



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche  
Scientifique  
جامعة غرداية  
Université de Ghardaïa

كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
قسم الآلية و الكهروميكانيك  
Département de d'automatique et d'électromécanique  
Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme  
**Master**

**Domaine:** Sciences et Technologies  
**Filière:** Electrotechnique  
**Spécialité:** Energies renouvelables en électrotechnique

**Thème :**

Commande non linéaire d'un système  
éolien à base de La GADA

**Présenté par :**

**NOUACER Mohamed**  
**ALEB Mohamed el amine**  
**soutenue publiquement le 10/06/2024**

**Devant le jury composé de :**

<b>HAFSI ZOULIKHA</b>	MCB	Univ. Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>MEDOUKALI HEMZA</b>	MCA	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>BAHRI AHMED</b>	MCB	Univ. Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>MOUSSA OUSSAMA</b>	MCB	Univ. Ghardaïa	<b>Encadreur</b>
<b>SADOUNI RADHWANE</b>	MCA	Univ. Ghardaïa	<b>Co-Encadreur</b>

**Année Universitaire : 2023/2024**

## شكر و عرفان :

قال رسول الله صلى الله عليه و سلم

"من لم يشكر الناس لم يشكر الله"

الحمد لله على إحسانه و الشكر له على توفيقه و إمتنانه و نشهد أن لا إله إلا الله وحده لا شريك له تعظيماً لشأنه و نشهد أن سيدنا و نبينا محمدا عبده و رسوله الداعي إلى رضوانه صلى الله عليه و على آله و أصحابه و أتباعه و سلم.

بعد شكر الله سبحانه و تعالى على توفيقه لنا لإتمام هذا البحث المتواضع أتقدم بجزيل الشكر

إلى الوالدين العزيزين الذين أعانوني و شجعوني على الإستمرار في

مسيرة العلم و النجاح، وإكمال الدراسة الجامعية و البحث؛ كما أتوجه بالشكر الجزيل إلى من

شرفني بإشرافه على مذكرة بحثي الأستاذ " موسى اسامة " والاساذ " سعدوني رضوان " الذي لن تكفي حروف هذه المذكرة لإيفائهما حقهما بصبرهما الكبير علي

، ولتوجيهاتهما العلمية التي لا تقدر بثمن و التي ساهمت بشكل كبير في إتمام و إستكمال هذا العمل

إلى كل أساتذة قسم الالية والكهروميكانيك

و كما أتوجه بخالص شكري و تقديري الى اخوتي و اصدقائي و إلى كل من ساعدني من قريب أو من

بعيد على إنجاز و إتمام هذا العمل

رب أوزعني أن أشكر نعمتك التي أنعمت علي و على والدي و أن أعمل صالحاً ترضاه

و أدخلني برحمتك في عبادك الصالحين

اهداء

أهدي عملي المتواضع هذا إلى:

إلى سندي في الحياة،

وإلى نبراسي وقودتي إلى من بذل الغالي والنفيس من أجل تعليمي ..

أبي الغالي

إلى رمز الحب وبلسم الشفاء, إلى القلب الناصع بالبياض, إلى بسمة الحياة وسر الوجود

أمي الغالية

إلى إخوتي الأعزاء و كافة العائلة الكريمة

إلى الأستاذ الدكتور المشرف موسى اسامة على كل ما قدمه لنا من توجيهات ومعلومات

إلى الأساتذة الذين قدموا لي المعرفة والإرشاد طوال هذه الرحلة

إلى كل الأصدقاء و الأحباب من وسعتهم ذاكرتي ومن لم تسعهم مذكرتي

إلى كل من استفدت منه لفظة .... شكرا لكم جميعا ودمتم فوق الرؤوس شوامخ

وأتمنى أن يكون هذا الإنجاز هو بداية لمستقبل مشرق وناجح

داعياً المولى عز وجل أن يطيل في أعماركم ويرزقكم بالخيرات

عالب محمد الامين

اهداء

أهدي عملي المتواضع هذا إلى:

إلى سندي في الحياة،

وإلى نبراسي وقودوتي إلى من بذل الغالي والنفيس من أجل تعليمي ..

أبي الغالي

إلى رمز الحب وبلسم الشفاء, إلى القلب الناصع بالبياض, إلى بسمة الحياة وسر الوجود

أمي الغالية

إلى إخوتي الأعزاء و كافة العائلة الكريمة

إلى الأستاذ الدكتور المشرف موسى اسامة على كل ما قدمه لنا من توجيهات ومعلومات

إلى الأساتذة الذين قدموا لي المعرفة والإرشاد طوال هذه الرحلة

إلى كل الأصدقاء و الأحباب من وسعتهم ذاكرتي ومن لم تسعهم مذكري

إلى كل من استفدت منه لفظة .... شكرا لكم جميعا ودمتم فوق الرؤوس شوامخ

وأتمنى أن يكون هذا الإنجاز هو بداية لمستقبل مشرق وناجح

داعياً المولى عز وجل أن يطيل في أعماركم ويرزقكم بالخيرات

نواصر محمد

## Résumé

### ملخص :

في هذه المذكرة، نقدم دراسة حول التحكم في نظام طاقة الرياح بناءً على آلة غير متزامنة مزدوجة. سنبدأ بتقديم حالة النماذج الرياضية المقترحة لكل مكون من توربينات الرياح، مبسطة باستخدام معادلات إطار بارك. كما تم تطوير نموذج لعكس الجهد ثلاثي الأطوار والتحكم في MLI. سنقوم بعد ذلك بوصف نموذج الآلة غير المتزامنة المزدوجة. بعد ذلك، سنقدم تقنية التحكم في المتجهات والتحكم في وضع الانزلاق للمولدات غير المتزامنة ذات الطاقة المزدوجة، لمراقبة الاستطاعة النشطة والاستطاعة الرد فعلية. الهدف الرئيسي هو تطوير نظام جديد قوي للتحكم في وضع الانزلاق. تهدف طريقة التحكم في الوضع المنزلق إلى إدارة حالات الشكوك في النموذج وتنظيم الاستطاعة النشطة والتفاعلية بين الجهاز والشبكة. تظهر المحاكاة العددية فعالية هذا البحث

**الكلمات الرئيسية:** مولد غير متزامن مزدوج التغذية، وضع الانزلاق، التحكم في المتجهات، التحكم في طاقة

### Résumé :

Dans cette mémoire, nous présentons une étude sur le contrôle du système d'énergie éolienne basé sur une machine double alimentation. Nous commencerons par présenter l'état des modèles mathématiques sont proposés pour chaque composant d'une éolienne, simplifiés à l'aide des équations du cadre de Park. Un modèle pour l'onduleur de tension triphasé et son contrôle MLI est également élaboré. Nous décrivons ensuite le modèle de la machine double asynchrone. Ensuite, nous introduisons la technique de contrôle vectoriel et le contrôle par mode glissant pour les générateurs asynchrones double alimentation, pour surveiller puissance active et puissance réactive. Pour objectif principal un nouveau contrôle robuste par mode glissant. La méthode de commande par mode glissant vise à gérer les incertitudes du modèle et à réguler les puissances active et réactive entre la machine et le réseau. Les simulations numériques montrent l'efficacité de cette approche.

**Mots clés :** génératrice asynchrone à double alimentation, mode glissant, commande vectorielle, contrôle des puissances

### Abstract :

In this note, we present a study on the control of the wind energy system based on a double asynchronous machine. We will begin by presenting the state of the mathematical models are proposed for each component of a wind turbine, simplified using the equations of the Park framework. A model for the three-phase voltage inverter and its PWM control is also developed. We will then describe the model of the double asynchronous machine. Next, we will introduce vector control technique and sliding mode control for dual power asynchronous generators, to monitor active power and reactive power. main objective is to develop a new robust sliding mode control. The sliding mode control method aims to manage model uncertainties and regulate the active and reactive power between the machine and the network. Numerical simulations show the effectiveness of this approach.

