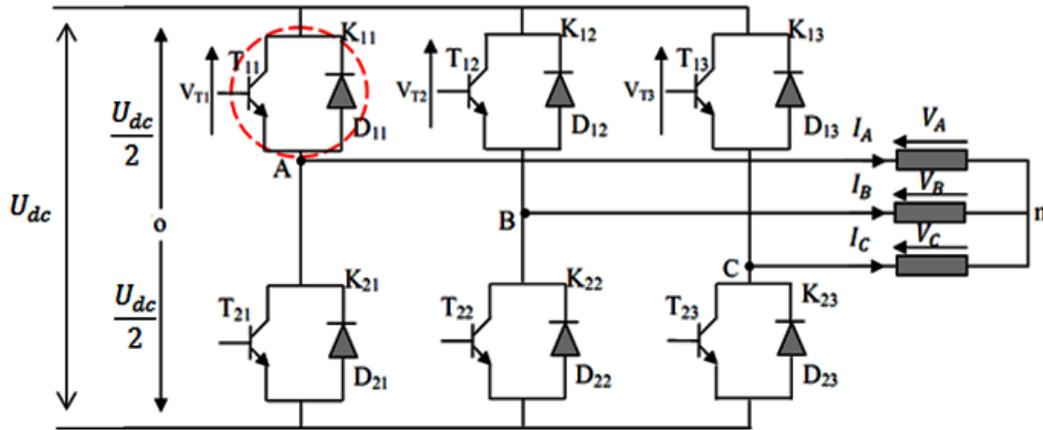


Figure 2.7 : Onduleur de tension triphasé à deux niveaux.

Pour simplifier l'étude nous supposons que [35] :

- ✓ La commutation des interrupteurs est instantanée.
- ✓ La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable c'est-à-dire l'interrupteur supposé idéalisé.
- ✓ La charge est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé.

Les trois tensions composées :  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$ , et  $V_{CA}$  sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{An} - V_{Bn} \\ V_{BC} = V_{Bn} - V_{Cn} \\ V_{CA} = V_{Cn} - V_{An} \end{cases} \quad (2.14)$$

Le système  $V_A$ ,  $V_B$  et  $V_C$  étant équilibré ( $V_{An} + V_{Bn} + V_{Cn} = 0$ ), on aura donc :

$$\begin{cases} V_{An} = \frac{1}{3}(V_{AB} - V_{CA}) \\ V_{Bn} = \frac{1}{3}(V_{BC} - V_{AB}) \\ V_{Cn} = \frac{1}{3}(V_{CA} - V_{BC}) \end{cases} \quad (2.15)$$

En faisant apparaître le point "o", les tensions entre phases peuvent aussi s'écrire :

$$\begin{cases} V_{AB} = V_{Ao} - V_{Bo} \\ V_{BC} = V_{Bo} - V_{Co} \\ V_{CA} = V_{Co} - V_{Ao} \end{cases} \quad (2.16)$$

En remplaçant (2.16) dans (2.15) on obtient :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Ao} \\ V_{Bo} \\ V_{Co} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

Des relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{Ao} = V_A + V_{no} \\ V_{Bo} = V_B + V_{no} \\ V_{Co} = V_C + V_{no} \end{cases} \quad (2.18)$$

On peut déduire le potentiel entre les points **n** et **o** :

$$V_{no} = \frac{1}{3}(V_{Ao} + V_{Bo} + V_{Co}) \quad (2.19)$$

L'utilisation de l'expression (2.13) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande :

$$\begin{bmatrix} V_A \\ V_B \\ V_C \end{bmatrix} = \frac{U_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Le système (2.20) représente le modèle mathématique de l'onduleur triphasé à MLI.

### II. 2.2.3.2 Commande par modulation de largeur d'impulsion (MLI)

Dans notre travail, nous nous sommes intéressés à la technique d'origine analogique dite sinus-triangle.

La modulation triangulo-sinusoidale est appelée également modulation de largeur d'impulsion intersectée puisque son principe repose sur l'intersection d'une onde modulante basse fréquence, dite tension de référence, généralement sinusoidale avec une onde porteuse haute fréquence de forme généralement triangulaire d'où l'appellation triangulo-sinusoidale. Le résultat de la comparaison de ces deux signaux sert à commander l'ouverture et la fermeture des interrupteurs du circuit de puissance [23].

Le schéma de principe est donné par la figure 2.8 :

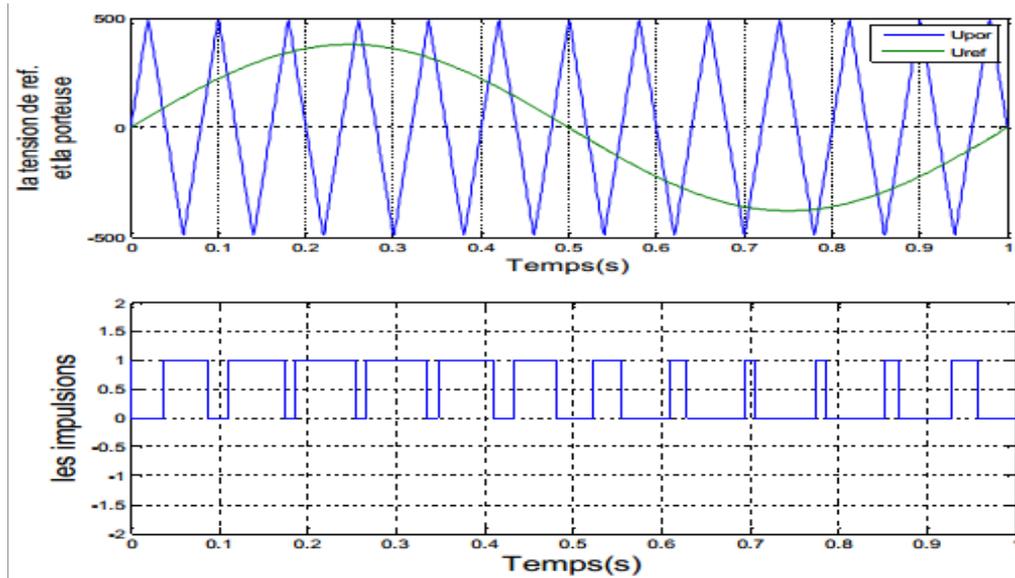


FIGURE 2.8 principe de la commande MLI- ST.

❖ **Equation de la porteuse :**

La porteuse est un signal triangulaire caractérisé par sa fréquence  $f_p$  et sa valeur de crête  $V_p$ .

On définit l'équation de la porteuse dans sa période  $[0, T_p]$  par [23] :

$$\begin{cases} x_1(t) = V_p \left( -1 + 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[ 0, \frac{T_p}{2} \right] \\ x_2(t) = V_p \left( 3 - 4 \frac{t}{T_p} \right) & \text{si } t \in \left[ \frac{T_p}{2}, T_p \right] \end{cases} \quad (2.21)$$

❖ **Equation de la référence :**

La référence est un signal sinusoïdal d'amplitude  $V_r$  et de fréquence  $f_r$ . En triphasé, les trois tensions sinusoïdales de référence sont données par [23] :

$$\begin{cases} v_{rA}(t) = V_r \sin(2\pi f_r t) \\ v_{rB}(t) = V_r \sin\left(2\pi f_r t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ v_{rC}(t) = V_r \sin\left(2\pi f_r t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (2.22)$$

La fonction logique  $S_j$  associée au signal de commande est définie par :

$$S_{123} = \begin{cases} 1 & \text{si } (v_{rABC} - x(t)) \geq 0 \\ 0 & \text{si } (v_{rABC} - x(t)) < 0 \end{cases} \quad (2.23)$$

### ❖ Caractéristiques de la MLI :

Deux paramètres caractérisent cette commande si la référence est sinusoïdale [23].

- L'indice de modulation  $m$  qui définit le rapport entre la fréquence  $f_p$  de la porteuse et la fréquence  $f_r$  de la référence :  $m = f_p/f_r$
- Le taux de modulation  $r$  (ou coefficient de réglage en tension ou encore rapport cyclique) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante  $V_r$  à la valeur crête  $V_p$  de la porteuse :  $r = V_r/V_p$

## II. 3 Commande Vectorielle

L'intérêt de l'utilisation de la machine asynchrone à double alimentation outre que la taille des convertisseurs, est de pouvoir fonctionner à vitesse variable en suivant la caractéristique puissance-vitesse optimale de l'éolienne. Après avoir donné le modèle mathématique de la machine dans ce chapitre, une commande adéquate est nécessaire afin de bien contrôler les puissances statoriques pour permettre un bon fonctionnement de la machine à double alimentation en génératrice (GADA).

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines électriques. Elle nous permet d'établir un mode de fonctionnement découplé en positionnant d'une manière optimale les vecteurs courants et les vecteurs flux résultants.

En effet, elle nous permet d'assimiler le comportement d'une machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu, où le couple électromagnétique est proportionnel au courant d'induit [9].

### II. 3.1 But Et Principe de La Commande Vectorielle

La commande par orientation de flux proposé par Blaschke, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones.

Le principe de cette technique est d'éliminer le problème de couplage entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Nous décomposons le courant statorique en deux composantes directes et en quadrature dans un repère de référence lié au flux statorique de telle sorte que l'une des composantes contrôle le flux et l'autre contrôle le couple [32]. Afin d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à

excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux (le courant d'excitation) et celle liée au couple (le courant d'induit) [47].

La commande vectorielle par orientation du flux présente une solution attractive pour réaliser de meilleures performances dans les applications à vitesse variable pour le cas de la machine asynchrone double alimentée aussi bien en fonctionnement générateur que moteur [35].

## II. 4 Modèle pour le contrôle indépendant des puissances

Pour pouvoir contrôler facilement la production d'électricité de l'éolienne, nous allons réaliser un contrôle indépendant des puissances actives et réactives en établissant les équations qui lient les valeurs des tensions, générées par un onduleur, aux puissances actives et réactives statoriques [3] [35], [44], [48].

Nous utilisons la modélisation diphasée de la machine. On oriente le repère  $d, q$  afin que l'axe  $d$  soit aligné sur le flux statorique  $\varphi_s$ .

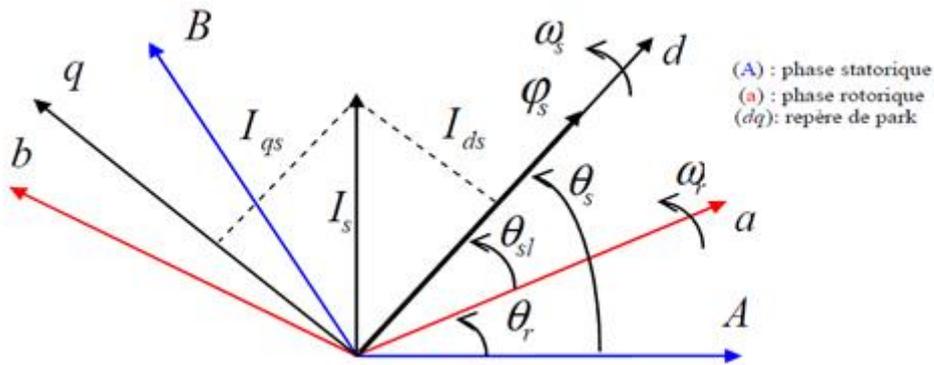


Figure 2.9 orientations de l'axe  $d$  sur le flux statorique

Ainsi :

$$\varphi_{sd} = \varphi_s \quad \text{et} \quad \varphi_{sq} = 0 \quad (2.24)$$

Le couple électromagnétique de l'équation (2.7) s'écrit alors :

$$C_{em} = -P \frac{M}{L_s} I_{rq} \varphi_{sd} \quad (2.25)$$

Et l'équation des flux (2.6) devient :

$$\begin{cases} \Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \\ 0 = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \end{cases} \quad (2.26)$$

Si l'on suppose le réseau électrique stable, ayant pour tension simple  $V_s$ , cela conduit à un flux statorique  $\Phi_s$  constant. Cette considération associée à l'équation (2.25), montre que le couple électromagnétique  $C_{em}$  est directement proportionnel au courant rotorique en quadrature  $I_{rq}$ .

De plus, si l'on néglige la résistance des enroulements statoriques, hypothèse réaliste pour les machines de forte puissance utilisées pour la production éolienne, les équations des tensions statoriques de la machine se réduisent à :

$$\begin{cases} V_{sd} = \frac{d\Phi_s}{dt} \\ V_{sq} = \omega_s \Phi_s \end{cases} \quad (2.27)$$

Avec  $\omega_s$  la pulsation électrique des grandeurs statoriques.

Avec l'hypothèse du flux statorique constant, on obtient :

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s \end{cases} \quad (2.28)$$

A l'aide de l'équation (2.26), on peut établir le lien entre les courants statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} I_{sd} = -\frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{\Phi_s}{L_s} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad (2.29)$$

#### II. 4.1 Relations entre puissances statoriques et courants rotoriques

Dans un repère diphasé, la puissance active et réactive statoriques d'une machine asynchrone s'écrivent :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} I_{sd} + V_{sq} I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} I_{sd} - V_{sd} I_{sq} \end{cases} \quad (2.30)$$

Sous l'hypothèse d'un flux statorique orienté, ce système d'équations peut se simplifier sous la forme :

$$\begin{cases} P_s = V_s I_{sq} \\ Q_s = V_s I_{sd} \end{cases} \quad (2.31)$$

En remplaçant  $I_{sd}$  et  $I_{sq}$  par leur expressions données l'équation (2.29), nous obtenons les expressions suivantes pour les puissances active et réactive :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + V_s \frac{\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.32)$$

A partir des équations (2.27) et (2.28), nous obtenons, pour le flux statorique, l'expression suivante :

$$\phi_s = \frac{V_s}{\omega_s} \quad (2.33)$$

L'expression des puissances peut donc se simplifier de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{V_s^2}{L_s \omega_s} \end{cases} \quad (2.34)$$

Si l'on considère l'inductance magnétisante  $M$  constante, on remarque que l'équation (2.34) fait apparaître que la puissance active  $P$  statorique est directement proportionnelle au courant rotorique en quadrature  $I_{rq}$ . De même, la puissance réactive  $Q$  du stator est proportionnelle au courant rotorique direct  $I_{rd}$ , à un constant pré  $\frac{V_s^2}{L_s \omega_s}$ .

## II. 4.2 Relations entre tensions rotoriques et courants rotoriques

Afin de pouvoir contrôler correctement la machine, il nous faut alors établir la relation entre les courants et les tensions rotoriques qui seront appliqués à la machine.

En remplaçant dans l'équation des flux (2.6), les courants statoriques par l'expression (2.29) on obtient :

$$\begin{cases} \phi_{rd} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{M V_s}{L_s \omega_s} \\ \phi_{rq} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \end{cases} \quad (2.35)$$

En remplaçant l'expression des flux rotoriques de l'équation (2.35) par leurs expressions dans l'équation (2.5) on obtient :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.36)$$

Où  $g$  correspond au glissement de la machine asynchrone.



les puissances et les courants rotoriques. Cette méthode appelée **méthode indirecte** découle directement des équations (2.34) et (2.36).

## II. 5 Commande directe en puissance active et réactive de la GADA

Dans la méthode directe, l'idée de la régulation consiste à commander indépendamment et directement les puissances  $P$  et  $Q$  de la GADA.

### II. 5.1 Schéma bloc en boucle ouverte

En posant les  $f_{em}$  suivantes :

$$\begin{cases} f_{em,d} = -g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ f_{em,q} = g\omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{MV_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.37)$$

Nous obtenons alors :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} + f_{em,d} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + f_{em,q} \end{cases} \quad (2.38)$$

Avec la transformé de Laplace, nous écrivons :

$$\begin{cases} \left( R_r + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot S \right) I_{rd} = V_{rd} - f_{em,d} \\ \left( R_r + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot S \right) I_{rq} = V_{rq} - f_{em,q} \end{cases} \quad (2.39)$$

Ou :

$$\begin{cases} I_{rd} = \frac{1}{\left( R_r + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot S \right)} (V_{rd} - f_{em,d}) \\ I_{rq} = \frac{1}{\left( R_r + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot S \right)} (V_{rq} - f_{em,q}) \end{cases} \quad (2.40)$$

Par la substitution des courants rotoriques de l'équation (2.40) dans l'équation (2.34), nous obtenons :

$$\begin{cases} P_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \frac{1}{\left( R_r + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot S \right)} (V_{rq} - f_{em,q}) \\ Q_s = -V_s \cdot \frac{M}{L_s} \frac{1}{\left( R_r + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot S \right)} (V_{rd} - f_{em,d}) + V_s \frac{\phi_s}{L_s} \end{cases} \quad (2.41)$$

D'après le modèle des puissances (2.41), le contrôle des puissances de la GADA revient alors à contrôler les deux puissances  $P_s$  et  $Q_s$  par les deux composantes  $V_{rd}$  et  $V_{rq}$ . Nous

remarquons aussi qu'il y a un grand couplage entre les puissances statoriques et les tensions rotoriques selon le modèle de puissance (2.41). Nous disons que les deux puissances comportent des termes croisés. Donc, il est nécessaire de réaliser un découplage pour contrôler séparément ces puissances. Dans ce cas, nous utilisons le découplage par compensation. A partir des équations (2.41), nous pouvons établir le schéma bloc simplifié de la GADA :

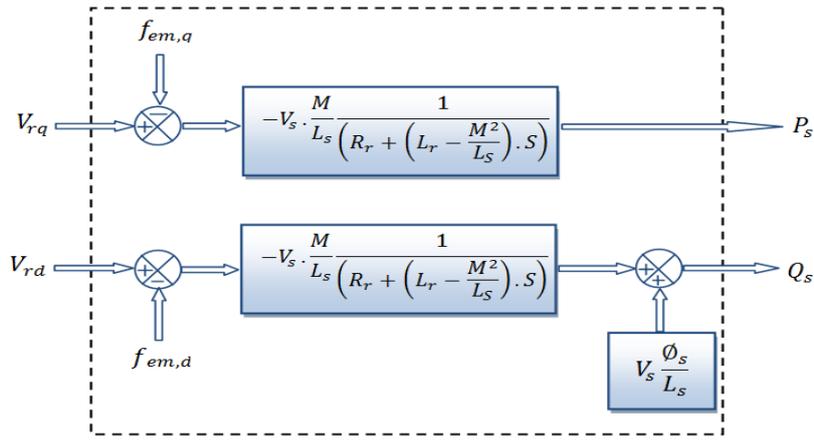


Figure 2.11 : Modèle réduit des puissances statoriques de la GADA.

II. 5.2 Schéma bloc de la régulation

Pour réguler les puissances statoriques de la machine, nous allons mettre en place une boucle de régulation pour chaque puissance avec un correcteur indépendant, tout en compensant les termes de perturbation qui sont présents dans le schéma bloc de la figure 2.11. Nous obtenons, ainsi, un découplage par compensation, qui permet de rendre les axes *d* et *q* complètement indépendants, comme le montre la figure 2.12

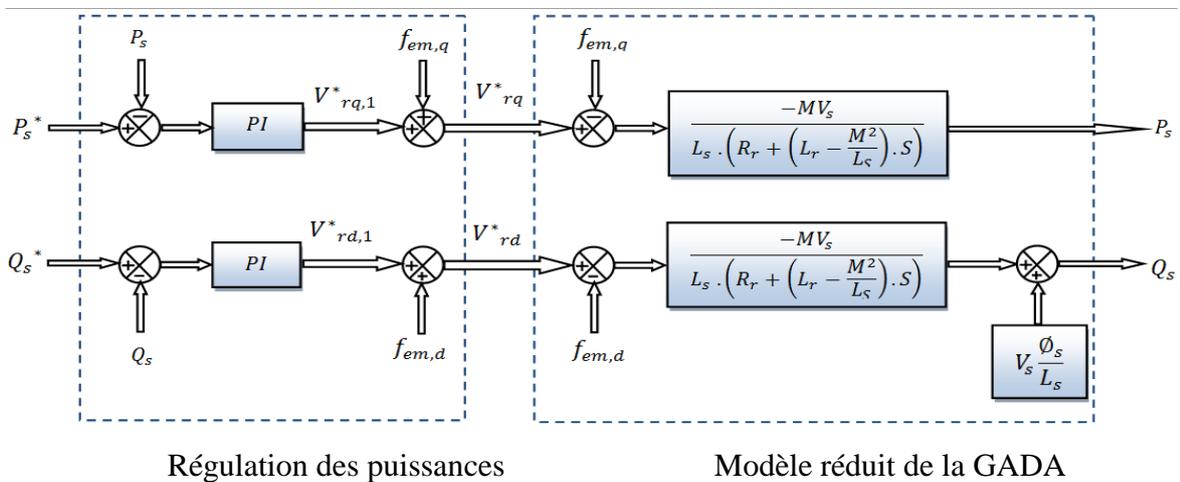


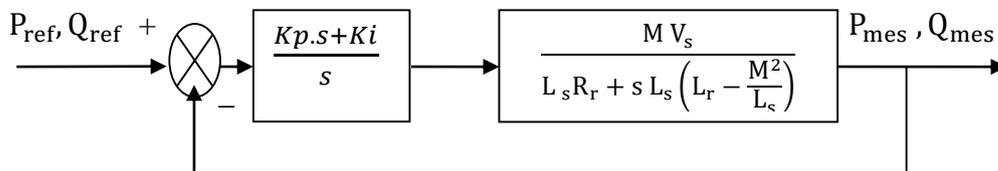
Figure 2.12 : Contrôle des puissances statoriques de la GADA.

### II. 6.3 Synthèse du régulateur Proportionnel-Intégral (PI)

Le régulateur Proportionnel Intégral PI, utilisé pour commander la GADA, est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables [3]. L'action proportionnelle sert à régler la rapidité de la dynamique du système, alors que l'action

Intégrale permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir [32]. C'est pour cela qu'il a retenu pour notre système.

La figure 2.13 montre une partie du système bouclé et corrigé par un régulateur PI dont la fonction de transfert est de la forme  $K_p + \frac{K_i}{s}$  correspondant aux deux régulateurs utilisés dans la figure 2.12.



**Figure 2.13 : Système régulé par un PI.**

La Fonction de Transfert en Boucle Ouverte (FTBO) avec les régulateurs s'écrit de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{S + \frac{K_i}{K_p}}{\frac{S}{K_p}} \cdot \frac{\frac{M \cdot V_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{S + \frac{L_s \cdot R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}} \quad (2.42)$$

Afin d'éliminer le zéro présent sur la fonction de transfert, nous choisissons la méthode de compensation de pôles pour la synthèse du régulateur, ce qui se traduit par l'égalité suivante :

$$\frac{K_i}{K_p} = \frac{L_s \cdot R_r}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})} \quad (2.43)$$

Notons toutefois ici que la compensation des pôles n'a d'intérêt que si les paramètres de la machine sont connus avec une certaine précision car les gains des correcteurs dépendent directement de ces paramètres. Si tel n'est pas le cas, la compensation est moins performante.

Si l'on effectue la compensation, on obtient la FTBO suivante :

$$FTBO = \frac{K_p \cdot \frac{MV_s}{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}}{s} \quad (2.44)$$

Ce qui nous donne en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + \tau_r \cdot s} \quad \text{Avec} \quad \tau_r = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s} \quad (2.45)$$

Avec  $\tau_r$  le temps de réponse du système qui d'après des études effectuées par de nombreux chercheurs sur ce type de régulations l'ont fixés à l'ordre de 200 ms, correspondant à une valeur suffisamment rapide pour l'utilisation faite sur l'éolienne où les variations de vent sont peu rapides et les constantes de temps mécanique sont importantes.

S'imposer une valeur plus faible n'améliorerait probablement pas les performances de l'ensemble, mais risquerait d'engendrer des perturbations lors des régimes transitoires en provoquant des dépassements et des instabilités indésirables.

On peut désormais exprimer les gains des correcteurs en fonction des paramètres de la machine et du temps de réponse :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s(L_r - \frac{M^2}{L_s})}{MV_s};$$

$$K_i = \frac{1}{\tau_r} \cdot \frac{L_s \cdot R_r}{MV_s} \quad (2.46)$$

Notons que la méthode de la compensation des pôles n'est bien entendu pas la seule alternative de calcul pour la synthèse d'un régulateur PI. Toutefois, elle présente l'avantage d'être rapide à mettre en œuvre sur une fonction de transfert du premier ordre et elle s'avère suffisante dans notre cas pour comparer le PI aux autres régulateurs

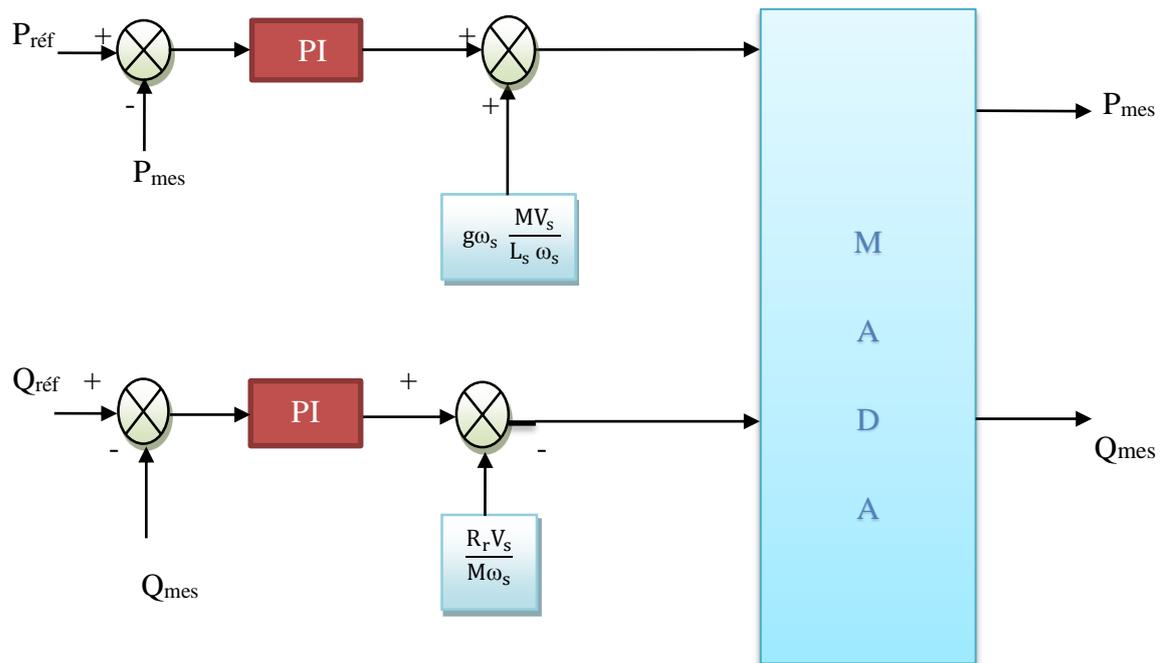


Figure 2.14 Schéma bloc de la commande directe.

## II. 5.4 Résultats de simulation

La stratégie de la commande directe en puissances de la GADA a été validée par simulation numérique en utilisant le logiciel Matlab/Simulink. Les paramètres de la génératrice utilisée pour la simulation sont donnés dans l'annexe. Afin d'effectuer des tests de la régulation, nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive.

- ❖ Pour la puissance active :
  - De  $t=0s$  à  $t=2s$  : un échelon nulle de  $0\text{ W}$  ;
  - De  $t=2s$  à  $t=4\text{ s}$  : un échelon négatif de  $-1500\text{ W}$  ;
  - De  $t=4\text{ s}$  à  $t=6\text{ s}$  : un échelon nulle de  $0\text{ W}$  ;
- ❖ Pour la puissance réactive :
  - De  $t=0s$  à  $t=3s$  : un échelon nulle de  $0\text{ VAR}$  ;
  - e  $t=3s$  à  $t=6s$  : un échelon négatif de  $-1500\text{ VAR}$  ;

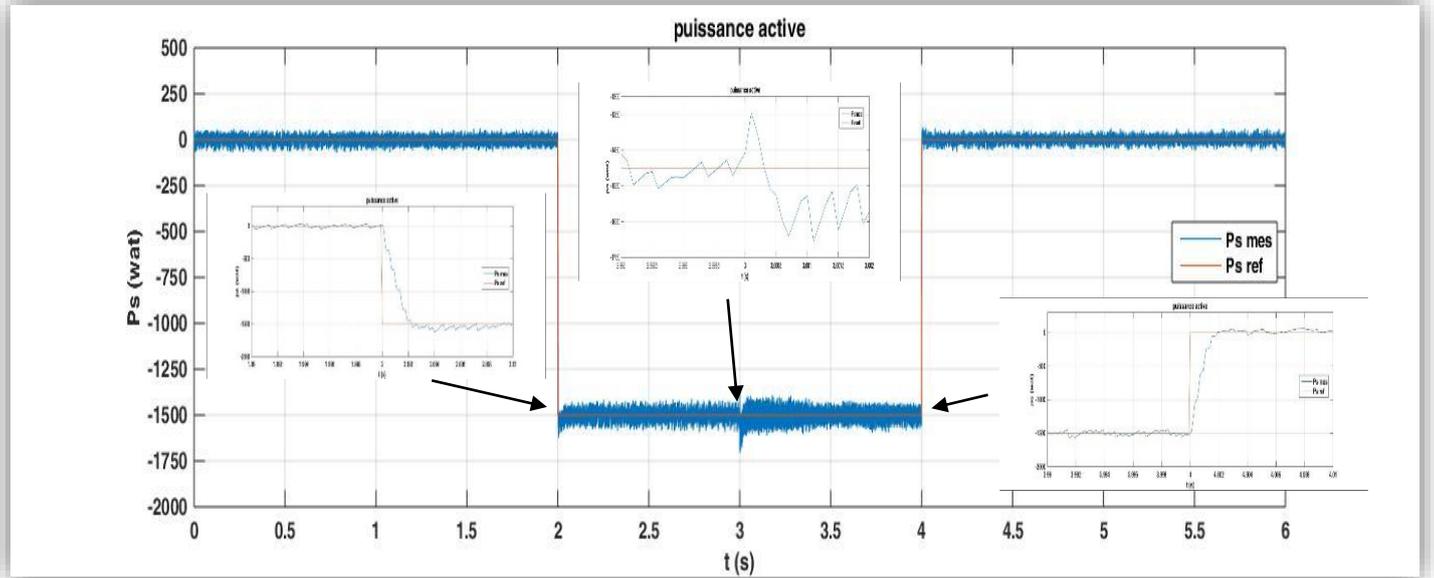


Figure 2.15 Variation de la Puissance active

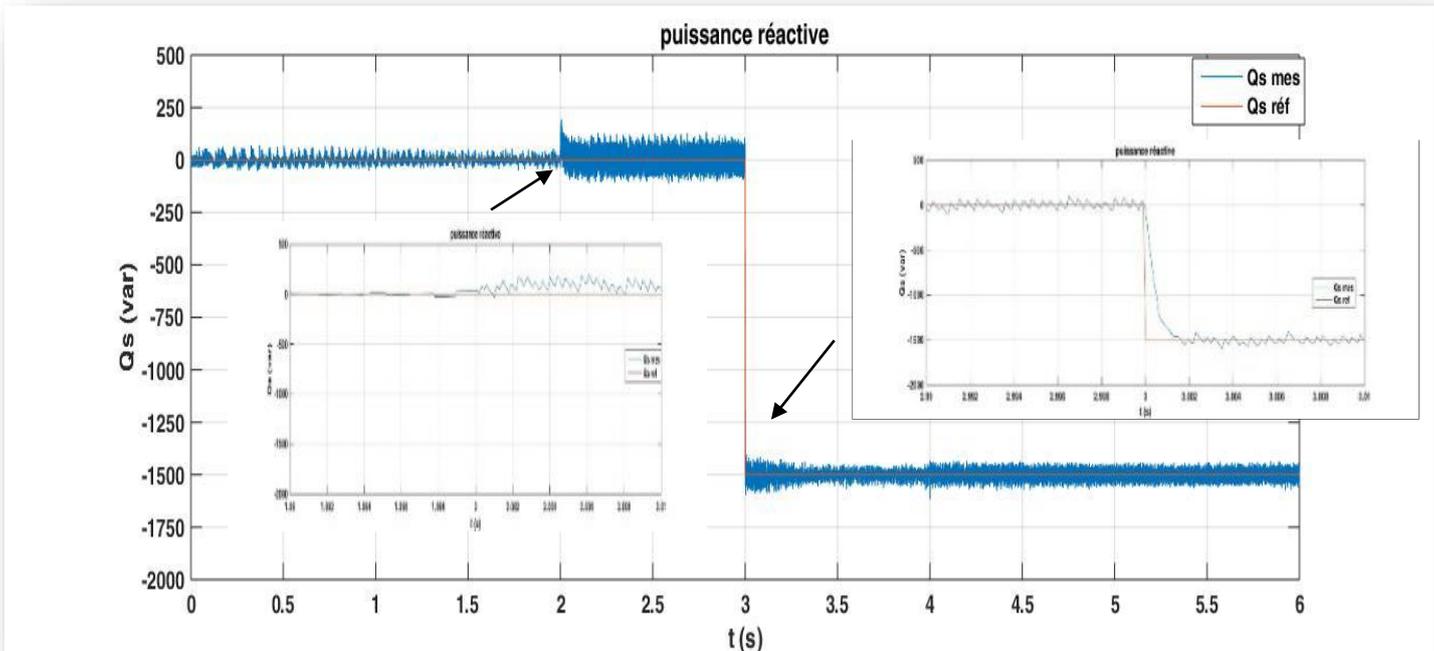


Figure 2.16 Variation de la Puissance réactive

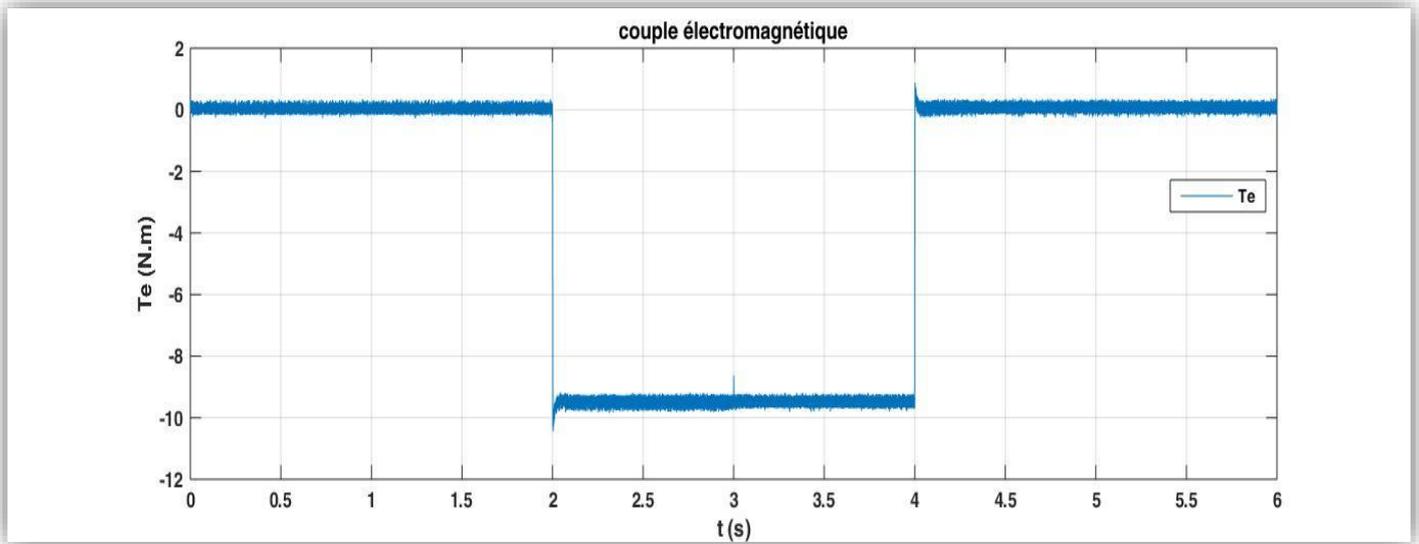


Figure 2.17 Variation du couple électromagnétique

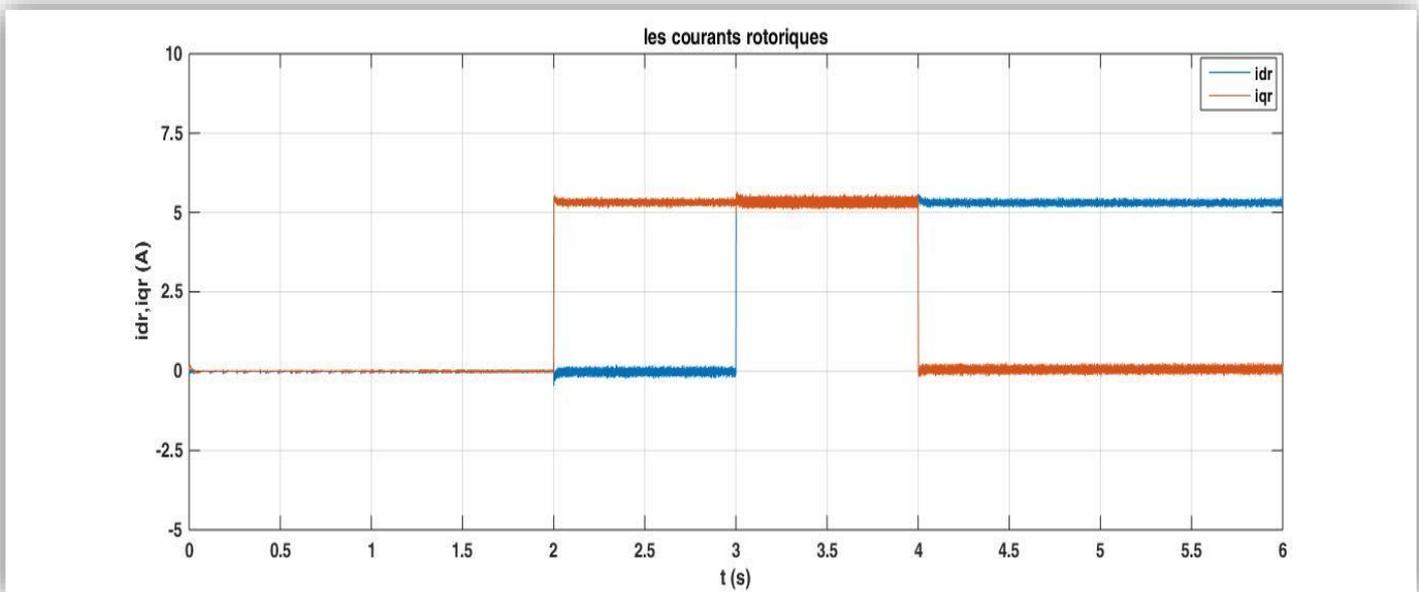
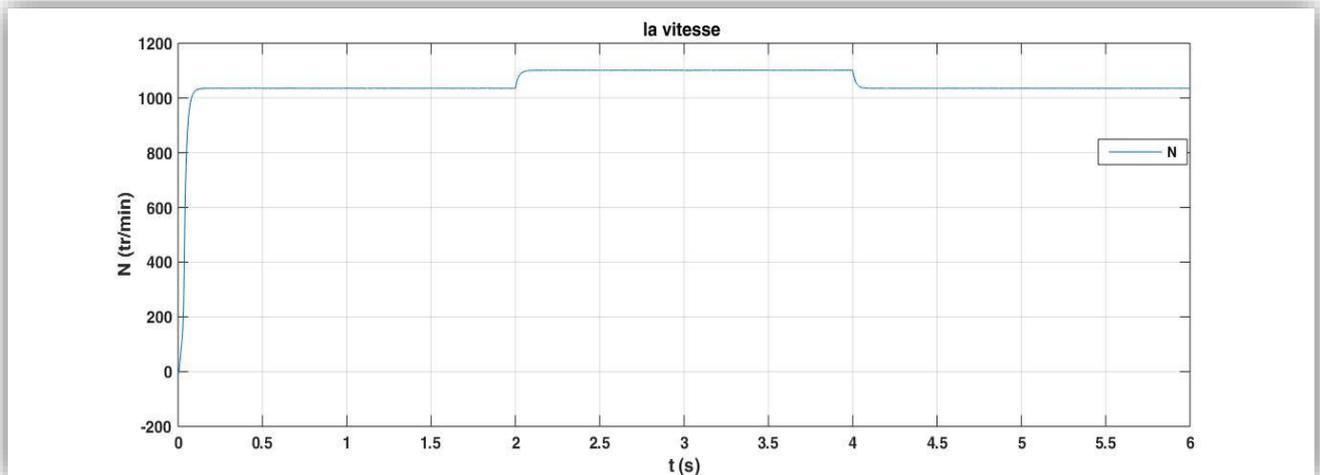


Figure 2.18 Variation des courants rotoriques



**Figure 2.19** Variation de la vitesse

### Interprétation des résultats :

On peut remarquer que les échelons de puissance sont bien suivis par la génératrice aussi bien pour la puissance active que pour la puissance réactive.