**Keywords:** dual power asynchronous generator, sliding mode, vector control, power control.

# Sommaire

Résumé .....	I
Sommaire.....	II
Liste de figures.....	III
Liste des tableaux.....	IV
Liste des symboles.....	V
Introduction Générale.....	1

## CHAPITRE I APERÇU SUR L'ENERGIE EOLIENNE

<u>I.1 Introduction</u> .....	3
I.2 Aperçu sur l'énergie éolienne .....	4
I.3 Développement de l'énergie éolienne dans le monde.....	5
I.3.1. Capacité des éoliennes en Algérie.....	5
I.3.2 Définition de l'énergie éolienne .....	6
I.3.3 Le principe et le fonctionnement de l'éolienne.....	7
I.4 types des éolienne.....	8
I.4.1 Les éoliennes à axe Vertical .....	8
I.4.1.1 Avantages et Inconvénient d'une éolienne à Axe Vertical .....	9
I.4.2 Les éoliennes à Axe Horizontal.....	9
I.4.2.1 Les principaux composants d'une éolienne à axe Horizontal .....	10
A- Rotor (arbre et pales) .....	11
Les pales.....	9
Le moyeu.....	9
B- La nacelle .....	9
C- Le mât (la tour).....	10
I.4.2.2 Avantages et Inconvénient d'une éolienne à axe horizonta .....	11
I.5 Technologies des systèmes éoliennes.....	11
I.5.1 Éoliennes à vitesse fixe.....	11
I.5.2 Les éoliennes à vitesse variable .....	12
I.6 Types de fonctionnement des éoliennes.....	13
I. 7 Système de Régulation .....	15
I. 7.1 Freinage mécanique.....	15
I.7.2 Régulation de l'angle de calage (pitch control) : .....	15
I.7.3 Système Stall passif .....	16
I.7.4 Système Stall actif .....	16
I.7.5 Zone de fonctionnement .....	16
I. 8 Applications des éoliennes .....	17
I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	17
I.10 . Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne.....	17
I.11 Types de machines électriques.....	18

# Sommaire

I.11.1 Générateur synchrone .....	18
a) le générateur synchrone à aimants permanents.....	18
b) le générateur synchrone à rotor bobiné (GSRB).....	19
I.12 Générateur asynchrone .....	20
I.12.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil .....	20
I.12.2 Machine asynchrones à double alimentation .....	21
I.12.3 Description de la machine asynchrone à double alimentation.....	21
I.12.4 Machine asynchrone à Double alimentation par le stator.....	21
I.12.5 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné .....	22
A- Machine asynchrones à double alimentation à énergie rotorique dissipée .....	23
B- Machine asynchrones à double alimentation à structure de Kramer.....	23
C- Machine asynchrones à double alimentation avec cyclo convertisseur .....	24
D- Machine asynchrones à double alimentation à structure scherbius .....	25
I.13 Mode de fonctionnement de la MADA .....	26
I.13 .1 fonctionnement d'un moteur hypo-synchrone .....	26
I.13 ..2 fonctionnement d'un générateur Hypo-synchrone . .....	27
I.13..3 Le fonctionnement d'un générateur Hypo-synchrone.: .....	28
<u>I.15 Conclusion.....</u> .....	30

## CHAPITRE II MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSATION DE LA ENERGIE EOLIENNE

II.1 Introduction :.....	30
II.2 Modèle de la turbine eolienne .....	30
II.2.1 Modèle source primaire : le vent .....	30
II.3 Modélisation et commande de la turbine éolienne .....	33
II.3.1 Modélisation de la turbine .....	33
II.3.2 Hypothèses simplificatrices .....	34
II.3.3 Modèle aérodynamique .....	34
II.3.4 Modèle de la partie mécanique .....	35
II.3.5 Techniques d'extraction du maximum de la puissance .....	36
II.4 Définition de l'onduleur.....	38
II.4.1 Modélisation et commande de l'onduleur.....	39
II.4.2 Commande par modulation Sinus-Triangle .....	40
II.5 Modulation MLI vectorielle (SVM) .....	41
II.5.1 Détermination des arcs.....	43

# Sommaire

II.6 La modèle GADA une machine asynchrone à double alimentation. ....	45
II.6.1 Modèle de la GADA: .....	49
II.6.2 Transformation de Park .....	50
II.6.3 Modèle de la GADA dans le repère de Park.....	51
II.7 Résultats de simulations.....	53
II.8 Conclusion.....	57

## CHAPITRE III LA COMMANDE VECTORIELLE DE LA GADA

III.1 Introduction : .....	58
III.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA :.....	58
III.3 Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique :.....	59
III.3.1 Choix du référentiel du modèle diphasique.....	59
III.4 Différents types de de commande vectorielle: .....	63
III. 4.1 La Commande vectorielle directe.....	64
III.4.1.1 La Commande directe sans boucle de courant .....	64
III.5 Conception du régulateur PI.....	65
III.6 Résultats de simulations .....	66
III.6.1 Résultats de Simulation de la Commande Directe .....	67
III.7 Conclusion :.....	69

## Chapitre IV commande de par mode glissant du GADA

IV.1 Introduction .....	70
IV.2 Introduction aux systèmes de réglage à structure variable.....	70
IV.2.1 Historique .....	70
IV.2.2 Objectifs du contrôle par mode glissant .....	71
IV.2.3 Principe : .....	71
IV.3 Généralités sur la théorie du contrôle par mode de glissement .....	71
IV.3.1 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande .....	72
IV.3.2 Structure de régulation par commutation au niveau de l'organe de commande.....	72
IV.3.3 Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalente .....	73
IV.4 Principe du commande à mode glissant .....	74
IV.5 Conception de la commande par mode de glissement .....	74
IV.5.1 Choix de la surface de glissement : .....	74
IV.5.2 Conditions de convergence.....	75
IV.5.2.1 La fonction discrète de commutation .....	75
IV.5.2.2 La fonction de Lyapunov .....	75



# Sommaire

IV.5.3 Détermination de la loi de commande.....	76
IV.5.3.1 La commande équivalente.....	76
IV.6 Application du mode glissant pour la commande de la puissance active et réactive de la GADA. ....	79
IV.6.1 Contrôle de la puissance active .....	79
IV.6.2 Contrôle de la puissance réactive .....	80
IV.7 Résultats de Simulation :.....	81
IV.8 Conclusion .....	81
Conclusion generale.....	VII
Reference.....	VIII
Annexe.....	IX

# Liste de Figure

## Chapitre I

<b>Figure I.1</b>	Evolution de la capacité éolienne installée dans le monde .....	3
<b>Figure I.2</b>	Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie.....	4
<b>Figure I.3</b>	Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
<b>Figure I.4</b>	Les composantes d'une éolienne.....	5
<b>Figure I.5</b>	Différentes types d'éoliennes à axe vertical.....	6
<b>Figure I.6</b>	différents types d'éoliennes à axe horizontal.....	8
<b>Figure I.7</b>	Principaux composants d'une éolienne .....	8
<b>Figure I.8</b>	Eoliennes `a vitesse fixe.....	12
<b>Figure I.9</b>	..... Eoliennes à vitesse variable variable.....	13
<b>Figure I.10</b>	Freinage mécanique.....	14
<b>Figure I.11</b>	Variation de l'angle de calage d'une pale .....	14
<b>Figure I.12</b>	Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent .....	16
<b>Figure I.13</b>	Eolienne/GSAP avec couplage unidirectionnel.....	18
<b>Figure I.14</b>	Eolienne GSAP avec couplage bidirectionnel .....	19
<b>Figure I.15</b>	L'éolienne est reliée au GSRB, qui est ensuite connecté au réseau électrique via un système de conversion d'énergie.....	19
<b>Figure I.16</b>	Système éolienne à base de machine asynchrone à cage d'écureuil.....	20
<b>Figure I.17</b>	Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA .....	21
<b>Figure I.18</b>	Machine asynchrone à Double alimentation par le stator.....	22
<b>Figure I.19</b>	Machine asynchrone à Double alimentation rotor bobiné .....	22
<b>Figure I.20</b>	La structure MADA à énergie rotorique dissipée.....	23
<b>Figure I.21</b>	La structure MADA Kramer sert de base à un système éolien.....	24
<b>Figure I.22</b>	La structure MADA d'un convertisseur cyclo .....	25
<b>Figure I.23</b>	La structure MADA -Schierbius avec convertisseurs MLI.....	26
<b>Figure I.24</b>	Le fonctionnement d'un mode moteur hypo-synchrone.....	26
<b>Figure I.25</b>	Le fonctionnement d'un mode moteur hypo-synchrone.....	27
<b>Figure I.26</b>	Le fonctionnement d'un générateur hypo-synchrone.....	28
<b>Figure I.27</b>	Le fonctionnement d'un générateur hypo-synchrone.....	28

## Chapitre II

<b>Figure II. 1</b>	Le profil de vent s'applique aux éoliennes.....	31
<b>Figure II. 2</b>	Tube de courant entourant l'éolienne.....	32
<b>Figure II. 3</b>	Limite de Betz.....	33
<b>Figure II. 4</b>	Schéma de la turbine éolienne .....	34
<b>Figure II. 5</b>	Modèle mécanique de la turbine.....	35
<b>Figure II. 6</b>	Modèle de transmission mécanique à une masse ramené sur l'arbre	

# Liste de Figure

rapide.....	36
<b>Figure II. 7</b> Modèle de l'éolienne.....	37
<b>Figure II. 8</b> Stratégies de commande de la turbine.....	38
<b>Figure II. 9</b> MPPT sans contrôle de vitesse de rotation.....	40
<b>FigureII.10</b> Schéma de principe de la conversion Continu Alternative(DC - AC).....	41
<b>FigureII.11</b> Schéma structurel d'un convertisseur de tension triphasé.....	42
<b>FigureII.12</b> Principes techniques du triangle-sinusoïdal.....	45
<b>Figure II. 13</b> Analyse vectorielle de tension de référence.....	46
<b>Figure II. 14.</b> Représentation de la MADA dans le repère de Park.....	50
<b>FigureII.15</b> Variation du coe-cient de puissance $C_p$ et vitesse spécifique $\lambda$ .....	54
<b>Figure II. 16.</b> Profil du vent utilisé.....	54
<b>Figure II. 17</b> Vitesse de la turbine selon le MPPT.....	55
<b>Figure II. 18</b> Variation du coe-cient de puissance $C_p$ .....	55
<b>Figure II. 19</b> puissance active ( $P_s$ ).....	56
<b>Figure II. 20</b> Courants statoriques avec un zoom.....	56
<b>Figure II. 20</b> Courants rotoriques avec un zoom.....	57

## Chapitre III

<b>Figure III. 1</b> Principe de la commande vectorielle.....	59
<b>Figure III. 2</b> Orientation de l'axe d du flux statorique.....	60
<b>Figure III. 3</b> Schéma fonctionnel du modèle GADA simplifié.....	63
<b>FigureIII.4.</b> Schéma synoptique du la commande vectoriel direct de la GADA.....	64
<b>Figure III. 5</b> Schéma Commande en puissance sans boucle de courant.....	65
<b>Figure III. 6</b> Le schéma System régulé par un PI .....	65
<b>Figure III. 7</b> Puissance active statorique zoom la commande directe avec zoom .....	67
<b>FigureIII.8</b> Puissance réactive statorique avec zoom la commande directe avec zoom.....	67
<b>FigureIII.9</b> Courants rotoriques de la commande directe avec zoom.....	68
<b>FigureIII.10</b> Courants statoriques avec zoom de la commande directe avec zoom .....	68

## Chapitre IV

# Liste de Figure

<b>Figure III. 1</b>	Structure de régulation par commutation au niveau del'organe de commande.....	72
<b>Figure III. 2</b>	Structure de régulation par commutation au niveau d'une Contreréaction d'état.....	73
<b>Figure III.</b>	Schéma de régulation avec commutation au niveau de l'organe de commande et intégration de la commande équivalente.....	73
<b>FigureIII.4.</b>	Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement.....	73
<b>Figure III. 5</b>	Représentation de la fonction « SIGN ».....	78
<b>Figure III. 6</b>	Fonction de saturation .....	79
<b>Figure III. 7</b>	Schéma fonctionnel de l'unité de commande par mode glissant de La GADA .....	81
<b>FigureIII.8</b>	Puissance réactive statorique par SMC.....	82
<b>FigureIII.9</b>	La puissance réactive par SMC.....	82
<b>FigureIII.10</b>	Courant statorique par SMC .....	83
<b>FigureIII.10</b>	Courants rotoriques de la commande par SMC .....	83

# Liste des tableaux

## Chapitre I

<b>Tableau I.1</b> Avantages et Inconvénient d'une éolienne à Axe Vertical.....	7
<b>Tableau I.2</b> Avantages et Inconvénient d'une éolienne à axe horizontal.....	11
<b>Tableau I.3</b> Comparaison entre éolienne à vitesse fixe et éolienne à vitesse variable.....	13
<b>Tableau I.4</b> Avantages et inconvénients de l'énergie eolienne.....	17
<b>Tableau I.5</b> Modes opérationnels de la MADA.....	29

## Chapitre II

<b>Tableau I.1</b> les valeurs des coefficients .....	35
<b>Tableau I.2</b> Tensions statoriques.....	47
<b>Tableau I.3</b> Identification du secteur.....	47
<b>Tableau I.4</b> fournit des calculs pour déterminer les temps d'application de vecteurs qui ne sont pas égaux à zéro.....	48
<b>Tableau I.5</b> Signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur.....	49

# Symbols

<b>AC</b>	Courant alternative
<b>DC</b>	Courant Continue
<b>CV</b>	Commande Vectorielle
<b>DFIG</b>	Doubly Fed Induction Generator
<b>DFIM</b>	Doubly Fed Induction Machine
<b>FTBF</b>	Fonction de Transfert en Boucle Fermée
<b>FTBO</b>	Fonction de Transfert en Boucle Ouverte
<b>FOC</b>	Filed Oriented Control
<b>MG</b>	Mode Glissant
<b>IAE</b>	Intégration Absolute Error
<b>ISE</b>	Integrated of Square Error
<b>ITAE</b>	Intégral Time Absolut Error
<b>MLI</b>	Modulation de Largeur d'Impulsion
<b>MADA</b>	Machine asynchrone à double alimentation
<b>GADA</b>	Générateur asynchrone à double alimentation
<b><i>p</i></b>	Constante de Laplace
<b><i>K<sub>p</sub></i></b>	Gain proportionnel
<b><i>K<sub>i</sub></i></b>	Gain intégral
<b><i>IGBT</i></b>	Insulatard Gâte Bipolaire Transistor
<b><i>MPPT</i></b>	Maximum Power Point Tracking
<b><i>PI</i></b>	Proportionnel Intgral
<b><i>VSS</i></b>	systeme structure variable

## Symbols

<b><i>SVM</i></b>	Space Vector Modulation
<b><i>K</i></b>	Rang harmonique
<b><i>S<sub>i</sub></i></b>	mordication de surface vectoriel
<b><i>U</i></b>	loi vectorielle de commande
<b><math>\Delta U</math></b>	constante du vecteur de contrôle
<b><i>X</i></b>	vecteur de variables
<b><i>SAT</i></b>	saturation

### GADA :

<b><i>P<sub>sref</sub>, Q<sub>sref</sub></i></b>	Puissances électriques de références de la MADA.
<b><i>P<sub>s</sub>, Q<sub>s</sub></i></b>	Puissances active et r active statoriques de la MADA
<b><i>f</i></b>	La fréquence de la tension de référence, mesure en hertz (Hz)
<b><i>V<sub>p</sub></i></b>	d signe la période de la porteuse (en secondes)
<b><i>f<sub>p</sub></i></b>	La fréquence porteuse, mesure en hertz (Hz)
<b><i>S<sub>a</sub>, S<sub>b</sub>, S<sub>c</sub></i></b>	Vecteurs directeurs le long du bobinage du stator.
<b><i>R<sub>a</sub>, R<sub>b</sub>, R<sub>c</sub></i></b>	Vecteurs de direction le long du bobinage du rotor.
<b><i>H<sub>s</sub> :</i></b>	est la grandeur statorique (tension, courant ou aux), avec .
<b>[P<sub>0</sub>]</b>	est la matrice de Park
<b><math>\beta</math></b>	Angle de l'orientation de pale
<b><i>C<sub>p</sub></i></b>	Coefficient de puissance
<b><i>C<sub>pmax</sub></i></b>	Coefficient de puissance maximal
<b><i>C<sub>t</sub></i></b>	Couple de la turbine
<b><i>C<sub>g</sub></i></b>	Couple du générateur
<b><i>C<sub>em</sub></i></b>	Couple électromagnétique
<b><i>C<sub>emref</sub></i></b>	Couple électromagnétique
<b><i>C<sub>m</sub></i></b>	Couple mécanique

# Symbols

$\rho$	Densité d'air
$G$	Gain du multiplicateur
$J_t$	Inertie de la turbine
$J_g$	Inertie du grateur
$R$	Longueur de pales
$P_{aer}$	Puissance aérodynamique
$P_{aerref}$	Puissance aérodynamique de référence
$P_v$	Puissance du vent
$\lambda$	Ratio de vitesse

## Turbine

$S$	Surface circulaire balayée par la turbine
$\lambda_{optim}$	Valeur optimale du ratio de vitesse
$\Omega_t$	Vitesse de rotation de la turbine
$\Omega_{mec}$	Vitesse de rotation du grateur
$V$	Vitesse du vent
$V_{est}$	Vitesse du vent estimée
$\Omega_{mec}$	Vitesse mécanique du GADA



# INTRODUCTION GENERALE

L'approvisionnement énergétique actuel repose principalement sur les combustibles fossiles : pétrole, gaz naturel et charbon ; qui se sont formés au cours de milliers d'années. Mais avec la demande croissante, l'extraction de ces ressources déjà rares deviendra bientôt encore plus risquée et coûteuse. Si les choses continuent ainsi, tous les stocks seront épuisés d'ici le tournant du 21<sup>e</sup> siècle, ne laissant aucun héritage de fossiles à nos descendants. Cela souligne l'importance des sources d'énergie renouvelables et, dans cette optique, l'énergie éolienne se présente comme une étoile montante et une alternative prometteuse.