La puissance active du côté statorique est négative ce qui signifie que le réseau dans ce cas est un récepteur de l'énergie fournie par la GADA, La puissance réactive est réglable selon les besoins du réseau (ajustement sur le  $\cos(\varphi)$ ).

Le couple électromagnétique prend la forme de la puissance active on passe de 0 N.m dans le temps (0 à 2 s), après 2s jusqu' à 4s il passe à -9.5 N.m et après 4s se stabilise vers une valeur de 0 N.m

Les courants rotoriques prennent les formes de la puissance active et réactive mais au sens positif t ( $i_{qr}$  prend la forme de  $P_s$  et  $i_{dr}$  prend la forme de  $Q_s$ )

On remarque aussi que la vitesse varie en parallèle avec le couple électromagnétique, elle augmente à 1050 tr/min de 0s à 2s, entre 2s jusqu' à 4s elle augmente un peu plus fort que la première valeur (à 1100 tr/min), après 4s la vitesse elle diminue jusqu'à prendre une valeur stable autour de 1050 tr/min

D'après les résultats obtenus, nous constatons que la méthode directe utilisant des correcteurs  $PI$  présente un bon découplage et un réglage des puissances active et réactive au niveau du stator dans le cas d'un entraînement à vitesse constante de la GADA.

Cependant, cette méthode naturellement est moins performante pour un fonctionnement à vitesse variable. Ceci dû à la présence de certaines perturbations aux niveaux des puissances active et réactive comme le montre pour l'équation (2.41)

### II. 6 Commande indirecte en puissance active et reactive de la GADA

Cette technique consiste à reproduire, en sens inverse, le schéma bloc du système à réguler [22], [27]. Nous construisons ainsi un schéma bloc permettant d'exprimer les tensions en fonction des puissances. Nous aboutissons alors à un modèle qui correspond à celui de la machine mais dans l'autre sens.

La méthode indirecte va donc contenir tous les éléments présents dans le schéma bloc de la GADA. Nous partons donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonction des courants rotoriques.

On part donc de la puissance statorique en fonction des courants rotoriques et des expressions des tensions rotoriques en fonctions du courant rotoriques

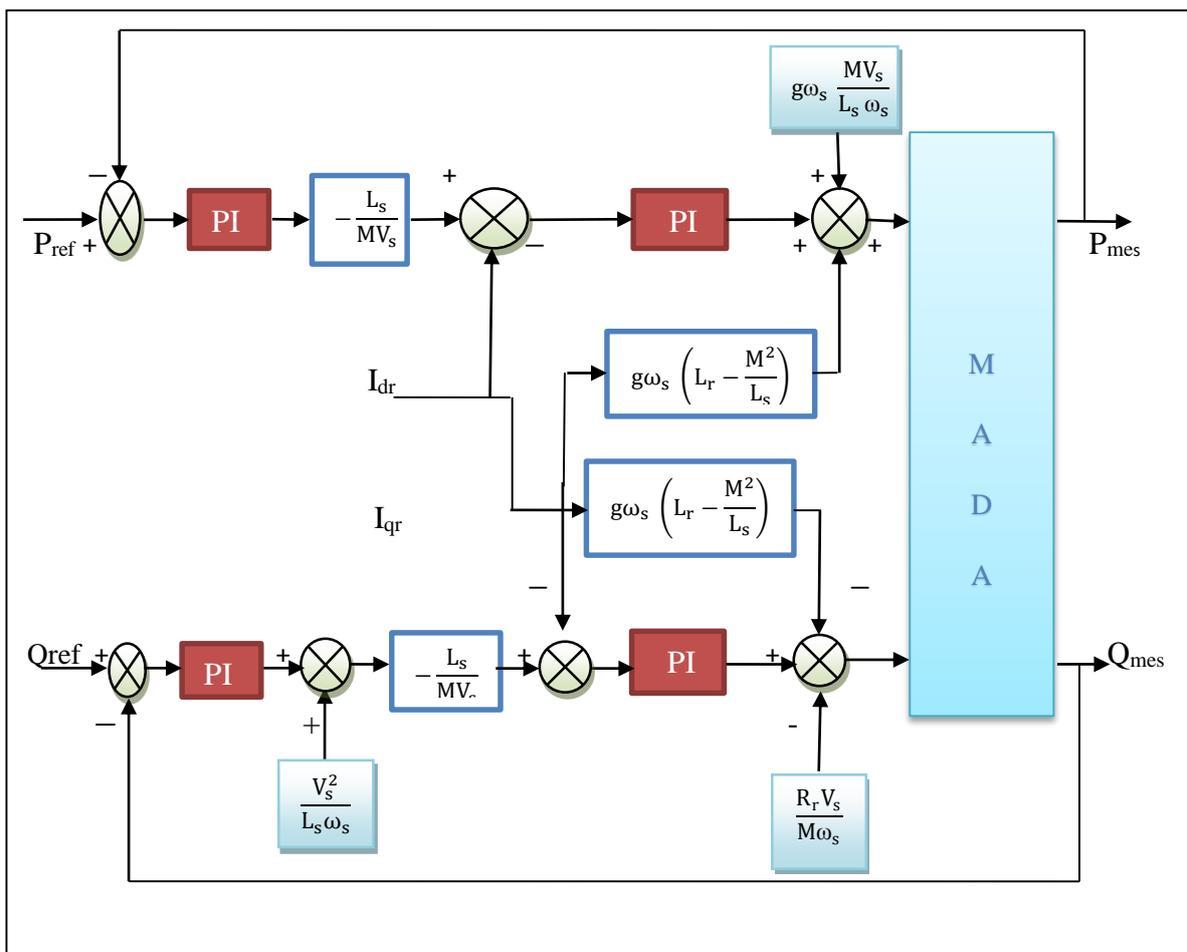


Figure 2.20 : Schéma bloc de la commande indirecte de la GADA.

### II. 6.1 Résultats de la simulation

Les gains des correcteurs sont calculés de la même manière qu'à la section précédente

Et ont été affinés après simulation. Ils sont identiques pour l'axe  $d$  et l'axe  $q$ .

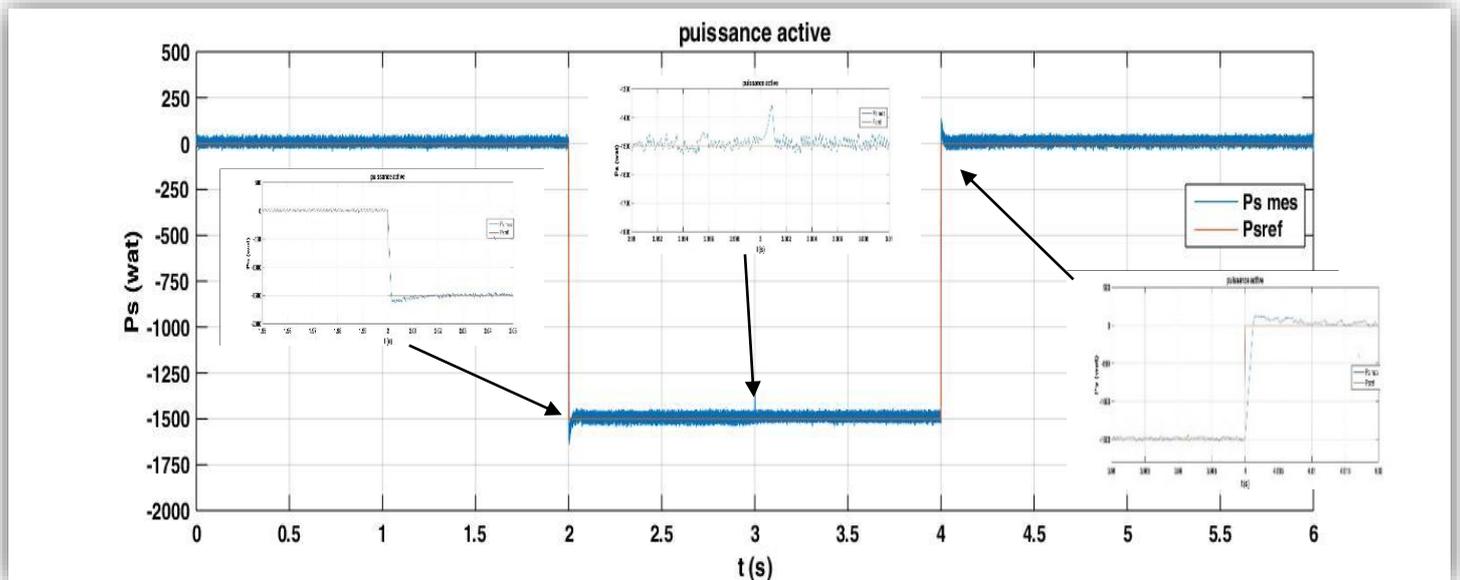


Figure 2.21 Variation de la Puissance active

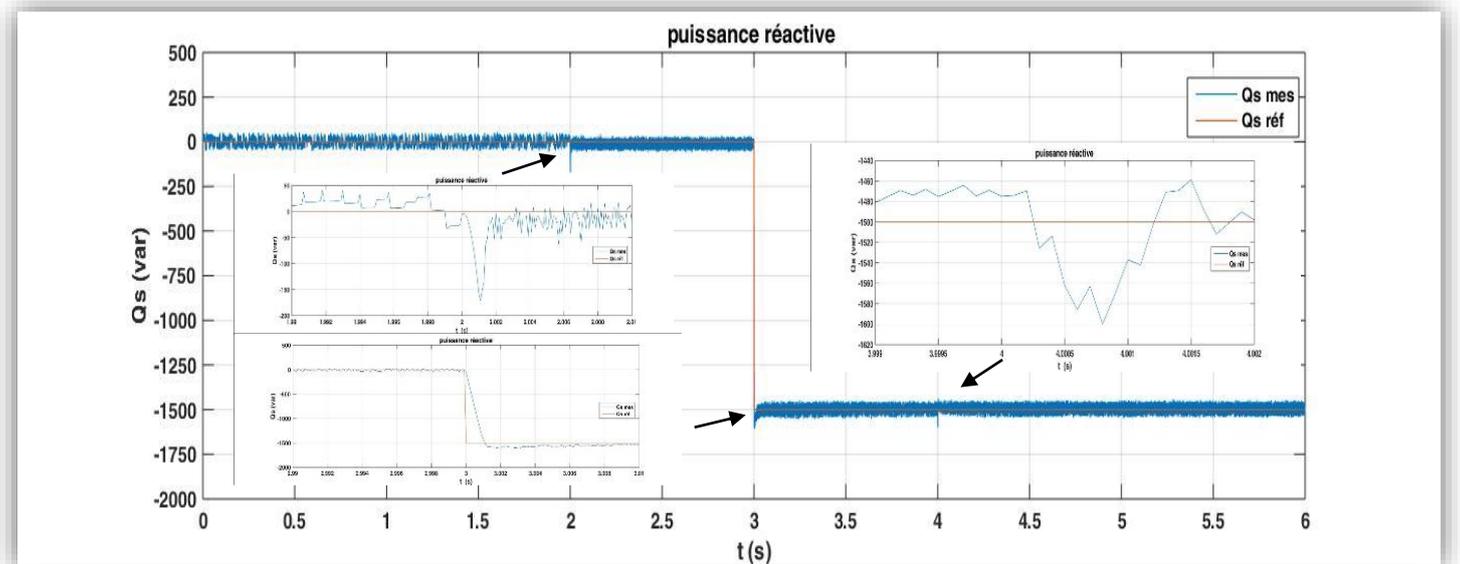


Figure 2.22 Variation de la Puissance réactive

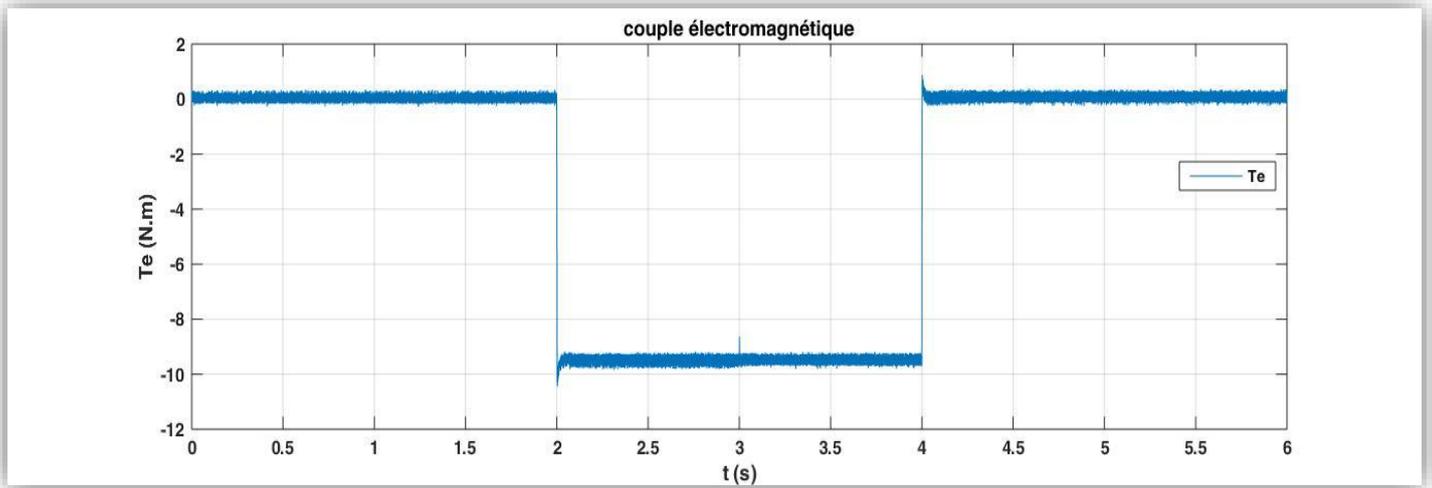


Figure 2.23 Variation du couple électromagnétique

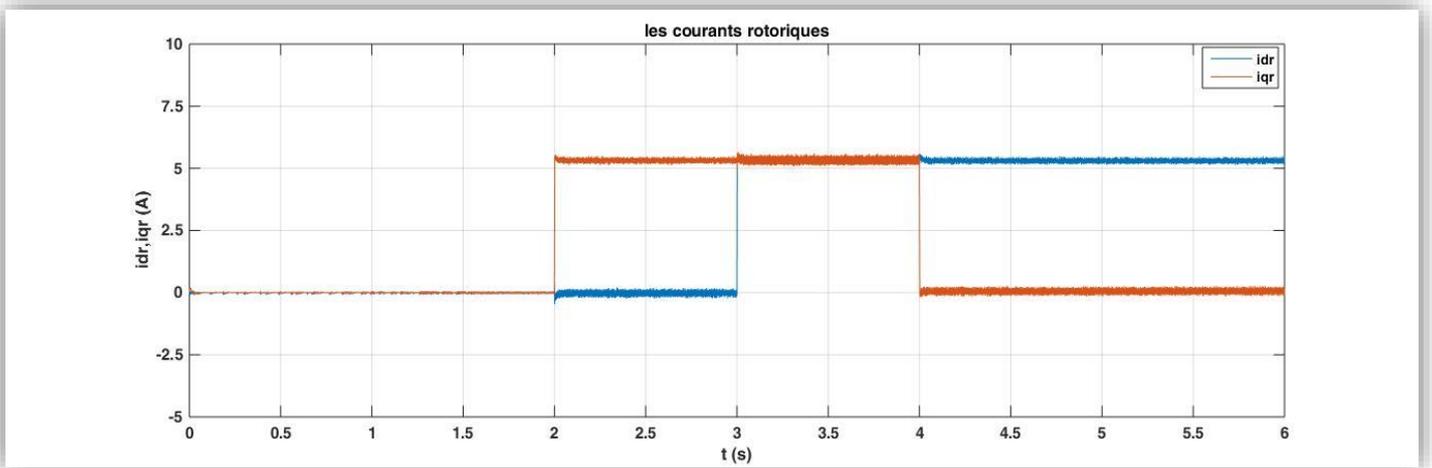


Figure 2.24 Variation des courants rotoriques

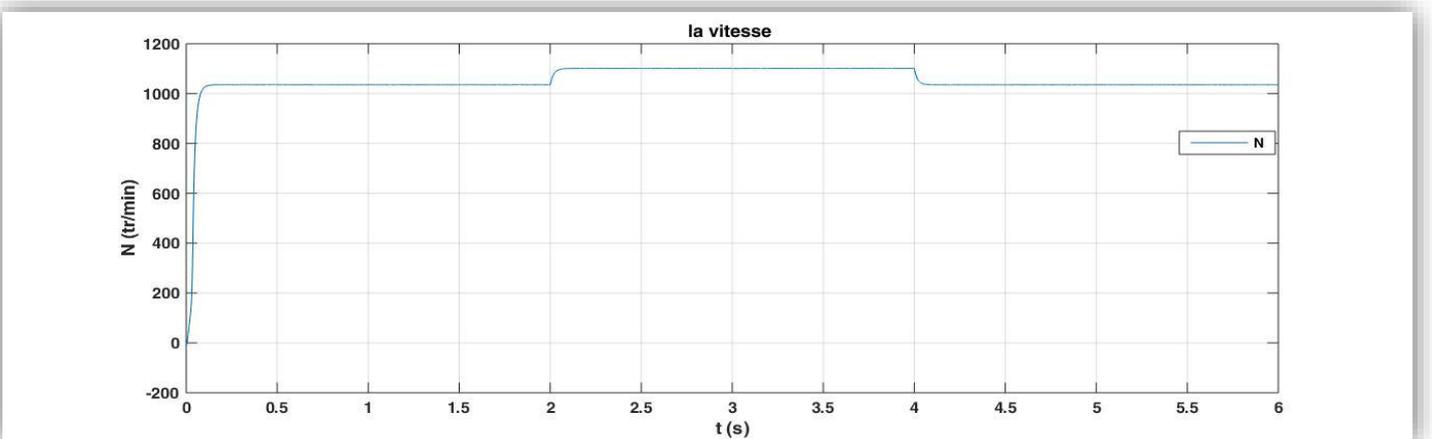


Figure 2.25 Variation de la vitesse

### **Interprétation des résultats :**

La figure démontre que notre système présente une dynamique satisfaisante et une erreur statique très petite.

Que ce soit pour la puissance active ou réactive, On observe une dynamique qui réagit rapidement pour la puissance réactive et celle de la puissance active du stator et sans dépassement.

Les échelons sont correctement suivis et il n'y a plus d'erreur sur les puissances. Le couplage entre les deux puissances est très faible et peu perceptible.

Cette commande est donc plus performante que la commande directe qui présentait plus de perturbations entre les deux puissances

### **II. 7 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle, en régime quelconque, de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park lié au champ tournant

Ensuite, on a modélisé le système d'alimentation qui comporte le redresseur, le filtre et l'onduleur, on a appliqué la technique de la MLI à triangulo-sinusoïdale pour le commander. La modélisation de la MADA et de son système d'alimentation a pour but de faciliter la mise en œuvre de la commande.

Dans la deuxième partie ça nous a permis d'étudier et d'appliquer la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique de la génératrice asynchrone à double alimentation.

Le choix de l'orientation du flux a été pris en orientant le flux statorique selon l'axe d. La méthode du flux orienté est appliquée depuis quelques années à la GADA elle reste la méthode la plus répandue. En effet, celle-ci nous permet non seulement de simplifier le modèle de la machine mais aussi de découpler la régulation du couple et celle du flux.

A partir de la simulation numérique, on a constaté qu'effectivement la technique d'orientation du flux statorique permet de découpler le flux et les puissances de sorte que la composante directe du courant rotorique contrôle la puissance réactive, et la composante en quadrature contrôle la puissance active. Ceci nous permet d'obtenir des performances dynamiques élevées similaires à celle de la MCC.

Pour améliorer les performances obtenues par le PI classique ; une autre technique de commande sera présentée et utilisée, à savoir le mode glissant. Le but du prochain chapitre est de présenter les aspects du mode glissant et son application au contrôle de machine asynchrone à double alimentation à flux statorique orienté.

# **CHAPITRE 3**

## **COMMANDE PAR MODE GLISSANT DE LA GADA**

### III .1 Introduction

Nous avons vu précédemment que la commande vectorielle à régulateurs PI, donne de bons résultats dans le cas où le système est linéaire à paramètres constants. Cependant, elle reste très limitée pour un système non linéaire ayant des paramètres variables, dans ce cas, on doit faire appel à une technique qui répond aux exigences dont l'insensibilité aux variations de paramètres et aux perturbations.

La technique de commande à structure variable (VSC) par mode glissant (de l'anglais Sliding Mode Control), est très connue par sa robustesse envers les incertitudes internes (variations des paramètres de la machine), et externes (perturbation due à la charge), et aux phénomènes ayant été omis dans la modélisation, toute en ayant une très bonne réponse dynamique.

L'étude présentée dans ce chapitre est consacré dans un premier temps aux quelques éléments de la théorie et une présentation générale des concepts de base de la commande par mode glissant. Son principe et ses propriétés de robustesse. Dans un second temps, on applique la commande par mode glissant à une machine asynchrone à double alimentation. Et enfin, nous montrons les avantages apportés par ce type de réglage par rapport à ceux obtenus par les régulateurs classiques PI, après illustration et visualisation des résultats de simulation.

### III .2 Généralités sur la théorie du contrôle par mode glissant

#### III .2.1 Historique

La théorie du mode glissant est le prolongement de l'étude des systèmes à structure variable. Les premiers travaux concernant ces systèmes de commande ont été proposés et élaborés au début des années 50 par Emelyanov, puis par d'autres chercheurs comme Utkin à partir des résultats des études du mathématicien Filipov.

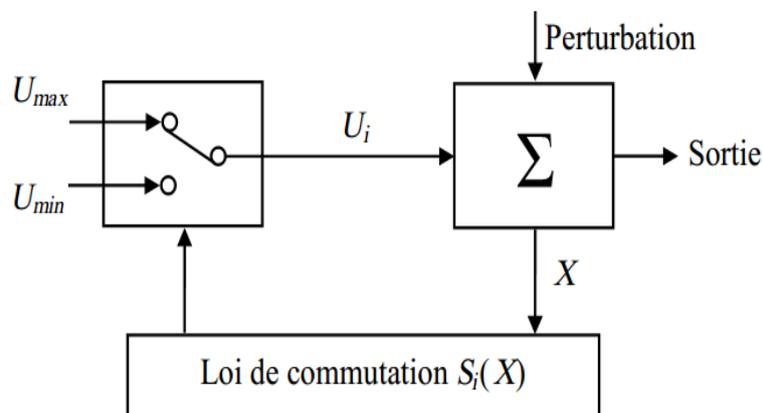
Par la suite, ces travaux ont été repris ailleurs, soit pour compléter l'étude théorique, soit pour étudier quelques applications. Aux Etats-Unis, cette théorie est introduite par Slotine et au Japon par Young, Harasma et Hashimoto. Il a fallu attendre les années 80, pour que le concept de cette théorie trouve ses applications dans plusieurs domaines notamment dans les systèmes de commande et serait parmi les techniques de contrôle non linéaire les plus efficaces et les plus robustes [28].

### III .2.2 Structures de la commande par mode glissant

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode glissant, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes. La première correspond à la structure la plus simple où la commutation a lieu au niveau de l'organe de commande lui-même. On l'appellera, structure par commutation au niveau de l'organe de commande. La deuxième structure fait intervenir la commutation au niveau d'une contre-réaction d'état. Enfin, la dernière forme est une structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la "commande équivalente". Cette dernière est retenue pour la suite de notre étude.

#### III .2.2.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande

Le schéma d'une structure par commutation au niveau de l'organe de commande est donné sur la figure 3.1. Cette structure de commande est la plus classique et la plus employée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'applications aux variateurs de vitesse. Elle a été utilisée pour la commande des moteurs pas-à-pas [48].

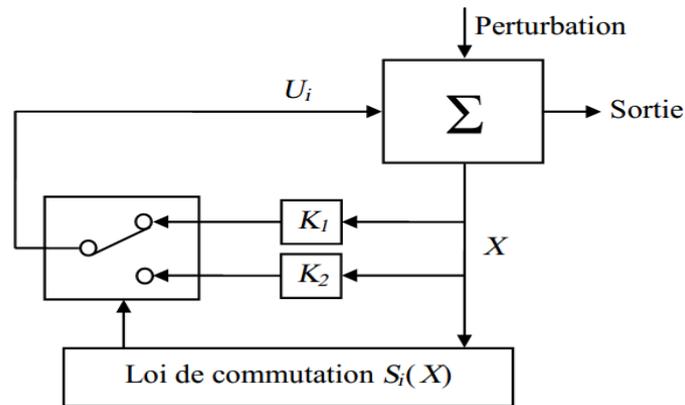


**Figure 3.1 : Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.**

#### III .2.2.2 Structure par commutation au niveau d'une contre-réaction d'état

Nous pourrions consulter le schéma d'une telle structure sur la figure 3.2. D'après des études menées précédemment, c'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle a été mise en œuvre dans la commande des moteurs à courant continu et à aimants permanents, ainsi que dans la commande de machines à induction. Cette structure s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique où le

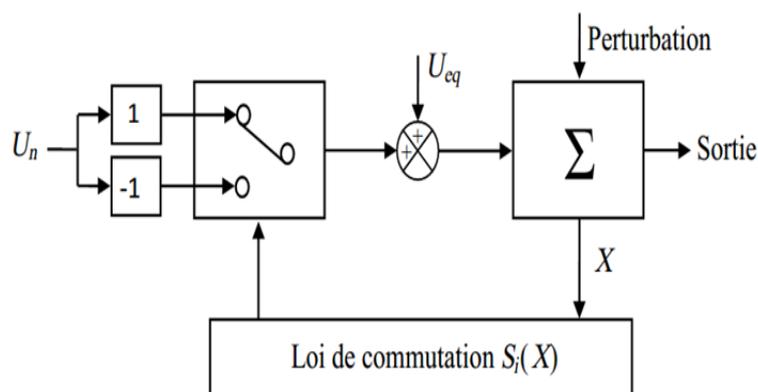
réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de réglage. Le non linéarité provient de la commutation entre les gains, donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système [48].



**Figure 3.2 : Structure de régulation par commutation au niveau de la contre réaction d'état.**

### III .2.2.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente

Une telle structure dont le principe est montré sur la figure 3.3 présente un réel avantage. Elle permet de pré-positionner l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente [48].



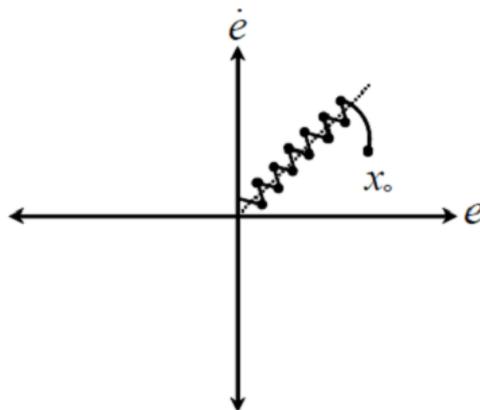
**Figure 3.3 : Structure de régulation par ajout de la commande équivalente.**

Nous avons choisi de baser notre étude sur ce type de configuration de la commande, pour plusieurs raisons [48] :

- une telle structure, de par sa constitution, est très simple et permet de moins solliciter la commande. Il nous semble en effet naturel d'ajouter la commande équivalente pour pré-positionner le système dans un état désiré permanent et stable, et de jouer ensuite sur le terme de commutation pour assurer la convergence vers cet état et pour y rester ensuite.
- cette méthode de commande a déjà été abordée dans des travaux de recherches. Les auteurs mentionnent des résultats très satisfaisants pour des applications robotiques ainsi que pour des applications utilisant des machines à induction.
- nous avons voulu placer notre étude dans un cas original en utilisant une structure peu connue et peu usitée.

### III .3 Principe de la commande par mode de glissement des systèmes a structure variable

La commande par mode glissant est une classe de la commande à structure variable, elle est efficace et robuste pour les systèmes linéaires et non linéaires [26]. Il s'agit de définir d'abord une surface dite de glissement qui représente la dynamique désirée, puis synthétiser une loi de commande qui doit agir sur le système en deux phases. Dans la première, on force le système à rejoindre cette surface, et dans la seconde phase on doit assurer le maintien de glissement le long de cette surface pour atteindre l'origine du plan de phase comme montré sur la figure 3.4 [44].



**Figure 3.4 : Modes de fonctionnement dans le plan de phase.**

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes [44]:

- ❖ **Le mode de convergence (MC) :** durant lequel la variable à réguler se déplace à partir de n'importe quel point du plan de phase vers la surface de commutation  $S(X) = 0$  et l'atteint dans un temps fini. Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.

- ❖ **Le mode de glissement (MG) :** durant lequel la variable d'état a atteint la surface glissante et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique dans ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement  $S(X) = 0$ .
- ❖ **Le mode de régime permanent (MRP) :** il est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre. Il caractérise la qualité et la performance de la commande. Il est utilisé spécialement pour l'étude des systèmes non linéaires.

### III.4 Conception de la commande par mode glissant

La conception de la commande par mode de glissement prend en compte les problèmes de stabilité et de bonnes performances de façon systématique dans son approche. En général, pour réaliser ce type de commande trois étapes doivent être effectuées [28] :

- Choix de la surface de glissement ;
- Détermination des conditions d'existence du régime glissant ou conditions d'accès ;
- Synthèse des lois de commande du mode glissant.

#### III.4.1 Choix de la surface de glissement

Le choix de la surface de glissement concerne non seulement le nombre nécessaire de ces surfaces, mais également leurs formes en fonction de l'application et de l'objectif visé. Le procédé le plus judicieux et le plus simple consiste à choisir une surface de commutation égale au vecteur erreur du vecteur d'état [28]. Considérons le système non linéaire présenté sous la forme suivante [29] :

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + B(x, t) u(x, t) \quad (3.1)$$

Où :  $x \in R^n$  est le vecteur d'état,  $u \in R^m$  le vecteur de commande, avec  $n > m$  et  $f(x, t)$ ,  $B(x, t)$  sont deux fonctions continues et incertaines supposées bornées.

Généralement, le nombre des surfaces de glissement est choisi égal à la dimension du vecteur de commande. La surface de glissement est une fonction scalaire telle que la variable à régler glisse sur cette surface et tend vers l'origine du plan de phase. Plusieurs formes de la surface de glissement ont été proposées dans la littérature, chacune présente des meilleures performances pour une application donnée [29]

La surface la plus utilisée pour obtenir le régime de glissement qui garantit la convergence de l'état vers sa référence (donné par Slotine) [30], est définie par :

$$S(x) = \left( \frac{d}{dt} + \delta \right)^{r-1} e(x) \quad (3.2)$$

Avec :

- $\delta$ : Gain positif ;
- $e(x) = x_d - x$  : écart de la variable à réguler ;
- $r$  : est le degré relatif au nombre qu'il faut dériver la sortie pour faire apparaître la commande, tel que :  $\frac{\partial S}{\partial u} \neq 0$  assurant la contrôlabilité ;
- $S(x)$  est une équation différentielle linéaire autonome dont la réponse  $e(x)$  tend vers zéro pour un choix correct du gain  $\delta$  et c'est l'objectif de la commande.

### III .4.2 Conditions de convergence et d'existence

Les conditions de convergence permettent aux dynamiques du système de converger vers les surfaces de glissement. Nous retenons de la littérature deux conditions, celles -ci correspondent au mode de convergence de l'état du système [22], [44].

#### III .4.2.1 Fonction directe de commutation

C'est l'approche la plus ancienne, a été proposée et étudiée par Emilyanov et Utkin [28]. Elle est exprimée par :

$$S(x) \dot{S}(x) < 0 \quad (3.3)$$

Dans cette condition, il faut introduire pour  $S(x)$  et sa dérivée  $\dot{S}(x)$ , les valeurs justes à gauche et à droite de commutation [44].

#### III .4.2.2 Fonction de Lyapunov

L'approche de Lyapunov est une condition globale d'accès au mode glissant. Il s'agit de formuler une fonction scalaire positive  $V(x) > 0$  pour les variables d'état du système, et de choisir la loi de commutation qui fera décroître cette fonction (i.e.  $\dot{V}(x) < 0$ ). Cette fonction est généralement utilisée pour garantir la stabilité des systèmes non linéaires [47].

En définissant la fonction de Lyapunov par :

$$V(x) = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (3.4)$$

Et sa dérivée par :

$$\dot{V}(x) = S(x) \dot{S}(x) \quad (3.5)$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer que sa dérivée est négative. Ceci est vérifié si :

$$S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (3.6)$$

L'équation (3.6) signifie que le carré de la distance vers la surface mesuré par  $S^2(x)$  diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface dans les deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal où la fréquence de commutation est infinie [22]

### III .4.3 Synthèse des lois de commande du mode glissant

Une fois la surface de glissement et le critère de convergence choisis, il reste à déterminer la commande nécessaire pour atterrir la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre en maintenant la condition d'existence du mode glissant [22].

Pour mettre en évidence le développement des lois de commande par mode glissant, nous considérons le système défini dans l'espace d'état par l'équation (3.1). Soit :

$$\dot{x}(t) = f(x, t) + B(x, t) u(x, t) \quad (3.7)$$

Afin d'assurer l'attractivité et l'invariance de la surface de glissement, on doit définir une loi de commande sous la forme suivante [28]:

$$u = u_{eq} + u_n \quad (3.8)$$

Telle que  $u_{eq}$  est la commande équivalente définie par Utkin, et  $u_n$  est la commande discrète.

#### III .4.3.1 La Commande équivalente

La première étape, est de définir une entrée  $u_{eq}$ , de telle façon que la trajectoire d'état reste sur la surface de commutation  $S(x) = 0$ .

La dérivée de la surface  $S(x)$  est [31] :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \cdot \frac{\partial x}{\partial t} \quad (3.9)$$

En remplaçant (3.7) et (3.8) dans (3.9), on trouve :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \left[ f(x, t) + B(x, t) u_{eq} \right] + \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) u_n \quad (3.10)$$

La commande équivalente est déterminée durant la phase de glissement et la phase du régime permanent en identifiant que  $S(x) = 0$ , et par conséquent  $\dot{S}(x) = 0$ , et  $u_n = 0$  [44] [26].

Dans ces conditions la solution de l'équation (3.10) est alors :

$$u_{eq} = - \left[ \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \right]^{-1} \frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \quad (3.11)$$

Avec la condition que:  $\frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) \neq 0$ .

Une fois  $u_{eq}$  défini, (3.11) est substituée dans le système (3.10), pour avoir la nouvelle expression de la dérivée de la surface :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) u_n \quad (3.12)$$

La commande  $u_{eq}$  peut être interprétée comme étant la valeur moyenne que prend la commande  $u$  lors des commutations rapides entre  $u_{max}$  et  $u_{min}$  figure 3.5 [31] [44].

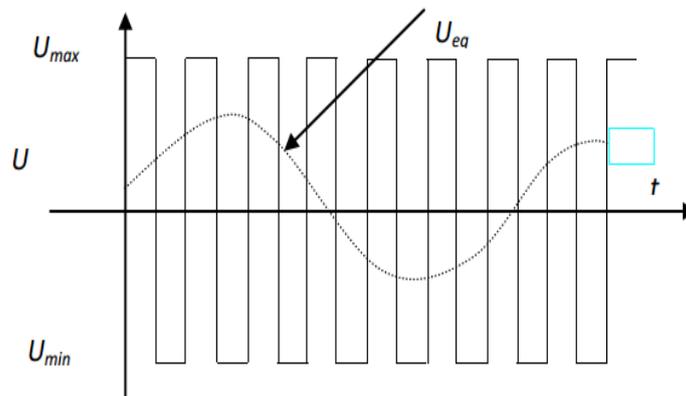


Figure 3.5 : Commande équivalente  $u_{eq}$ .

### III .4.3.2 La Commande discontinue de base

La commande  $u_n$ , est définie durant le mode de convergence et doit satisfaire la condition  $S \dot{S} < 0$ .