La production d'énergie éolienne implique généralement deux types de turbines : à vitesse fixe ou à vitesse variable. Le choix le plus populaire de nos jours est le système d'éolienne à vitesse variable basé sur GADA en raison de son large éventail d'avantages, dont l'un est sa capacité à gérer de larges plages de variation de vitesse du vent, Il n'est pas facile de séparer les aspects contrôle et capacité du pouvoir. L'étude vise à obtenir une capture maximale de puissance dans un système éolien grâce à la simulation de moteurs à induction à double alimentation . Dans cette configuration, nous avons des turbines qui agissent comme source principale pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique , une technique de maximisation de la puissance MPPT. Nous avons également adopté une stratégie de contrôle de la régulation de la puissance active et réactive via un contrôle vectoriel direct ainsi que des méthodes de contrôle en mode glissant afin que le générateur GADA puisse également fonctionner.

Le but de cette étude est de produire une production maximale de la centrale éolienne composée de deux moteurs à induction à double alimentation (GADA) basés sur la conversion d'énergie cinétique d'une éolienne en utilisant un système de rapport de vitesse de pointe optimal pour une capture de puissance maximale avec des contrôleurs individuels alimentant le stator GADA. enroulements.

L'analyse est organisée en quatre chapitres. Dans le premier chapitre, des informations générales sur les systèmes éoliens et leur évolution technologique ainsi qu'une brève description des différents types de générateurs sont utilisées. Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation de la conversion de l'énergie éolienne à vitesse variable pour un utilisateur unique, y compris l'analyse du modèle du vent, la modélisation de la partie mécanique de l'éolienne et la modélisation et le contrôle de l'onduleur.

## INTRODUCTION GENERALE

Le troisième chapitre de cette étude débute par une analyse approfondie de la théorie de la commande vectorielle directe. L'objectif de cette approche est de réguler de manière indépendante les puissances active et réactive produites par la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Pour démontrer les performances de cette méthode, des simulations numériques sont réalisées. Ces simulations utilisent des régulateurs proportionnels-intégrateurs (PI) basés sur l'orientation du flux du stator pour linéariser le modèle de la machine et désaccoupler le contrôle de la puissance générée. De plus, une simulation de ce régulateur est présentée pour illustrer son fonctionnement.

Le quatrième chapitre se concentre sur le contrôle du mode glissant de GADA. Tout d'abord, une revue théorique du contrôle par mode glissant est donnée. Ensuite, l'algorithme de contrôle est conçu en détaillant ses différentes étapes. Une simulation de ce régulateur est également fournie pour illustrer son fonctionnement.

# **Chapitre I**

## **Aperçu sur l'Énergie Éolienne**

### I.1 Introduction :

Tout au long de l'histoire, l'humanité a utilisé la force du vent pour propulser les navires, transformer les céréales et extraire l'eau. De nos jours, cette formidable énergie est exploitée pour produire de l'électricité, ce qui entraîne un essor important de l'industrie éolienne. Exploiter la puissance du vent comme source d'énergie électrique présente de nombreux avantages, parmi lesquels son caractère respectueux de l'environnement. Les énergies renouvelables, comme l'énergie éolienne, ne contribuent pas à la pollution, Cependant, leur impact est plutôt axé sur l'amélioration de la qualité de l'air et la lutte contre les effets néfastes de l'effet de serre [1].

Au fil des années, l'enthousiasme suscité par l'adoption de sources d'énergie renouvelables a sensiblement augmenté. L'attention croissante de l'humanité aux questions environnementales est évidente dans le domaine de l'énergie. Parmi ces différentes sources d'énergie, l'éolienne occupe une place importante en raison de ses propriétés mécaniques.

Mécaniques. Il existe une forte corrélation entre la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique et les performances des éoliennes Il existe une large gamme d'appareils d'une importance considérable, la majorité utilisant diverses technologies. Machines qui fonctionnent de manière synchronisée ou fonctionnent indépendamment les unes des autres. Des recherches et développements approfondis ont été consacrés à la conception de stratégies de contrôle et d'interfaces de connexion au réseau pour ces machines, dans le but principal d'optimiser la production d'énergie sur une large gamme de variations de vitesse du vent. L'objectif ultime est d'améliorer la rentabilité des éoliennes [2].

Dans cette section, nous approfondirons le domaine des énergies renouvelables et nous concentrerons spécifiquement sur l'énergie éolienne. Il s'agit d'une source remarquable d'énergie propre, à la fois abondante et durable. Notre exploration englobera les subtilités de son fonctionnement, une analyse approfondie de ses composants et un examen des méthodes de contrôle, avec un accent particulier sur le contrôle mécanique. De plus, nous approfondirons le domaine des turbines, en explorant les modèles verticaux et horizontaux et en mettant en lumière leurs avantages, inconvénients et domaines d'application spécifiques. Enfin, Nous étudierons les générateurs utilisés dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. nous examinerons une des formes d'énergie renouvelable, à savoir l'énergie éolien, tels que GADA, GSAP, MAS, etc.

### I.2 Aperçu sur l'énergie éolienne

#### I .2.1 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne:

L'utilisation de l'énergie éolienne a une histoire riche et a connu une croissance significative au fil du temps. L'énergie éolienne est non seulement l'une des sources d'énergie les plus utilisées aujourd'hui, mais c'est aussi l'une des formes d'exploitation énergétique les plus anciennes. Il s'est toujours avéré être une option énergétique propre et renouvelable, en particulier dans les zones reculées où l'accès aux sources d'énergie traditionnelles est limité. La construction de la première éolienne pour la production d'électricité a eu lieu en 1891 au Danemark, grâce au travail pionnier de Poule La Cour. Cette étape importante a marqué une avancée significative dans le domaine de la recherche sur l'électricité et les générateurs. [7]

Depuis des milliers d'années, l'énergie éolienne a été utilisée de diverses manières, tant sur terre qu'en mer. Selon ACK (2002), son histoire remonte à au moins 3 000 ans. Dès 7 siècles avant JC, Dans les hauts plateaux afghans, on utilisait des moulins à vent à axe vertical pour moulinier le grain, convertissant ainsi efficacement l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cependant, ce n'est qu'en 1891 qu'un Danois nommé Poule La Cour franchit une étape majeure en construisant la première éolienne produisant de l'électricité (CAM 2003).

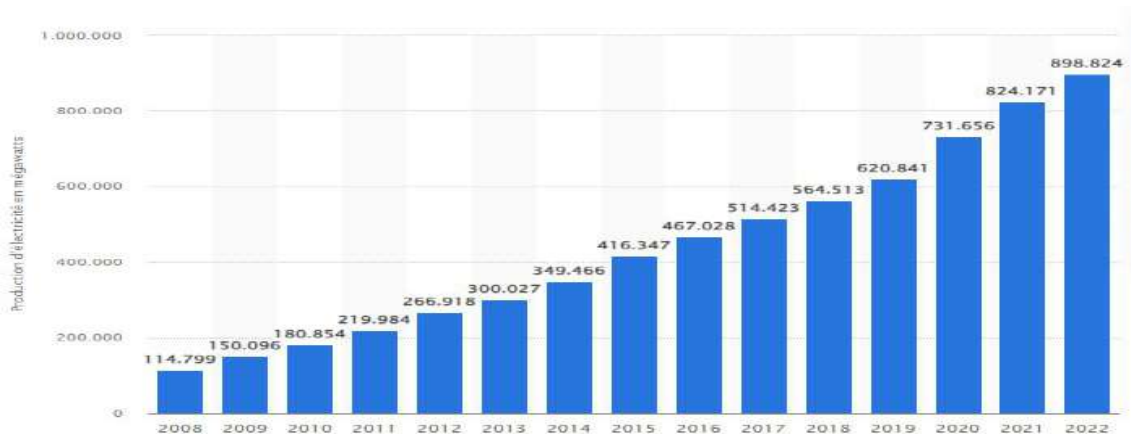
Les progrès de la technologie éolienne ont fait des progrès significatifs pendant la Première et la Seconde Guerre mondiale, grâce aux efforts des ingénieurs danois. Cependant, c'est la crise pétrolière de 1974 qui a véritablement stimulé une recherche et un développement approfondis, conduisant de nombreux pays à allouer des ressources à l'amélioration et à la mise à jour de la technologie éolienne. Au cours des années 1980 à 1986, le marché éolien en Californie a connu une croissance remarquable grâce à divers investissements. Tout a commencé avec l'introduction de turbines de moyenne puissance, notamment des modèles de 55 kW. Le marché a ensuite progressé pour inclure un total de 144 turbines, générant 7 MW de puissance en 1981. En 1985, le nombre de turbines était monté en flèche jusqu'à 4 687, produisant une puissance totale de 386 MW. Après cette période, L'Europe a été le théâtre d'une expansion majeure de l'industrie éolienne, notamment avec des pays tels que l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark en première ligne.