C'est-à-dire :

$$S(x) \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t) u_n < 0 \quad (3.13)$$

Afin de satisfaire cette condition, le signe de  $u_n$  doit être opposé à celui de  $S(x) \frac{\partial S}{\partial x} B(x, t)$ . Généralement la commande discrète en mode glissant peut prendre la forme de type relais représenté par la fonction « *sig* » figure 3.6 [28] :

$$u_n = K \cdot \text{sing}(S(x))$$

37

$$\text{sing}(S(x)) = \begin{cases} 1 & \text{si } S(x) > 0 \\ -1 & \text{si } S(x) < 0 \end{cases}$$

Où  $K$  est un gain positif.

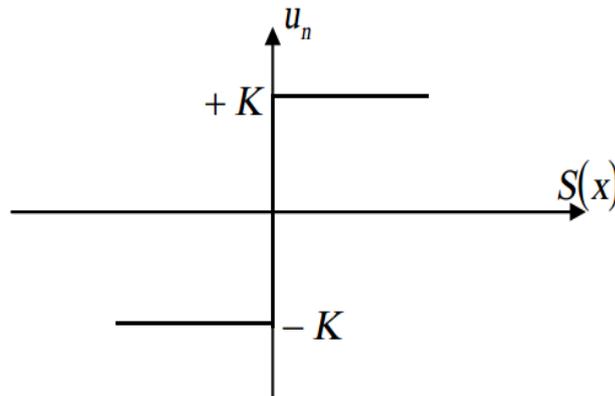


Figure 3.6 : Fonction « *sing* ».

### III .4.3.3 Phénomène de broutement " Chattering "

Le principal inconvénient de la commande de type relais réside dans le phénomène bien connu de " chattering ". En régime permanent, ce dernier apparaît comme une oscillation de haute fréquence autour du point d'équilibre, à cause de la nature très discontinue de la fonction signe. Ce phénomène de chattering ou broutement est un sérieux obstacle pour les applications de commande par mode de glissement, car les oscillations dues à ce phénomène peuvent nuire le fonctionnement du circuit de puissance [26]. Ce phénomène est presque toujours problématique et des efforts de recherche significatifs ont été dirigés de sorte à éliminer ou du moins réduire ses effets. L'une des solutions envisagées consiste à introduire une bande d'arrêt autour de la surface de commutation. Pour ce faire, il suffit de substituer une fonction de saturation (voir Figure 3.7) à la fonction signe dont les discontinuités au voisinage de zéro sont moins brutales. Cette fonction de saturation peut être exprimée par :

$$u_n = K \cdot \text{sat}(S(x)) = \begin{cases} \frac{1}{\varepsilon} K \cdot S(x) & \text{si } |S(x)| < \varepsilon \\ K \cdot \text{sing}(S(x)) & \text{si } |S(x)| > \varepsilon \end{cases}$$

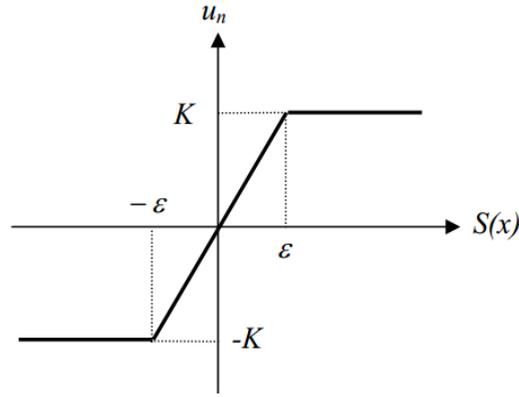


Figure 3.7 : Commande adoucie « sat ».

### III .5 Application de la commande a régime glissant a la GADA

#### III .5.1 Contrôle de la puissance active

Pour contrôler la puissance active on prend  $r=1$ , l'expression de la surface de contrôle de la puissance active a pour forme :

$$S(P) = P_{ref} - P_s \quad (3.14)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(P) = \dot{P}_{ref} - \dot{P}_s \quad (3.15)$$

Comme nous l'avons montré dans le chapitre précédent, la puissance active peut être donnée (contrôlée) en fonction du courant  $I_{qr}$

On remplace l'expression de la puissance active (2.34) dans (3.15) :

$$\dot{S}(P) = \left( \dot{P}_{ref} + V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{qr} \right) \quad (3.16)$$

On tire l'expression du courant  $\dot{I}_{qr}$  de l'équation de la tension  $V_{qr}$  (2.36)

$$\dot{S}(P) = \dot{P}_{ref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} \left( V_{qr} - R_r I_{qr} - g \omega_s L_r \sigma I_{dr} - g \frac{M V_s}{L_s} \right) \quad (3.17)$$

$$\text{Avec : } \sigma = \left( 1 - \frac{M^2}{L_r L_s} \right)$$

En remplaçant l'expression de  $V_{qr}$  par  $V_{qr.eq} + V_{qr.n}$  commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$\dot{S}(P) = \dot{P}_{ref} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} \left( (V_{qr.eq} + V_{qr.n}) - R_r I_{qr} - g \omega_s L_r \sigma I_{dr} - g \frac{M V_s}{L_s} \right) \quad (3.18)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :  $S(P) = 0, \dot{S}(P) = 0$ , et  $V_{qr.n} = 0$ .

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente  $V_{qr.eq}$  qui s'écrit :

$$V_{qr.eq} = -\frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} P_{ref} \dot{ } + \left( R_r I_{qr} + g \omega_s L_r \sigma I_{dr} + g \frac{M V_s}{L_s} \right) \quad (3.19)$$

Et

$$V_{qr.n} = K_{Vqr} \text{sign}(S(P)) \quad (3.20)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre  $K_{Vqr}$  doit être positif.

### III .5.2 Contrôle de la puissance réactive

Pour  $r=1$ , l'expression de la surface de contrôle de la puissance réactive a pour forme :

$$S(Q) = Q_{ref} - Q_s \quad (3.21)$$

La dérivée de la surface est :

$$\dot{S}(Q) = \dot{Q}_{ref} - \dot{Q}_s \quad (3.22)$$

On remplace l'expression de la puissance réactive (2.34)

$$\dot{S}(Q) = \left( \dot{Q}_{ref} + V_s \frac{M}{L_s} \dot{I}_{dr} - \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} \right) \quad (3.23)$$

On tire l'expression du courant  $\dot{I}_{dr}$  de l'équation de la tension  $V_{dr}$  (2.36)

$$\dot{S}(Q) = \dot{Q}_{ref} - \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} (V_{dr} - R_r I_{dr} + g \omega_s L_r \sigma I_{qr}) \quad (3.24)$$

D'où l'expression de  $V_{dr} = V_{dr.eq} + V_{dr.n}$

En remplaçant cette expression dans l'équation (3.24), nous trouvons :

$$\dot{S}(Q) = \dot{Q}_{ref} - \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} + V_s \frac{M}{L_s L_r \sigma} \left( (V_{dr.eq} + V_{dr.n}) - R_r I_{dr} + g \omega_s L_r \sigma I_{qr} \right) \quad (3.25)$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :  $S(Q) = 0, \dot{S}(Q) = 0$ , et  $V_{dr.n} = 0$ .

D'où nous déduisons :

$$V_{dr.eq} = -\frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} \dot{Q}_{ref} + \frac{L_s L_r \sigma}{V_s M} \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} + (R_r I_{dr} - g \omega_s L_r \sigma I_{qr}) \quad (3.26)$$

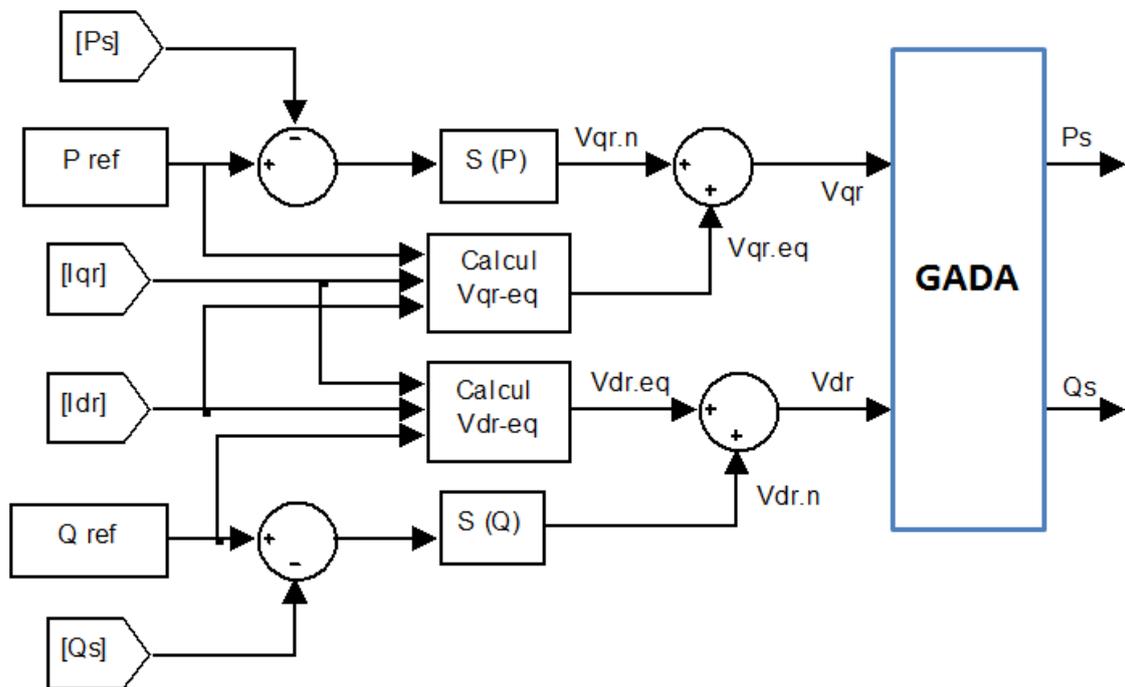
Et

$$V_{dr.n} = K_{Vdr} \text{sign}(S(Q)) \quad (3.27)$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre  $K_{Vdr}$  doit être positif.

### III .5.3 Résultats de la simulation

Pour illustrer les performances de la commande par mode glissant appliquée à une GADA, un schéma bloc du système est proposé dans la figure 3.8.



**Figure 3.8 : Schéma bloc de la structure de commande par mode glissant.**

Nous avons donc soumis ce système à des échelons de puissance active et réactive :

- ❖ Pour la puissance active :
  - De  $t=0s$  à  $t=2s$  : un échelon nulle de 0 W ;
  - De  $t=2s$  à  $t=4s$  : un échelon négatif de -1500 W ;
  - De  $t=4s$  à  $t=6s$  : un échelon nulle de 0 W ;
- ❖ Pour la puissance réactive :
  - De  $t=0s$  à  $t=3s$  : un échelon nulle de 0 VAR ;
  - De  $t=3s$  à  $t=6s$  : un échelon négatif de -1500 VAR ;