### I.3 Développement de l'énergie éolienne dans le monde:

L'avènement du XXe siècle marque l'émergence de la première génération d'éoliennes de grande envergure. Le Danemark a pris les devants en 1910 avec la création d'une éolienne d'une capacité remarquable de 200 kW. La Russie a emboîté le pas en 1931, en introduisant une éolienne de 100 kW dotée de trois pales à pas réglable. Les États-Unis ont fait des progrès significatifs en 1941, en développant une éolienne dépassant 1 MW de capacité nominale. Ce n'est qu'en 1971 que le Danemark est entré à nouveau dans l'histoire en créant le premier parc éolien au monde d'une capacité collective de 5 MW.

La technologie éolienne, initialement freinée par son coût élevé par rapport aux sources d'énergie conventionnelles, a connu une période de stagnation prolongée. Cependant, la crise pétrolière de 1973-1974 a ravivé l'enthousiasme pour l'énergie éolienne, même si sa mise en œuvre pratique n'a véritablement commencé que dans les années 1990 (comme le montre la figure I 1). Les progrès technologiques et les incitations gouvernementales ont grandement contribué à la création d'éoliennes d'une capacité supérieure à 5 MW.

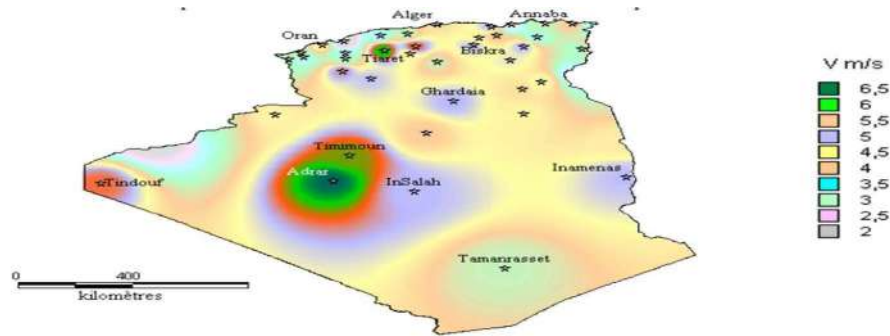
Actuellement, Les éoliennes jouent un rôle crucial dans la production d'électricité, contribuant ainsi de manière significative à l'approvisionnement en énergie, aux côtés des réacteurs nucléaires, des barrages hydroélectriques et des centrales thermiques.



**Figure I.1 :** Evolution de la capacité éolienne installée dans le monde

#### I.3.1. Capacité des éoliennes en Algérie:

Avec son important potentiel éolien, L'Algérie a énormément à gagner en utilisant l'énergie éolienne pour la production d'électricité, en particulier dans les régions du sud où la vitesse du vent peut atteindre des niveaux impressionnants, dépassant parfois 4 m/s (6 m/s à Tindouf) et culminant à 4m/s. 7 m/s dans l'Adrar



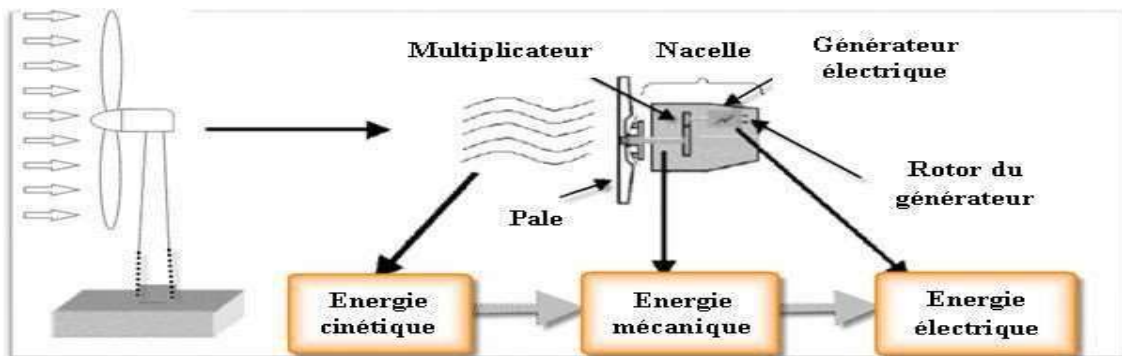
**Figure I.2:** Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent en (m/s) en Algérie

En utilisant la production d'atlas de vitesse du vent et en évaluant le potentiel éolien du pays, l'un de ces organismes en charge est le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) estime les ressources énergétiques de l'Algérie depuis les années 1990. Grâce à cette méthode, ils ont réussi à identifier huit régions dotées d'abondantes ressources éoliennes, idéales pour l'installation d'éoliennes.

- Il y a deux régions le long de la côte.
- Il existe trois régions situées sur les plateaux élevés.
- Il existe quatre régions situées dans les zones sahariennes.

### I.3.2 Définition de l'énergie éolienne:

Le dispositif communément appelé éolienne, ou éolienne, est spécifiquement conçu pour exploiter une partie de l'énergie cinétique du vent, qui est essentiellement le mouvement d'un fluide. Grâce à l'utilisation d'un arbre d'entraînement, cette énergie mécanique capturée est ensuite convertie en énergie électrique au moyen d'une machine génératrice d'électricité.



**Figure I.3:** Conversion de l'énergie cinétique du vent

Une façon de classer les différents types d'éoliennes est basée sur la quantité d'énergie produite par le générateur. Au sein du domaine des éoliennes de petite capacité, qui englobent une gamme de puissance de 20 W à 50 kW, il existe trois catégories distinctes : les micro-éoliennes, d'une capacité maximale de 100 W ; des mini éoliennes, allant de 100 W à 10 kW ; et de petites éoliennes, allant de 10 kW à 50 kW. Des éoliennes de moyenne capacité, allant de 50 à plusieurs centaines de kW, sont disponibles pour répondre à une variété de besoins énergétiques. Éoliennes d'une capacité supérieure à 1 MW. [4]

### I.3.3 Le principe et le fonctionnement de l'éolienne

L'objectif principal d'un système d'énergie éolienne est d'exploiter Transformer une fraction de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique exploitable. Ce processus de conversion s'effectue en deux étapes distinctes [8].

Une fois que le vent atteint un niveau de force adapté (allant de 3 à 5 m/s), le positionnement de l'éolienne est automatiquement ajusté en fonction des informations fournies par l'anémomètre et la girouette situés sur la partie supérieure de la nacelle. Ces instruments transmettent un signal au moteur directionnel, garantissant ainsi que l'éolienne est parfaitement alignée avec la direction du vent.

Lorsque le vent se déplace, il propulse les pales de l'éolienne, entraînant la rotation de l'arbre lent. Pour amplifier cette rotation, le multiplicateur entre en jeu, transférant la vitesse accrue à l'arbre rapide. Celui-ci transmet à son tour la rotation au générateur, qui produit de l'électricité en réponse directe à ce mouvement.

Le courant électrique généré est dirigé à travers des câbles situés à l'intérieur de la structure de l'éolienne puis canalisé dans le sol. À partir de là, il subit un processus de transformation pour s'intégrer parfaitement au réseau électrique préexistant