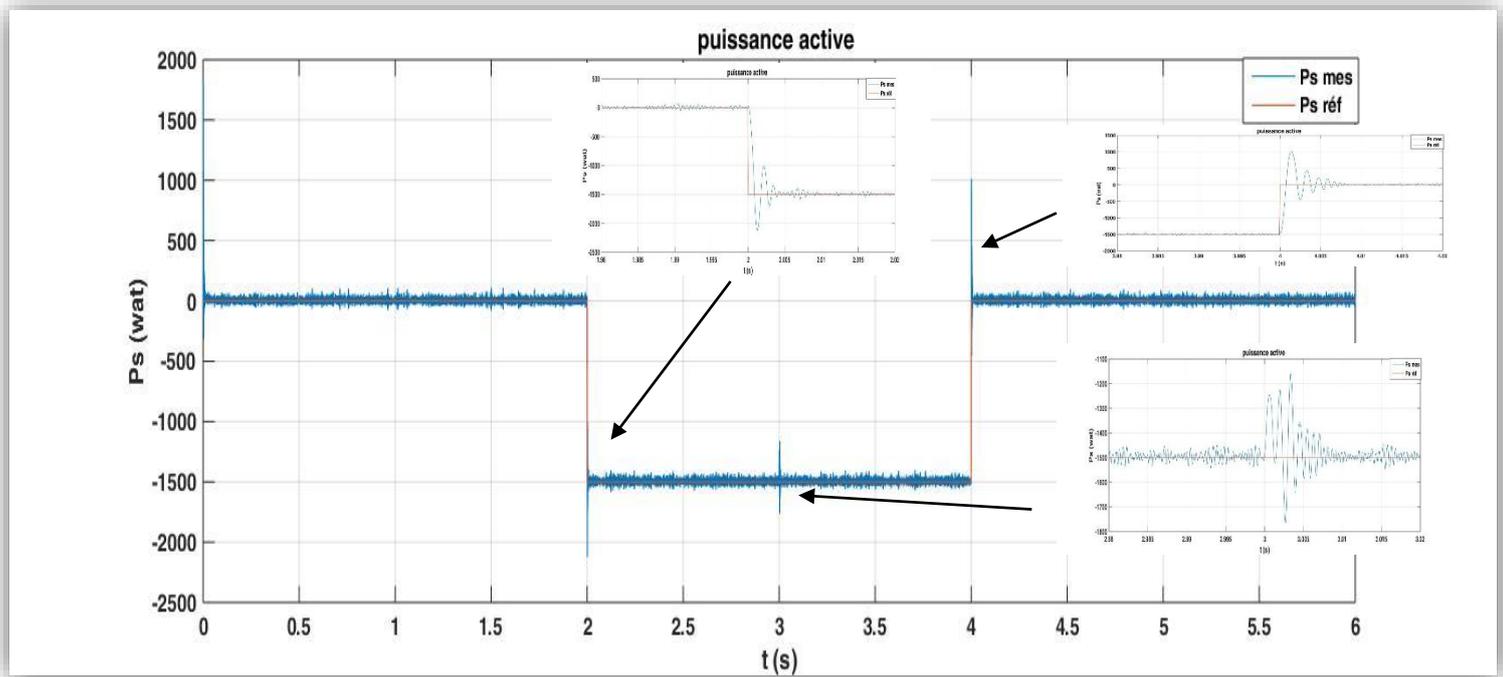


Figure 3.9 variation de la Puissance active

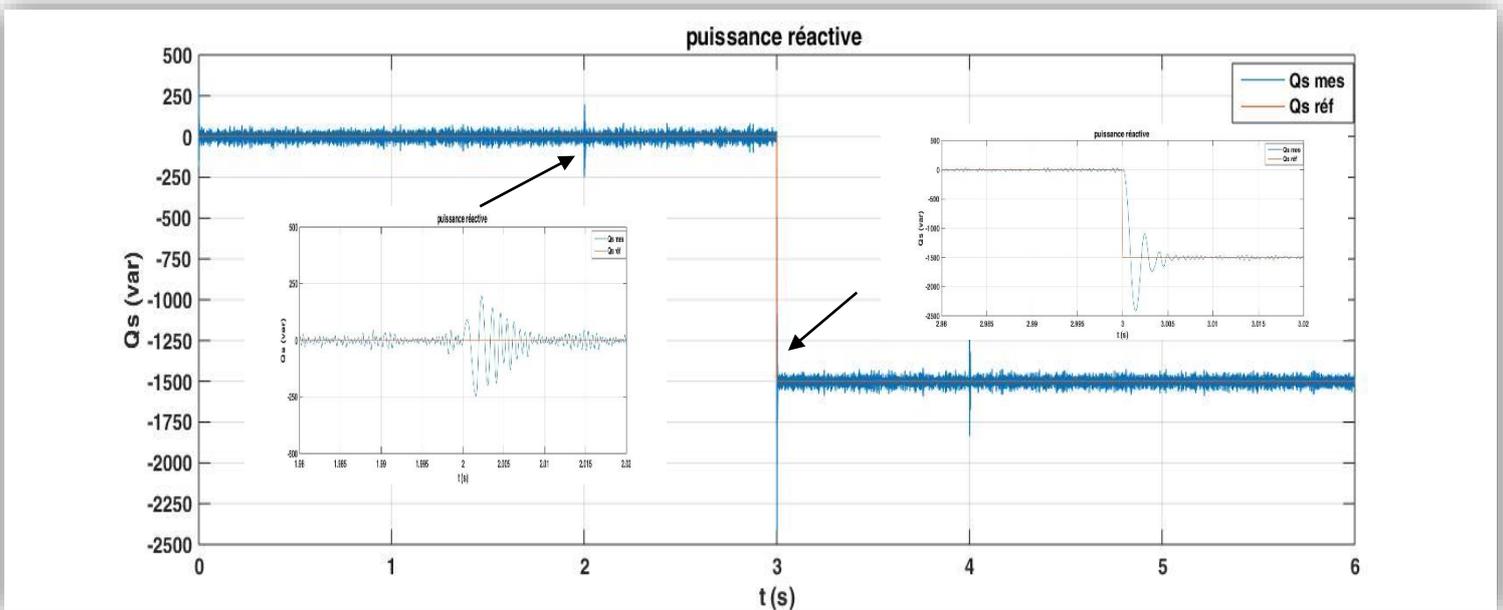


Figure 3.10 variation de la Puissance réactive

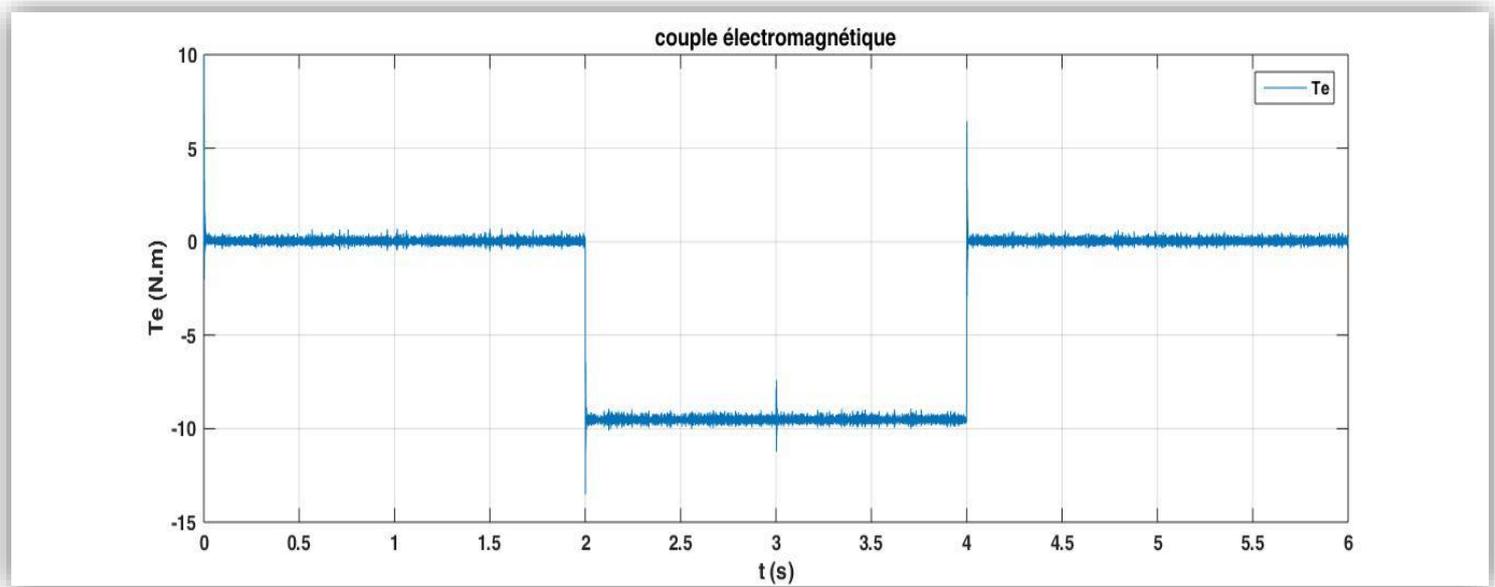


Figure 3.11 variation du Couple électromagnétique

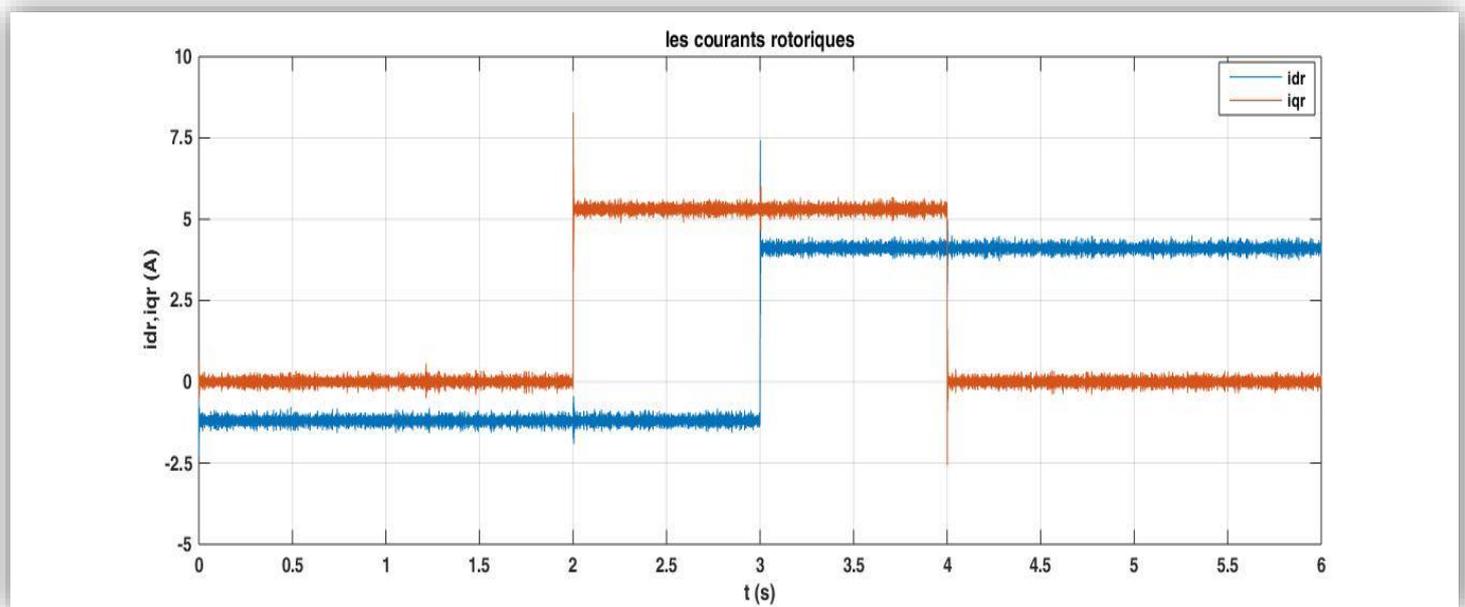
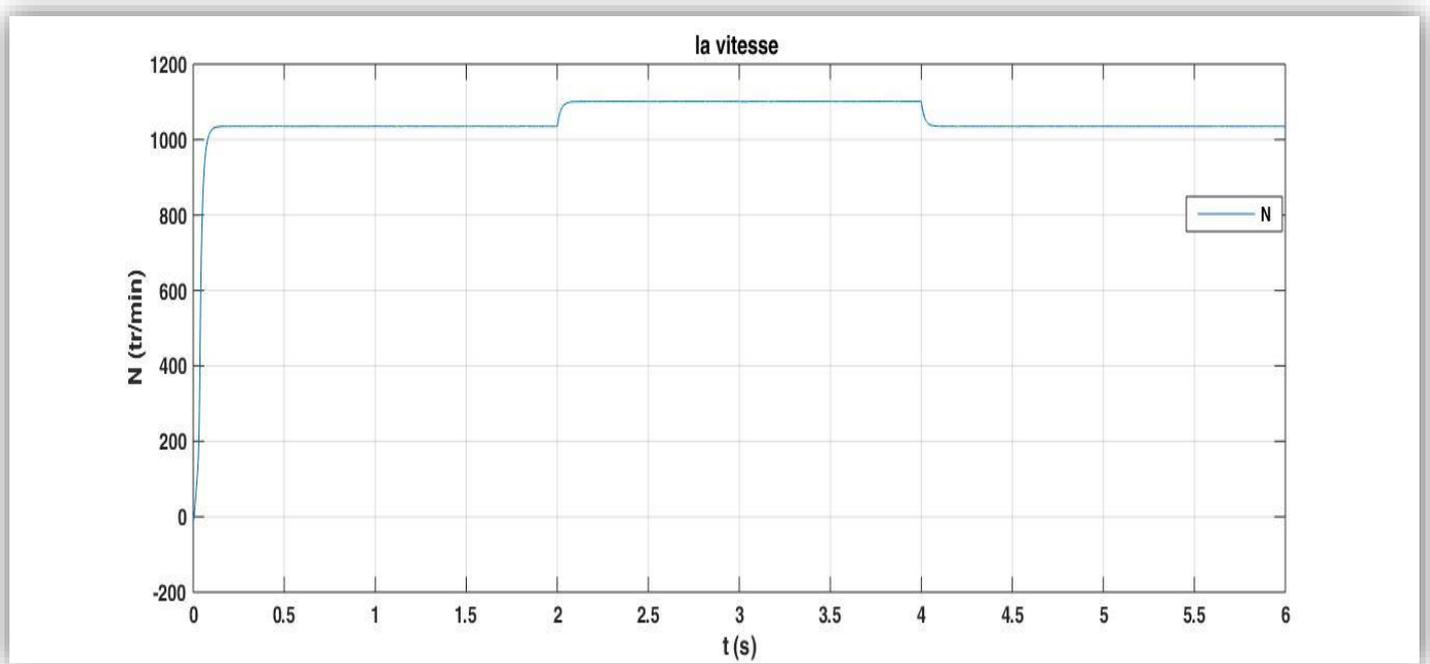


Figure 3.12 variation des courants rotoriques



**Figure 3.13** variation de vitesse

### Interprétation des résultats

Nous pouvons constater à partir la figure (3.9), (3.10) que les performances obtenues avec la commande par mode glissant sont très satisfaisantes comme le montre la poursuite de trajectoire et la convergence rapide des grandeurs mesurées vers leur référence désirée, et nettement amélioré au niveau dynamique par rapport au régulateur PI.

Le couple électromagnétique prend la forme de la puissance active on passe de 0 N.m dans le temps (0 à 2 s), après 2s jusqu' à 4s il passe à -9.5 N.m et après 4s se stabilise vers une valeur de 0 N.m

Les courants rotoriques prennent les formes de la puissance active et réactive mais au sens positif  $t$  ( $i_{qr}$  prend la forme de  $P_s$  et  $i_{dr}$  prend la forme de  $Q_s$ )

On remarque aussi que la vitesse varie en parallèle avec le couple électromagnétique, elle augment à 1050 tr/min de 0s a 2s, entre 2s jusqu' à 4s elle augment un peu plus fort que la première valeur (à 1100 tr/min), après 4s la vitesse elle diminue jusqu'à prend une valeur stable autour de 1050 tr/min

### III .6 Comparaison entre les commandes par régulateur PI et RMG

Après avoir effectué l'application du régulateur PI et celui par mode de glissement de la puissance active et réactive générée par la GADA on a les figures suivants :

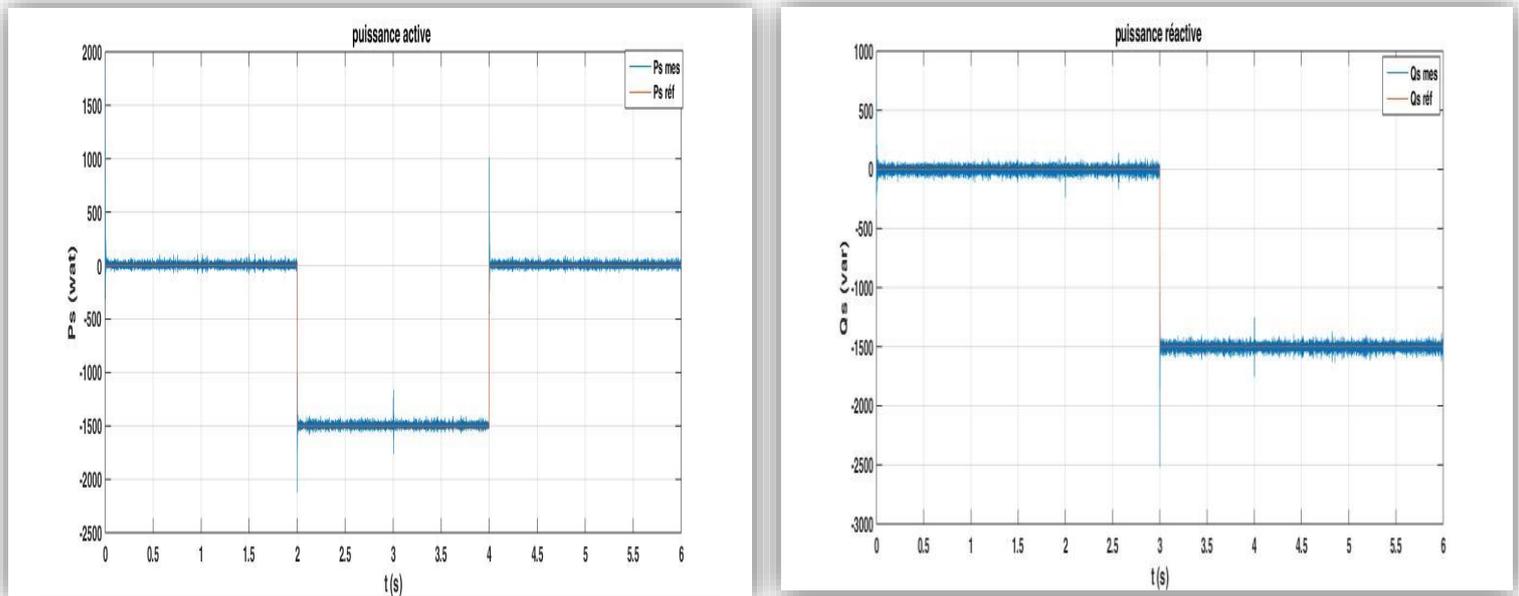


Figure3.14 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par mode glissant.

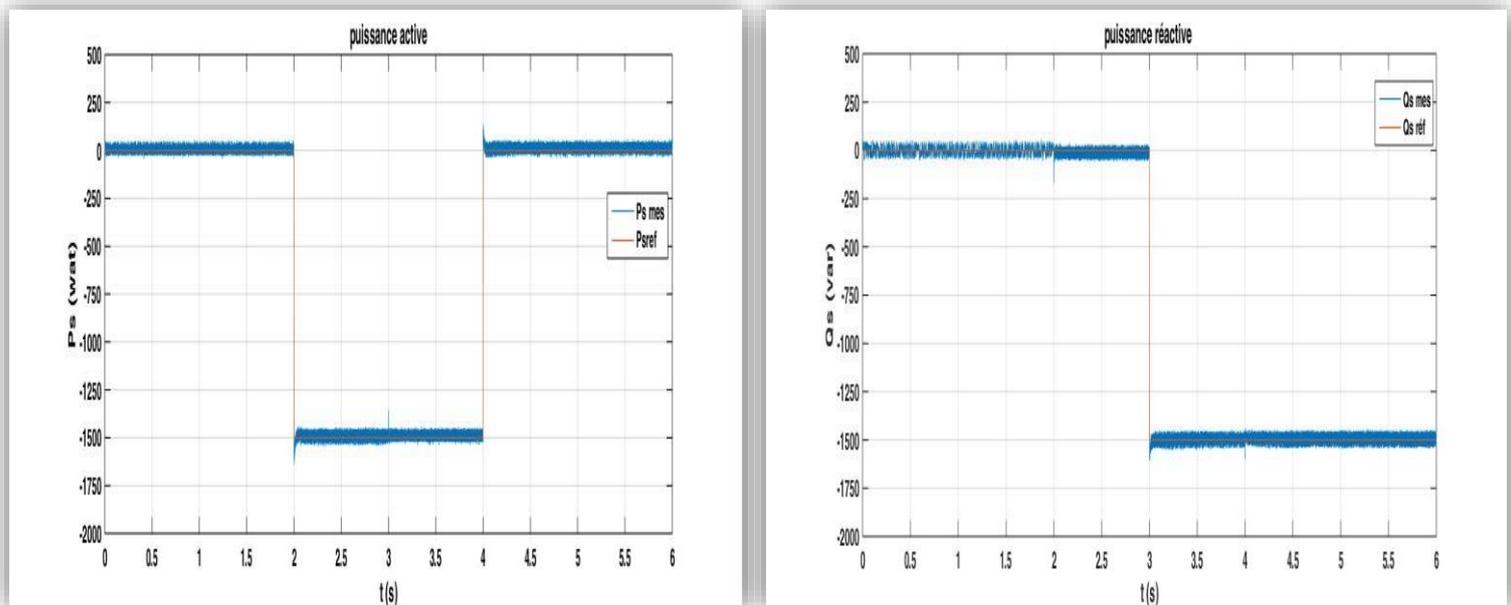


Figure 3.15 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par régulateur PI.

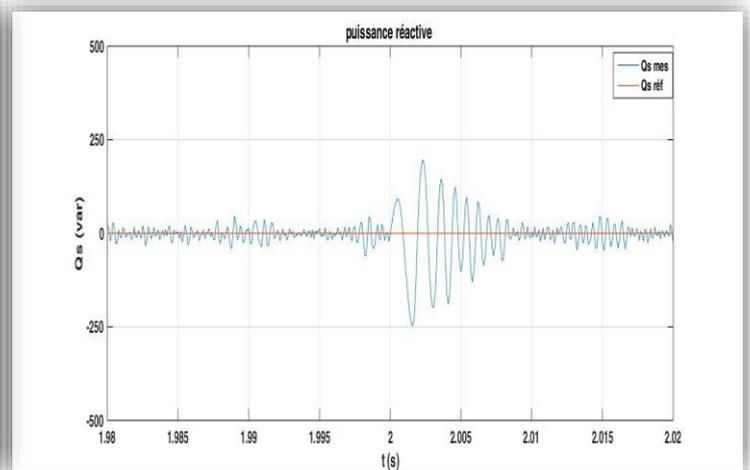
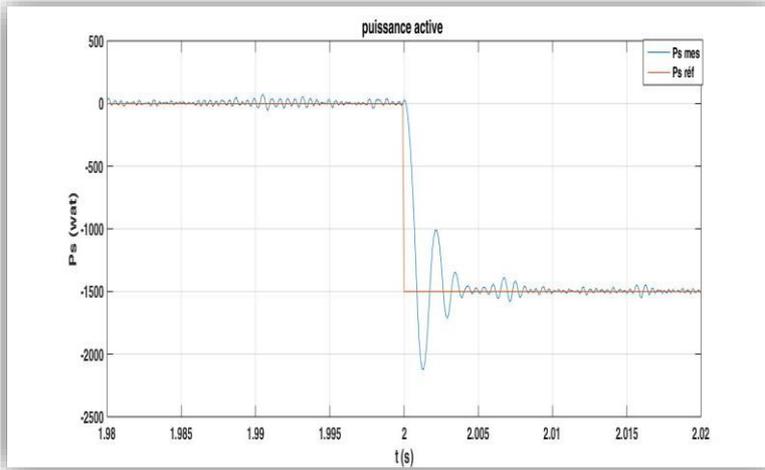


Figure3.16 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par mode glissant à  $t=2$ s.

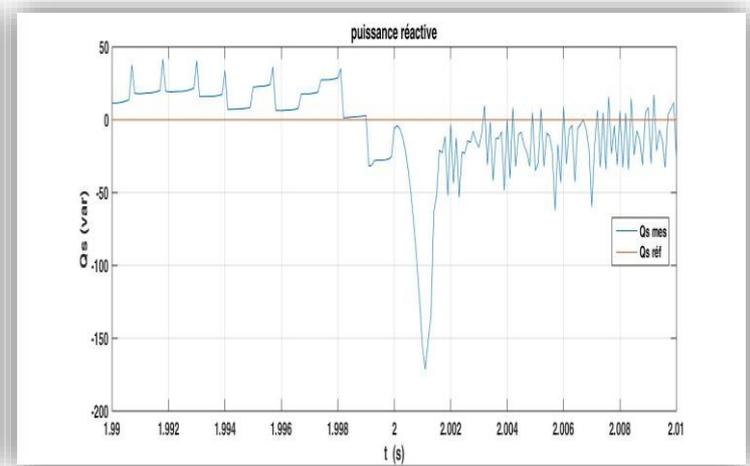
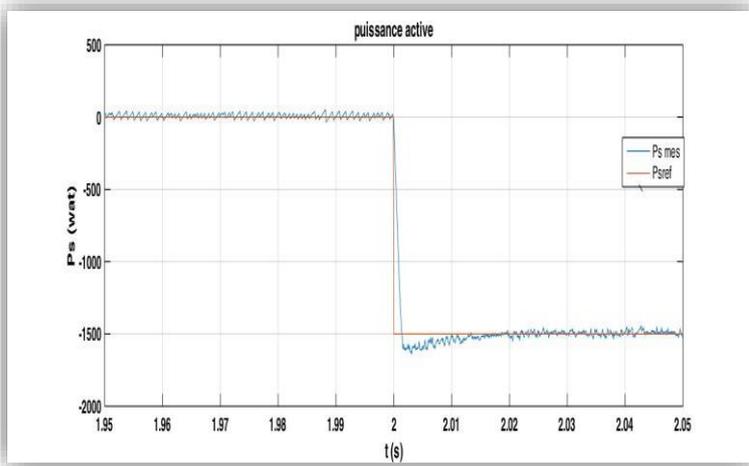


Figure 3.17 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par régulateur PI à  $t=2$ s.

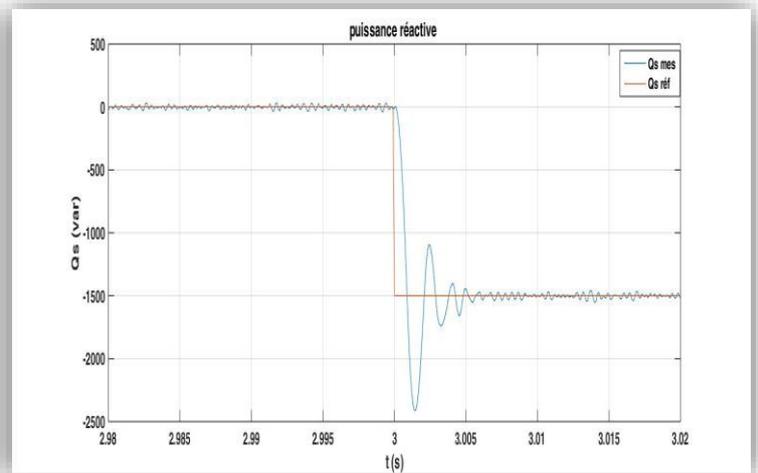
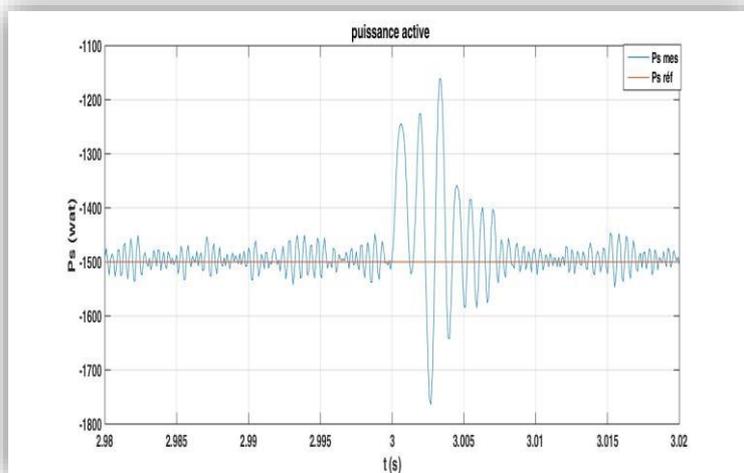


Figure3.18 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par mode glissant à  $t=3$ s.