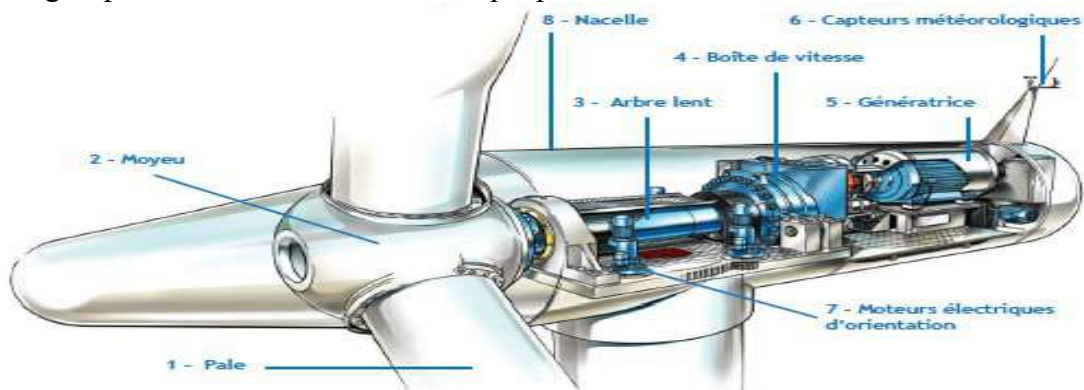


Figure I.4 : Les composantes d'une éolienne



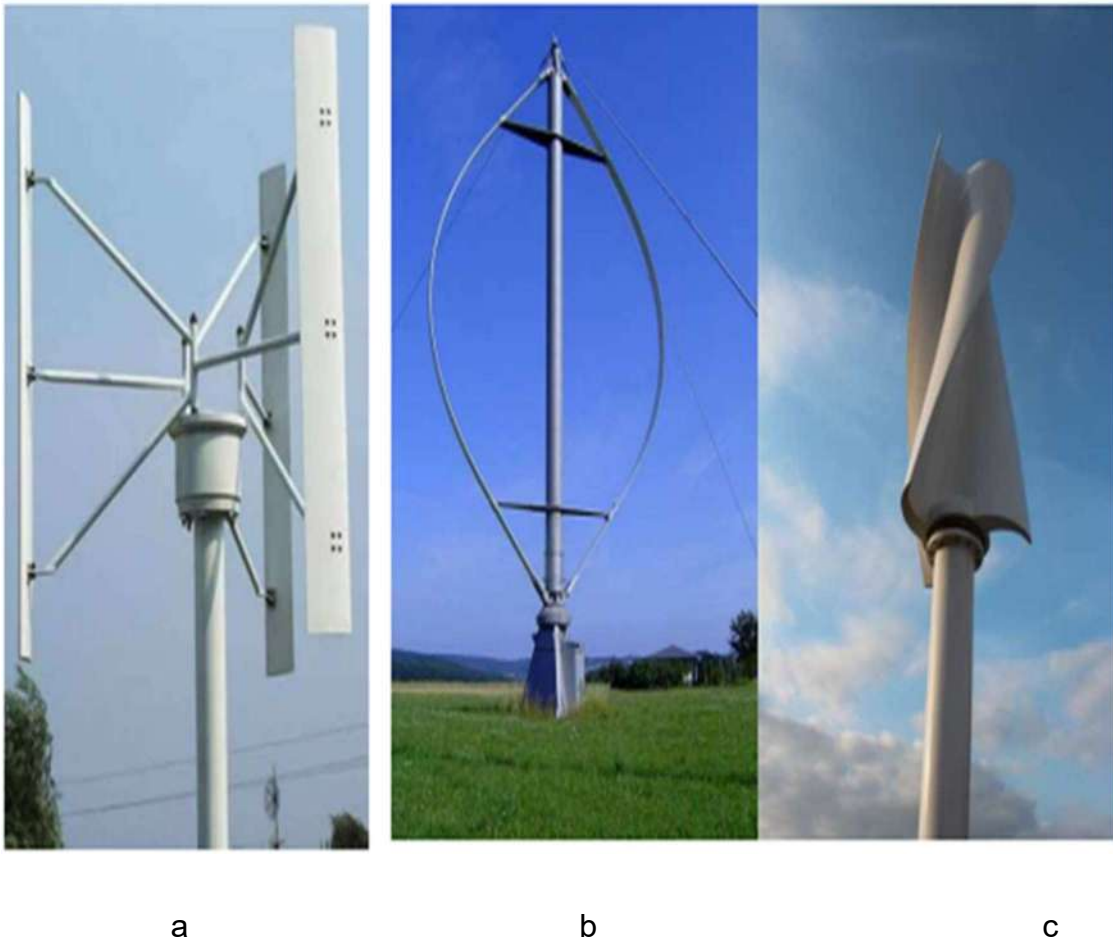
### I.4 types des éoliennes:

Les éoliennes peuvent être classées en fonction de l'alignement de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. Cette classification permet d'identifier deux groupes principaux:

- Éoliennes qui fonctionnent selon un axe horizontal.
- Éoliennes qui fonctionnent selon un axe vertical

#### I.4.1 Les éoliennes à axe Vertical:

Ces éoliennes ont un axe de rotation vertical par rapport au sol, positionné perpendiculairement à la direction du vent. Ces structures sont parmi les premières à avoir été utilisées pour produire de l'énergie électrique. Cette conception unique permet à l'éolienne d'exploiter le vent provenant de n'importequelle direction, éliminant ainsi le besoin d'un mécanisme de direction. Le générateur et la boîte de vitesses sont situés au-dessus du niveau du sol, offrant une solution plus simple et plus rentable.



**Figure I.5:** Différentes types d'éoliennes à axe vertical : a) Turbine Darrieus en H  
b) Turbine Darrieus, c) Turbine Savonius

**I.4.1.1 Avantages et Inconvénient d’une éolienne à Axe Vertical:**

<p><b>Les avantages</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Cette conception offre la possibilité de disposer d'une génératrice, d'un multiplicateur.</li> <li>- Effectivement, aucun mécanisme de direction n'est nécessaire pour aligner le rotor sur la direction du vent dans le cas des éoliennes à axe vertical, grâce à leur conception spécifique qui leur permet de capter le vent venant de toutes les directions.</li> <li>- Sa conception est simple, robuste et demande peu d'entretien.</li> </ul>
<p><b>Les inconvénients</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Les performances globales des éoliennes à axe vertical ne se distinguent pas particulièrement.</li> <li>- La conception de cette éolienne particulière nécessite une orientation verticale de fonctionner avec des vents proches du sol, généralement moins intenses en raison de l'obstruction du terrain.</li> <li>- Pour les installer au sol, on utilise des tirants qui les obligent à passer au-dessus des pales, ce qui entraîne une plus grande surface occupée. importante que celle nécessaire pour une éolienne à tour.</li> </ul>

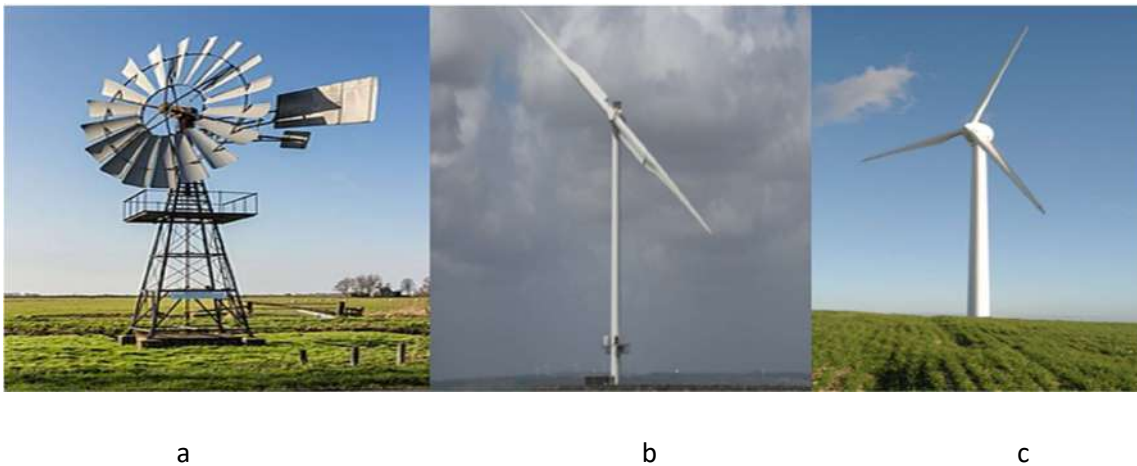
**Tableau I-1 :** Avantages et Inconvénient d’une éolienne à Axe Vertical

**I.4.2 Les éoliennes à Axe Horizontal:**

Le concept d’éoliennes à axe horizontal s’inspire des éoliennes en général. Ces turbines sont équipées de deux ou trois pales à rotation aérodynamique. Semblable aux turbines hydrauliques, la force mécanique du vent fait tourner les pales, soit directement, soit via un multiplicateur de vitesse, qui alimente ensuite la machine de génération de courant alternatif [5], entraînant la production d’électricité. Une éolienne est composée principalement de trois éléments : le rotor, la nacelle et la tour.. Les éoliennes à axe horizontal peuvent être conçues pour fonctionner soit en amont, soit en aval.

Dans le cas d'une éolienne en amont, les pales font directement face au vent, ce qui nécessite une structure robuste pour résister à la force du vent. Cette conception simplifie l'installation et offre un accès plus facile aux composants à des fins de maintenance.