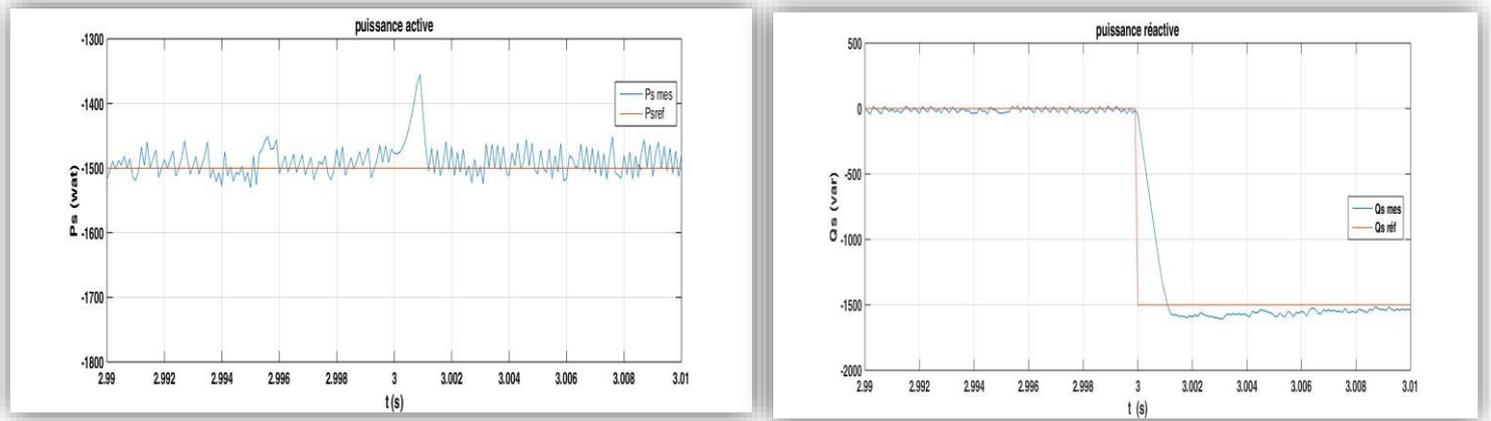


Figure 3.19 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par régulateur PI à  $t=3s$ .

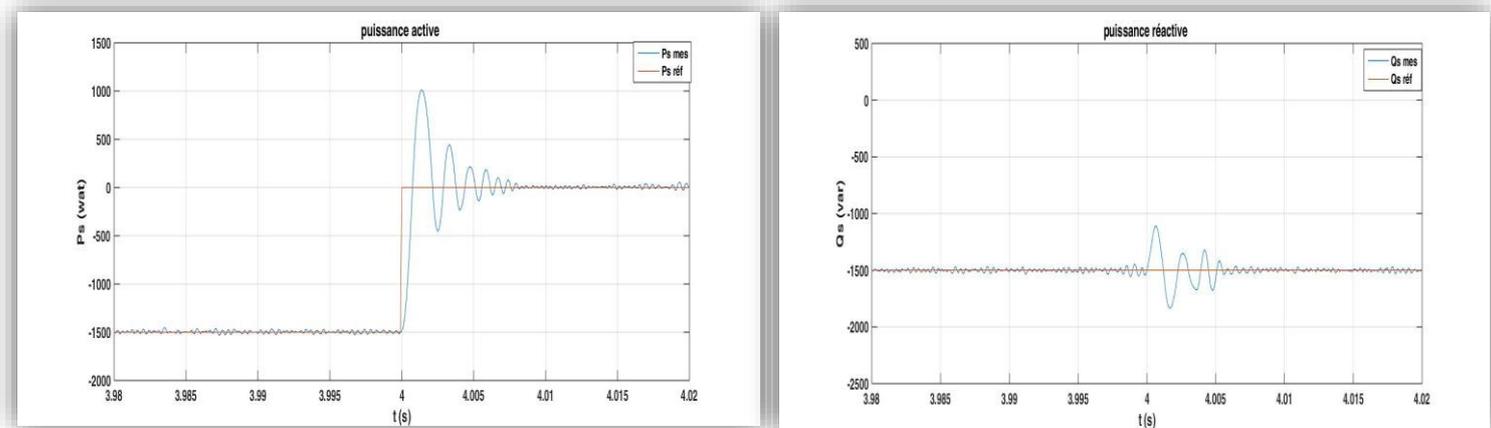


Figure 3.20 Puissances actives et réactives obtenues de la commande par mode glissant à  $t=4s$ .

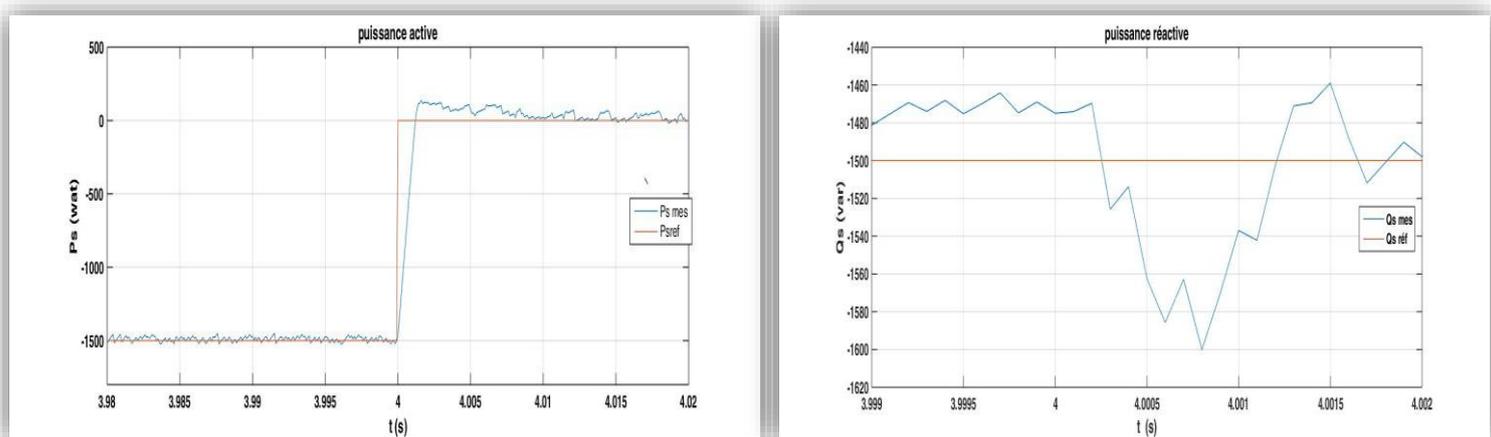


Figure 3.21 : Puissances actives et réactives obtenues de la commande par régulateur PI à  $t=4s$ .

### III .7 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de l'application de la commande à régime glissant à la GADA dont l'objectif principal étant la régulation des puissances actives et réactives. Dans ce contexte nous avons présenté tout d'abord un rappel théorique sur la commande par mode glissant. Ensuite nous avons abordé la conception de la commande avec ses différentes étapes. Puis on a appliqué cette dernière à la GADA, Enfin, des résultats de simulation ont été présentés.

Nous avons présenté dans ce dernier chapitre encore, une étude comparative des résultats obtenus par les deux commandes (commande vectorielle par orientation de flux statorique et la commande par mode de glissement). Ces résultats obtenus dans le cadre de cette application en simulation mettent en valeur les performances de chaque technique de commande (dépassement, robustesse, rapidité...).

Finalement on peut conclure que le réglage par mode de glissement présente une meilleure robustesse que celle de la commande vectorielle, en plus des avantages inhérents à l'utilisateur de la GADA (robustesse, fiabilité), cette robustesse garante une bonne insensibilité aux perturbations et aux incertitudes paramétriques. On ne peut a priori affirmer que telle ou telle méthode est adéquat pour la régulation des puissances active et réactive avec les différents contrôles des grandeurs électriques qui accompagnent cette régulation.

## CONCLUSION GENERALE

L'objectif préalablement défini de ce travail consiste à la modélisation et à la commande d'une chaîne de conversion éolienne par régulateur à mode glissant. A la lumière de l'étude effectuée nous avons vu les étapes successives permettant d'élaborer une stratégie de commande pour une machine asynchrone double alimentation jusqu'à sa mise en œuvre.

Notre travail commence par la présentation des quelques notions sur l'énergie éolienne ainsi que son actualité et la théorie associée à ce domaine. Ensuite nous nous sommes intéressés à la modélisation de la MADA et de son alimentation. Le modèle de la MADA repose sur les équations différentielles décrites dans le référentiel de Park.

Puis, on introduit la commande vectorielle de la MADA avec orientation de flux statorique. Ce contrôle est réalisé avec corrélation par des puissances de référence afin de contrôler l'échange de puissances active et réactive entre le stator, le rotor et le réseau. Nous avons conclu également que ce réglage ne contrôlait pas de manière satisfaisante le régime transitoire, ainsi la variation paramétrique influe sur les performances de la commande.

Pour améliorer la robustesse du système bouclé, nous avons présenté dans le dernier chapitre, la commande par mode glissant d'ordre 1, ainsi que ses avantages « simplification de sa conception, ainsi que sa robustesse vis-à-vis des variations paramétrique ». Nous rappelons également le principal inconvénient de ce type de commande à savoir, l'existence d'un phénomène important de chattering.

Pour la continuité des recherches relatives à ce travail, nous proposons comme perspectives :

- Les conditions de déroulement de notre mémoire nous ont obligés à limiter notre travail à une étude théorique et à des résultats de simulation, il serait donc intéressant de tester, sur un banc expérimental, la validité des algorithmes proposés dans ce travail
- L'établissement d'un modèle de la MADA prenant en compte la saturation magnétique.
- L'utilisation d'autres types de convertisseurs de fréquence, tel que les cyclo convertisseurs et les convertisseurs matriciels adaptés aux grandes puissances.
- L'étude de la MADA associée à d'autres stratégies de commande.
- Il faut aussi rajouter l'étude d'un régulateur par mode glissant d'ordre supérieur à 1 pour éliminer définitivement le phénomène de chattering

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

[1] **Désiré Le GOURIERE**, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982.

[2] **Adam MIRECKI**, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » », thèse de doctorat, université de Toulouse, 2005.

[3] **F. POITIERS** « Étude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie Éolienne » ; Thèse de doctorat en génie électrique, Ecole polytechnique de l'Université De Nantes, 19 Décembre 2003.

[4] **A. BOYETTE** « Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne » ; Thèse de doctorat en génie Électrique, Université Henri Poincaré, Nancy I, 11 Décembre 2006.

[5] **Rachel Baïle**, « analyse et modélisation multi fractales de vitesses de vent. Application à la prévision de la ressource éolienne », thèse de doctorat ; université de corse, 2010

[6] **Luc Moreau**, « modélisation, conception et commande de génératrices à reluctance variable basse vitesse », thèse de doctorat, université de Nantes ; 2005.

[7] **Thomas Ackermann**, Wind Power in Power system, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2005

[8] **J. MARTIN** « Énergies éoliennes » ; Techniques de l'Ingénieur, traité de Génie Énergétique pp. B 8 585 1- B .8 585 21.

[9] Site Internet consacré aux énergies [http : //www.energieplus-lesite.be/index.php ?id=16657](http://www.energieplus-lesite.be/index.php?id=16657)

[10] **M. LAPIE** « Modélisation du Comportement Dynamique des Eoliennes de Moyenne et Forte Puissance a Axe Horizontal », thèse de doctorat. Université des sciences technologie, Lille-I. France, (2005).

[11] **N. MEKKAOUI**, « Contribution à la Modélisation et à la Commande d'une Mini-Centrale Eolienne à Base de Machines à Induction Simple et Double Alimentée », thèse De doctorat. Université de Batna. Algérie, (2004).

- [12] **M. BARAKATI**, « Modeling and Controller Design of a Wind Energy Conversion System Including à Matrix Converter », thèse de doctorat. Université de Waterloo. Canada, (2008)
- [13] **Haritza Camblong**, « minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat, école nationale supérieur d'art et métiers centre de bordeaux, 2003.
- [14] **Abdenour Abdelli**, « optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive » thèse de doctorat, université de Toulouse, 2007.
- [15] **Alexandre Teninge**, « participation aux services système De parcs éoliens mixtes : application en milieu insulaire », thèse de doctorat, institut polytechnique de Grenoble, 2009
- [16] **Farid Merrahi**, « alimentation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation (application à l'énergie éolienne) » mémoire de magister, école nationale polytechnique, 2007
- [17] **Soltane Belakehal**, « conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables », thèse de doctorat, université de Constantine, 2010.
- [18] **N. KASBADJI MMERZOUK**, "Quel avenir pour l'Énergie Éolienne en Algérie?," Bulletin Des Energies Renouvelables, Publication du Centre de Développement des Energies Renouvelables, Semestriel N\_14 Décembre 2008.
- [19] **T. Lubin**, Energies Renouvelables - Eoliennes. 2011 - 2012, Notes de cours - Master SEE M2 -Specialite Energie Electrique.
- [20] **S. El Aïmani**, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension. » Thèse de doctorat - Spécialité : Génie électrique, Ecole Centrale de Lille - Université des Sciences et Technologies de Lille, 2004.
- [21] **E. Hau**, *Windturbines*. Berlin, Springer 2000, 314 pages.
- [22] **Z boudjema** « étude et commande d'un système de production d'électricité recevable locale (énergie éolienne et photovoltaïque) », thèse doctorat en électrotechnique, université djilal liabes, sidi bel-Abbes, Algérie, 2015.
- [23] **A.Meroufel**, «contrôle de la machine asynchrone ».polycopie de cours, université djilal liabes, sidi bel-Abbes, Algérie, 2009.
- [24] **Seguier G et F labrique**, «les convertisseurs de l'électronique de puissance, la conversion continu-alternatif », volume 4, Edition technique et doc. Lavoisier, 1989

- [25] **M. Abid** «Adaptation de la commande optimisée au contrôle vectoriel de la machine asynchrone alimenté par onduleur a MLI », these doctorat en électrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-Abbes, Algérie, 2009
- [26] **S.Resgul**, «commande de machine électrique en environnement Matlab/Simulink et temps réel Aplication a la machine asynchrone : commande vectorielle San capteur mécanique SPVWM, mode glissant, MRAS », mémoire de magister en électrotechnique université mentouri de Constantine, Algérie 2009
- [27] **S.Khojet El Khil** «commande vectorielle d'une machine asynchrone doublement alimentée (MADA) » thèses doctorat, institut national polytechnique de Toulouse, France, 2006
- [28] **Y Elbia** « commande Floue optimisée d'une machine asynchrone a double alimentation et a flux orienté », mémoire de magister en électrotechnique, université EL hadj Lakhdar de Batna, 15/06/2009
- [29] **R. Husson** «Méthodes de commande des machines électriques » Lavoisier, Hermès, paris, 2003
- [30] **B. Benazza**, « commande par mode glissant d'une machine asynchrone sans capteur de vitesse » mémoire de magister en électrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-Abbes, Algérie, 2008
- [31] **A. Fenni**, «commande Non Linéaire par des régulateurs en mode glissant d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA)» / mémoire de magister en électrotechnique, université Mohamed khider de Biskra, Algérie, 19/122013.
- [32] **P. E. Vidal**, «commande Non Linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation» thèses doctorat en Génie électrique, institut national polytechnique de Toulouse, France, 2004
- [33] **M. Djafer** «Etude et contrôle de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur » mémoire de Master en Génie électrique de l'université M'SILA, Algérie, 2014.
- [34] **B. Beltran**, «contribution à la commande robuste des éoliennes a base de génératrices asynchrone à double alimentation : du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur » thèses doctorat, université de Bretagne Occidentale, 2010
- [35] **M. Adjoudj** «commande d'une machine asynchrone à double alimentation » these doctorat en électrotechnique, université Djilali liabes, sidi bel-Abbes, Algérie, 2011.
- [36] **B. Cherif** «simulation de la commande vectorielle par régulateurs a mode glissant d'une chaine éolienne à base d'une machine asynchrone a double alimentation » mémoire de magister en électrotechnique, université Mohamed khider de Biskra, Algérie,2012.

- [37] **Y.A. Bencherif** « modélisation et commande d'une machine asynchrone a double alimentation pour la production de l'énergie éolienne » mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, école national polytechnique, Algérie, 2008.
- [38] **S.A. Moussa, N I. Soumana** «Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne » mémoire d'ingénieur d'état en électrotechnique, école national polytechnique, Algérie, 2007
- [39] **R. Rouabhi**, «Etude et commande d'une machine asynchrone a double alimentation : application a une éolienne» » mémoire Magister, université de Ferhat Abbes, Sétif, Algérie, 2012.
- [40] **M. Benhalima, A. Mezouar**, «commande d'une machine asynchrone a double alimentation : application a une éolienne» mémoire de master, université Djilali liables, sidi bel-Abbes, Algérie, 2014.
- [41] **H. A. Toliyat et G. B. Kliman**, « handbook of Electric Motors » second Edition, Taylor & Francis Group, USA 2004.
- [42] **M. Marty D. Dixneuf et D. G. Gilbert**, «principes D'électrotechnique», DUNOD, Paris, 2005.
- [43] Site internet de l'Association Danoise de l'industrie Eolienne, <http://www.wwindpower.org>
- [44] **A. Allali**, « Application des techniques avancées pour le contrôle de la Machine asynchrone Doublement Alimentée », mémoire de magister université Djilali liables, sidi bel-Abbes, Algérie, 2013.
- [45] **A. Dendouga**, « contrôle des puissance active et réactive de la machine à double alimentation (DFIM) » thèse de doctorat en électrotechnique, université Djilali liables, sidi bel-Abbes, Algérie, 2010.
- [46] **B. Hopfenspeger, Dj. Atkinson** «Doubly\_fed a. c. machines : classification and comparison», European conférence on power. Electronics and Applications (EPE), Gras
- [47] **S. A. Ardjoun**, «commande en vitesse par mode glissant d'une machine Asynchrone a Double Alimentation », mémoire de magister, université Djilali liables, sidi bel-Abbes, Algérie, 2010.
- [48] **Kh. Belgacem** «optimisation des performances des systèmes énergétique dans la production d'énergie éolienne a vitesse variable » thèse de doctorat en électrotechnique, université Djilali liables, sidi bel-Abbes, Algérie, 2014.
- [49] **N. Akkari** « contribution à l'amélioration de la robustesse de la commande d'une machine Asynchrone a Double Alimentation » thèse de doctorat en électrotechnique, université de Batna, Algérie, 2014.