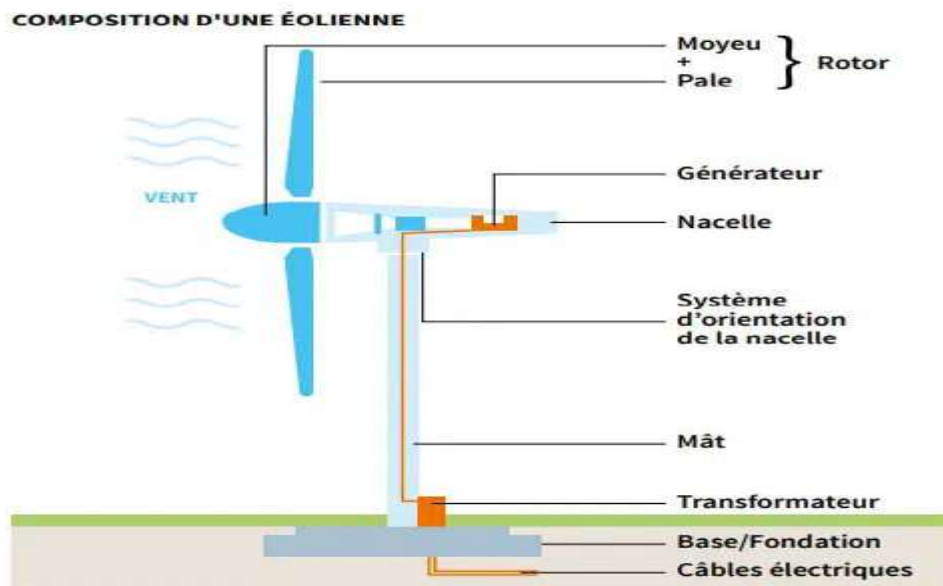
Les grandes éoliennes d'une capacité supérieure à 1 000 kW ont généralement une configuration prédominante. D'un autre côté, les éoliennes plus petites ont généralement une figure disposition différente dans laquelle le vent est reçu derrière les pales. Ceci est visible sur la (Figure I.6).



**Figure I.6:** différents types d'éoliennes à axe horizontal: a) Eolienne multipale  
b) Eolienne horizontale bipale c) Eolienne horizontale tripale

### I.4.2.1 Les principaux composants d'une éolienne à axe Horizontal:

Effectivement, une éolienne se compose de trois éléments essentiels : le rotor, la nacelle et la tour, comme illustré.



**Figure. I.7 :** Principaux composants d'une éolienne .

### **A- Rotor (arbre et pales) :**

L'énergie mécanique est générée à partir de l'énergie éolienne grâce à l'utilisation d'un rotor d'éolienne. Composé de pales et d'un arbre principal, le rotor facilite l'interaction nécessaire entre ces éléments. La quantité d'énergie captée est déterminée à la fois par la surface couverte par les pales et par la vitesse du vent.

#### **Les pales:**

En tant qu'élément important des éoliennes, le nombre de fabricants dans le monde est extrêmement limité. Capables de les produire. En raison de leur longueur exceptionnelle, leur transport nécessite le recours à des convois spéciaux. Le bon fonctionnement, la longévité et les performances des éoliennes dépendent en grande partie de la nature des pales. Fabriqué en fibre de verre et de carbone, leur forme est soigneusement étudiée en soufflerie et leur longueur est déterminée en fonction de la puissance souhaitée. De même, leur largeur est calculée avec une grande précision [6].

#### **Le moyeu:**

L'élément qui supporte les pales de l'éolienne est la nacelle. Elle doit être conçue pour résister aux changements brusques de vitesse du vent.

### **B- La nacelle:**

Au centre de l'éolienne se trouve son élément essentiel, abritant les composants de transmission mécanique reliant le rotor au générateur. Le kit comprend un multiplicateur, un système de freinage de sécurité ainsi que des appareils de mesure du vent. Elle est reliée à la tour par une tringlerie à manivelle motorisée, offrant ainsi la possibilité de choisir l'orientation de l'éolienne et éventuellement de la faire pivoter face au vent, bien que cette technique soit rarement employée [6].

#### **✓ le multiplicateur de vitesse :**

Le multiplicateur dans une éolienne est utilisé pour augmenter la vitesse de rotation de l'arbre primaire du rotor et le coupler à un générateur de série. Cette amplification de la vitesse permet d'optimiser la génération d'électricité à partir de l'énergie mécanique produite par les pales.

#### **✓ L'arbre secondaire**

Effectivement, une éolienne est généralement équipée d'un frein mécanique. Ce mécanisme permet de bloquer le rotor pendant les opérations de maintenance et de prévenir tout dysfonctionnement de la machine, assurant ainsi la sécurité et la facilité d'intervention.

### ✓ *la génératrice:*

Effectivement, plusieurs types de génératrices peuvent être utilisés dans les éoliennes pour convertir l'énergie mécanique produite par le rotor en énergie électrique. Les types couramment rencontrés comprennent les génératrices synchrones, asynchrones (ou à induction), et les génératrices à aimants permanents. Chaque type présente des avantages et des inconvénients, et le choix dépend souvent des spécifications et des exigences spécifiques de l'application.

### ✓ **un contrôleur électronique :**

Le contrôleur de l'éolienne, qui est essentiellement un ordinateur, est chargé de superviser le fonctionnement de l'éolienne. Il est capable d'initier le démarrage de la machine une fois que la vitesse du vent atteint un niveau adéquat, typiquement autour de 5 m/s. Ses principales fonctions incluent le contrôle du réglage de la hauteur des pales, la gestion de la force de freinage de la turbine et l'alignement optimal de l'ensemble rotor et nacelle avec le vent. Le but ultime est de maximiser la récupération d'énergie et de minimiser les turbulences, le tout dans les paramètres spécifiés. Pour réaliser ces tâches, le contrôleur s'appuie sur les données de l'anémomètre, qui mesure la vitesse du vent, et de la girouette, qui indique la direction du vent. Ces instruments sont généralement positionnés à l'arrière de la nacelle. De plus, le contrôleur gère également tous les problèmes potentiels pouvant survenir pendant le fonctionnement.

### ✓ **divers dispositifs de refroidissement :**

" (générateur, pluriel) refroidi par un ventilateur, un refroidisseur d'eau ou d'huile." [6].

### ✓ **le dispositif d'orientation de la nacelle :**

Le contrôleur permet de faire tourner le carter situé en haut de la tour autour de l'axe vertical de manière plus aisée. La direction est généralement assurée par un moteur électrique qui fonctionne via une couronne dentée. De nombreuses éoliennes intègrent un dispositif mécanique pour verrouiller la position de la nacelle dans une direction particulière, évitant ainsi une contrainte constante sur le moteur. Ce mécanisme permet également de bloquer l'éolienne lors des opérations de maintenance

### **C- Le mât (la tour):**

En général, la colonne en acier, ou éventuellement le treillis métallique, doit être aussi haute que possible afin d'éviter les turbulences à proximité du sol. Cependant, la qualité des matériaux utilisés a un coût significatif, et le poids doit être limité. Un compromis courant consiste à choisir une colonne dont les dimensions sont légèrement supérieures au diamètre du rotor de l'éolienne [9].

### I.4.2.2 Avantages et Inconvénient d'une éolienne à axe horizontal:

<p><b>Les avantages</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Une grande efficacité, car les pales tournent toujours perpendiculairement au vent, recevant ainsi L'énergie reste constante tout au long du processus de rotation.</li> <li>• Un accès à des vents plus forts en utilisant des tours hautes sur des sites avec une pente de vent, où la vitesse du vent peut augmenter de 20% tous les dix mètres d'élévation, ce qui augmente la production d'énergie.</li> <li>• Pas besoin d'un mécanisme supplémentaire pour maintenir les pales alignées avec le vent, ce qui réduit les coûts et augmente la fiabilité.</li> </ul>
<p><b>Les inconvénients</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La production efficace d'énergie électrique devient difficile lors de l'utilisation d'éoliennes à axe horizontal en raison de l'exigence de vitesses de vent élevées.</li> <li>• Bruit : Le générateur d'éoliennes à axe horizontal est caractérisé par un bruit élevé qu'il émet lorsqu'il tourne, et ce bruit peut affecter les résidents des zones environnantes des stations.</li> <li>• Taille et poids : Lorsque la taille du générateur est grande, il nécessite une grande surface pour l'installation et il est difficile de le transporter sur le site d'installation.</li> </ul>

Tableau I-2 : Avantages et Inconvénient d'une éolienne à axe horizontal

### I.5 Technologies des systèmes éoliennes:

Essentiellement, on retrouve deux technologies éoliennes : l'une à vitesse constante et l'autre à vitesse variable. La section suivante explique les performances de ces deux approches.

#### I.5.1 Éoliennes à vitesse fixe:

L'adoption de la technologie des éoliennes à vitesse fixe est très répandue : dans cette configuration, le générateur et le stator sont connectés directement au réseau. La vitesse de rotation est contrôlée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles sur le générateur. La technologie éolienne à vitesse fixe est ainsi solidement ancrée. La technologie des éoliennes à vitesse fixe s'est avérée bien établie, faisant preuve de simplicité, de fiabilité et de rentabilité. Cela permet une installation rapide de centaines de kilowatts d'énergie éolienne. Néanmoins, à mesure que les projets éoliens commencent à être mis en œuvre progressivement au-delà du niveau MW, il est possible de décrire la configuration à vitesse fixe avec la plus grande simplicité : une turbine entraînée par le vent, ainsi qu'un multiplicateur de vitesse et un générateur – seulement trois composants.