# **ANNEXE**

## ANEXE A

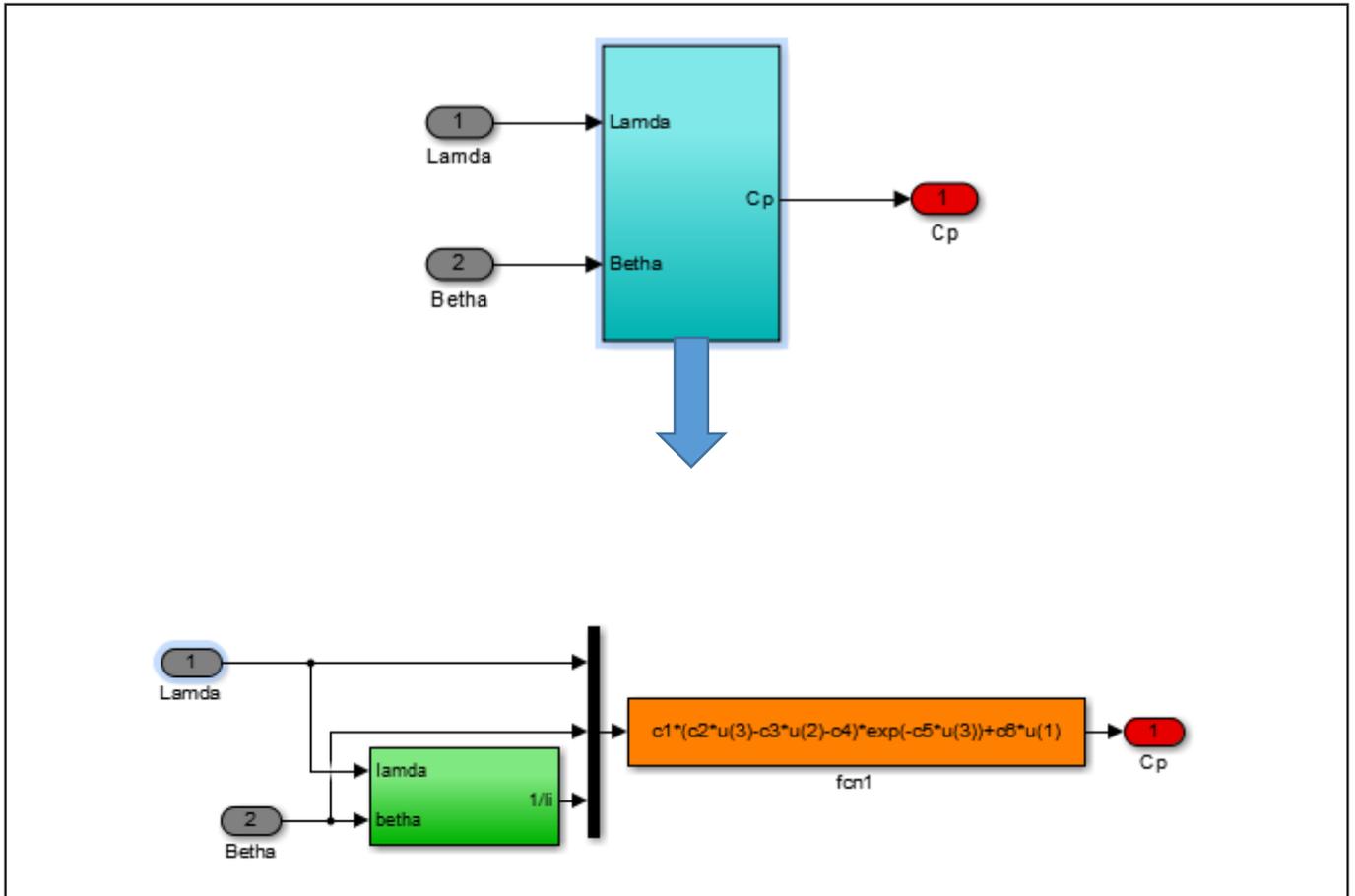
### 1 Programme de coefficient de puissance Cp

```
Lambda=0 :0.0001 :30 ;

c1=0.5176 ;
c2=116 ;
c3=0.4 ;
c4=5 ;
c5=21 ;
c6=0.0068 ;

%%-----betha1=0-----
b1=0 ;
X1=(1./(lamda+0.08.*(b1)))-(0.0035./(b1.^3+1));
cp1 = c1.*(c2.*X1-c3*b1-c4).*expo (-c5.*X1) +c6*lambda ;
%%-----betha2=2-----
b2=2 ;
X2=(1./(lamda+0.08.*(b2)))-(0.0035./(b2.^3+1));
cp2 = c1.*(c2.*X2-c3*b2-c4).*expo (-c5.*X2) +c6*lambda ;
%%-----betha3=4-----
b3=4 ;
X3=(1./(lamda+0.08.*(b3)))-(0.0035./(b3.^3+1));
cp3 = c1.*(c2.*X3-c3*b3-c4).*expo (-c5.*X3) +c6*lambda ;
%%-----betha4=7-----
b4=7 ;
X4=(1./(lamda+0.08.*(b4)))-(0.0035./(b4.^3+1));
cp4 = c1.*(c2.*X4-c3*b4-c4).*expo (-c5.*X4) +c6*lambda ;
%%-----betha5=10-----
b5=10 ;
X5=(1./(lamda+0.08.*(b5)))-(0.0035./(b5.^3+1));
cp5 = c1.*(c2.*X5-c3*b5-c4).*expo (-c5.*X5) +c6*lambda ;
%%-----betha6=15-----
b6=15 ;
X6=(1./(lamda+0.08.*(b6)))-(0.0035./(b6.^3+1));
cp6 = c1.*(c2.*X6-c3*b6-c4).*expo (-c5.*X6) +c6*lambda ;
```

## 2 Coefficient de puissance développé par la turbine éolienne



## ANEXE B

### 1 Les paramètres de la machine asynchrone à double alimentation

Les paramètres de la machine utilisés pour la simulation sont donnés dans tableau suivant :

Puissance nominale Pn	1.5Kw
Tension satatorique Vs	310v
fréquence	50Hz
Résistance statorique Rs	0.012Ω
Résistance rotorique Rr	0.7Ω
Inductance statorique	0.1232H
Inductance rotorique	0.1122H
Mutuelle cyclique	0.1118H
Nombre de Pole	2
Coefficient de frottement	0.017 N.m.s <sup>-1</sup>
Moment d'inertie	0.0042Kg.m <sup>2</sup>

### 2) Simulation de l'onduleur de tension

La tension de sortie est formée d'une structure de créneaux de largeur variable et d'amplitude égale à la tension continue d'alimentation

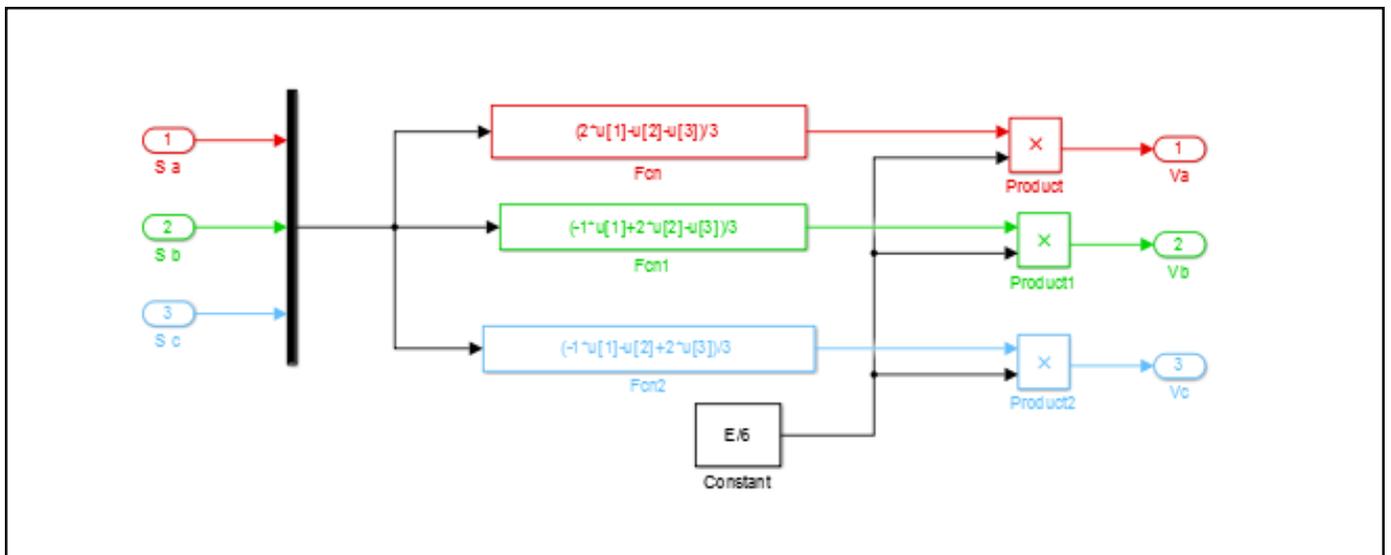


Figure : Modèle sous Simulink de l'onduleur triphasé

Les tensions de sortie de l'onduleur sont contrôlées par la technique de modulation de Largeur d'impulsion MLI qui permet le réglage simultané de fréquence et de la tension de sortie

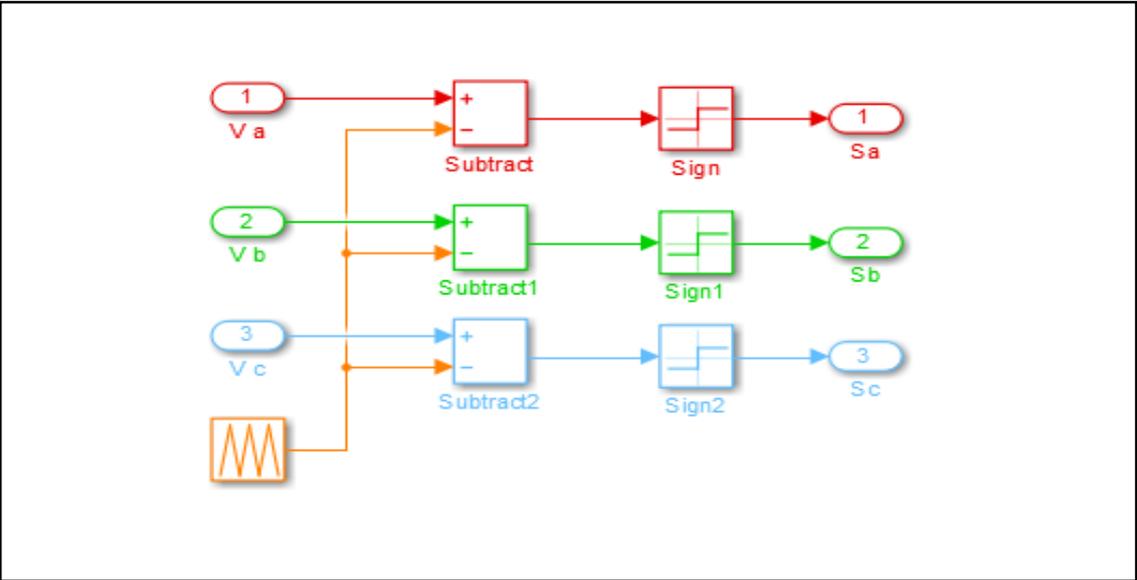


Figure : Principe de la commande MLI- ST

3 Résultat de la simulation :

Le figure représente les réponses de simulation dans le cas où la tension rotorique

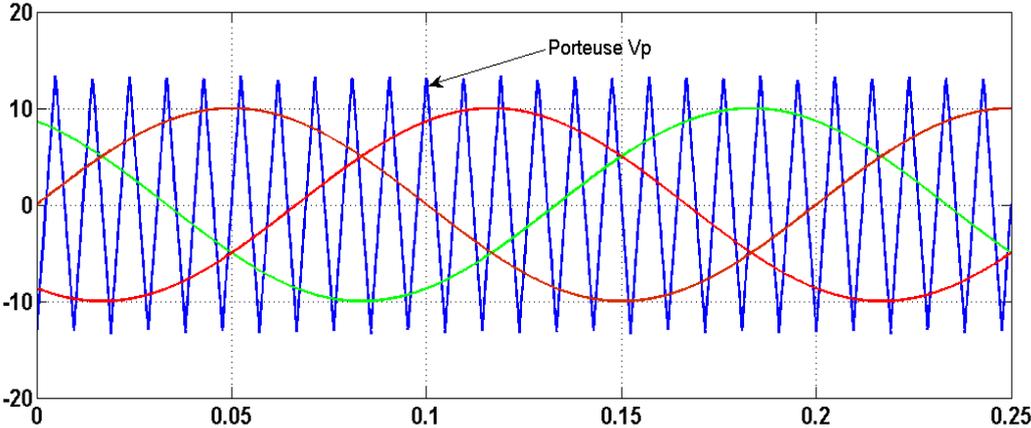
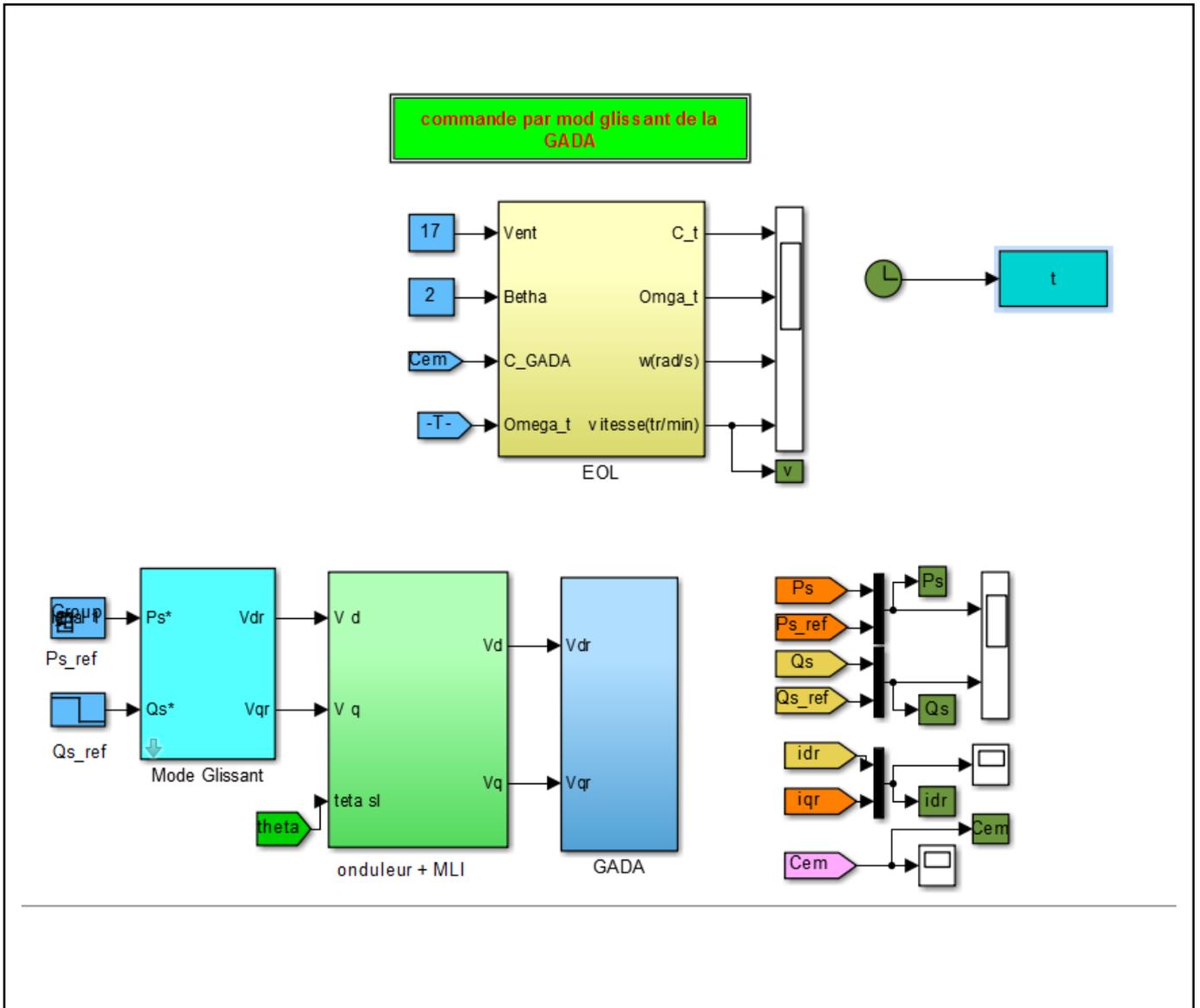


Figure : Représentation des signaux de comparaisons

# ANEXE C

## 1 Simulation de la commande par mode glissant de la GADA



## ملخص

يقدم هذا العمل تقنية التحكم بالنمط الانزلاقي وتطبيقها في الماكنة (مولد) اللاتزامنية ثنائية التغذية المستعملة في تحويل الطاقة الهوائية لإنتاج الكهرباء.

من اجل ذلك قمنا بايجاد الصيغة الرياضية للماكنة وذلك لتسهيل تطبيق التحكم الشعاعي في تبادل القدرة الفعالة والقدرة الرجعية في مجال الساكن. وبعد استعمال هذا الأخير لا حصنا عدم كفاءته في المجال الديناميكي المؤقت وكذا في حال تغيرات في الماكنة. ولذلك لجانا الى استخدام طريقة أخرى تعتمد على التحكم غير الخطي (النمط الانزلاقي). هذه التقنية الأخيرة جلبت تحسينات كبيرة ومعتبرة في التحكم في هذه الماكنة وقد عرضنا النتائج المفصلة للتقنية لمقارنتها بالتقنية السابقة.

**الكلمات المفتاحية :** الماكنة اللاتزامنية ثنائية التغذية , التحكم الشعاعي، النمط الانزلاقي.

## Résumé

Ce travail présente une technique de commande par mode glissante de la machine asynchrone à double alimentation (MADA) pilotée à travers les grandeurs rotoriques, pour la production de l'énergie éolienne.

De ce fait, nous avons appliqué la commande vectorielle en puissance active et réactive statorique. Nous nous sommes intéressés au régulateur PI classique présente certains inconvénients tels que la sensibilité aux incertitudes paramétriques de la machine et leurs variations. Pour améliorer les performances de système à commander, on a appliqué une technique de contrôle non-linéaire (le contrôle par mode glissant).

Les résultats de simulations par Matlab/Simulink et des tests de robustesse sont présentés.

**Mots clés :** machine asynchrone à double alimentation (MADA), mode glissant, commande vectorielle, régulateur PI.

## Abstracts

This work present a technique of sliding mode control applied to the doubly-fed induction machine (DFIM) in the wind power production.

With this intention, we applied the vector control in active and reactive stator power. Using PI regulators presents some disadvantages such as the sensitivity to parametric uncertainties of the machine and their variations. Against of this disadvantage, and to improve the system performances, a nonlinear control strategy was presented. Results obtained in Matlab/Simulink environment show that the sliding mode control is more robust, have superior dynamic performance and hence found to be a suitable replacement of the conventional PI controller.

**Key words:** doubly-fed induction Machine (DFIM), sliding mode, field oriented control, PI controller.