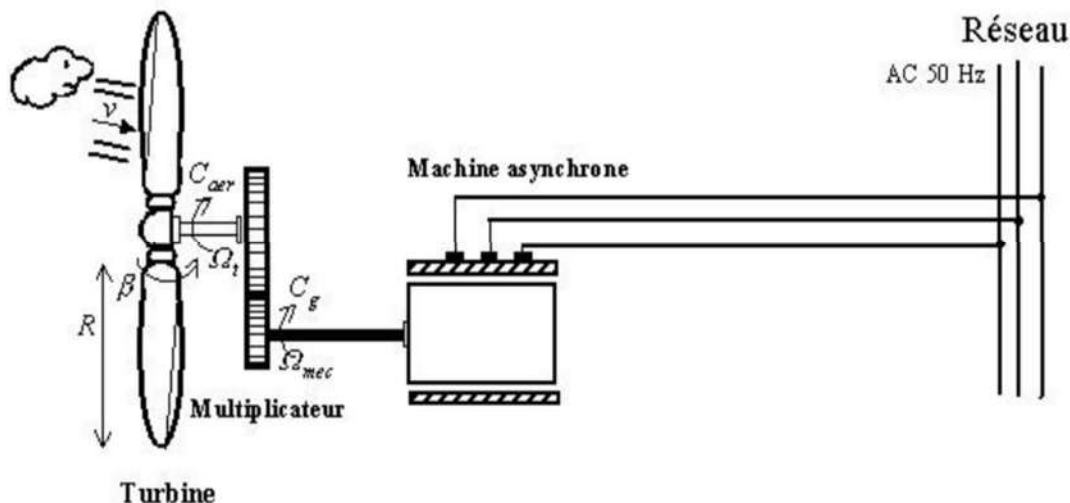


Figure I.8: Eoliennes `a vitesse fixe

### I.5.2 Les éoliennes à vitesse variable

Lorsque l'on compare les éoliennes à vitesse variable aux éoliennes à vitesse fixe, il est évident que les premières offrent une efficacité énergétique supérieure et des fluctuations de puissance réduites. Ceci est particulièrement important car les systèmes électriques peuvent être gênés par le scintillement, ce qui en fait un élément crucial pour la production éolienne. De plus, les éoliennes à vitesse variable imposent moins de contraintes sur les composants mécaniques que les éoliennes à vitesse fixe. En utilisant une interface électronique de puissance (voir Figure 1.9), le générateur est parfaitement intégré au réseau électrique, permettant un contrôle précis de la vitesse du rotor. Cette configuration présente une opportunité avantageuse d'atténuer les fluctuations de puissance causées par les changements dans les conditions de vent grâce à des ajustements de la vitesse du rotor, aboutissant finalement à une efficacité énergétique améliorée [39].

En conséquence, l'éolienne est capable de générer une qualité d'énergie nettement supérieure à celle d'une éolienne à vitesse fixe [8].

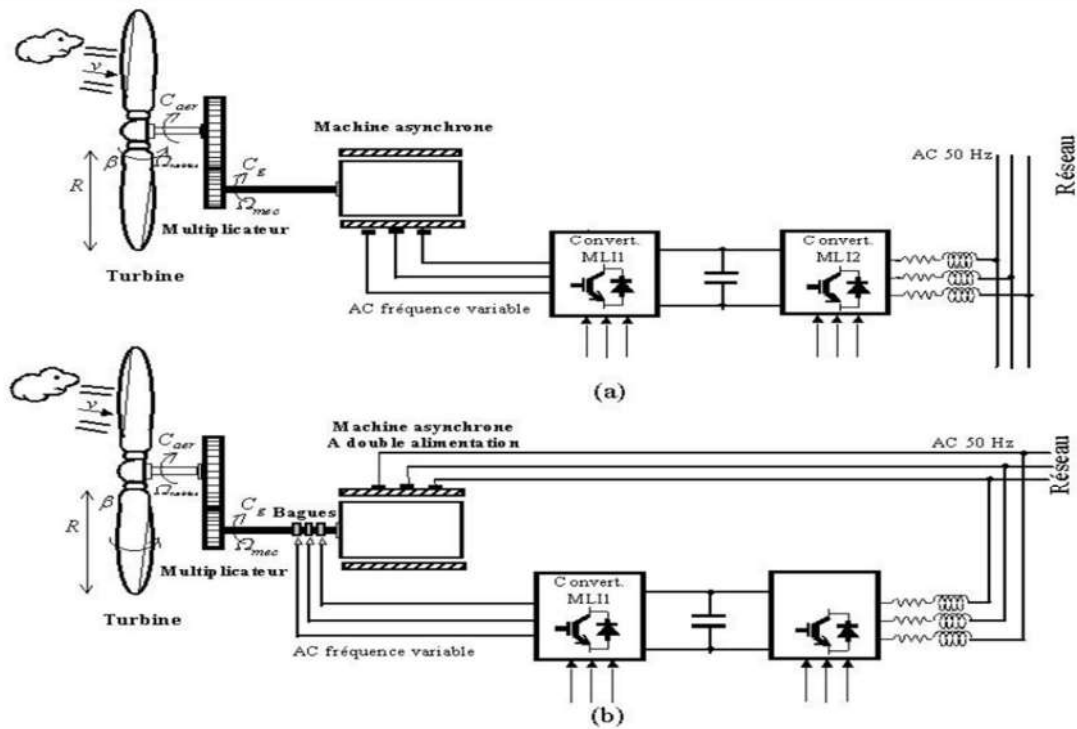


Figure I.9: Eoliennes à vitesse variable

### I.6 Types de fonctionnement des éoliennes

La production d'énergie électrique à partir d'éoliennes est fortement influencée par la technologie d'exploitation utilisée, qui comprend des turbines à vitesse fixe et des turbines à vitesse variable. Ces deux modes de fonctionnement offrent des avantages distincts :

Fonctionnement à Vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Un système électrique rationalisé pour plus de simplicité.                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Améliore la fiabilité.</li> </ul> </li> <li>- La probabilité que des composants d'éoliennes pénètrent dans la région de résonance est minimale.</li> <li>- L'objectif est de réduire les coûts.</li> <li>- Il n'y a pas besoin d'un système de commande électrique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Améliorer l'efficacité de la consommation d'énergie.</li> <li>- Minimiser les variations de couple subies par le groupe motopropulseur.</li> <li>- Minimiser la quantité de force appliquée aux trains électriques.</li> <li>- Produire une énergie de qualité supérieure.</li> <li>- La capacité d'améliorer la vitesse du rotor dans des conditions de vent turbulent.</li> </ul>

Tableau I-3 : Comparaison entre éolienne à vitesse fixe et éolienne à vitesse variable. [15]



### I.7 Système de Régulation

#### I.7.1 Freinage mécanique

Un frein principal : de type aérodynamique grâce à des pales à mise en drapeau complète. Le système de contrôle de pas est indépendant pour chaque pale et assure ainsi En cas de panne, assurer la sécurité est de la plus haute importance de l'une d'entre elles.

- Un frein mécanique : comprenant un frein à disque à embrayage hydraulique monté sur l'arbre rapide de la boîte de vitesses. Ce frein mécanique Son seul but est de servir de mécanisme de freinage de stationnement ou lorsqu'un bouton-poussoir d'arrêt d'urgence a été engagé.

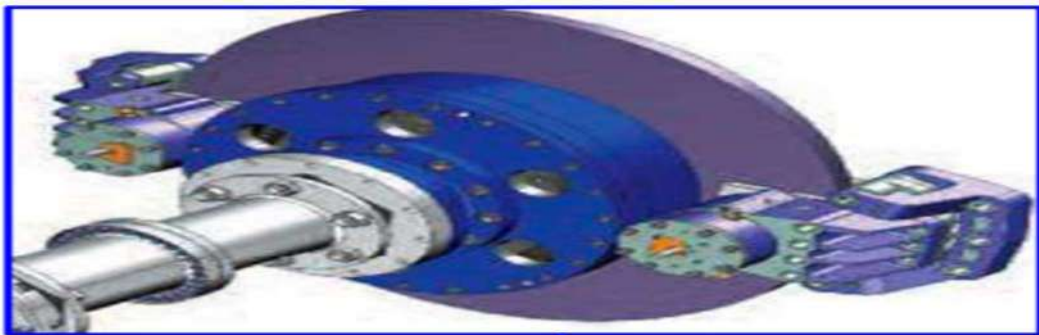


Figure I.10: Freinage mécanique

#### I.7.2 Régulation de l'angle de calage (pitch control) :

Lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur désignée, l'augmentation de la vitesse du vent entraînera une diminution de l'angle de tangage, ce qui déclenchera le décrochage aérodynamique de la turbine. [31]

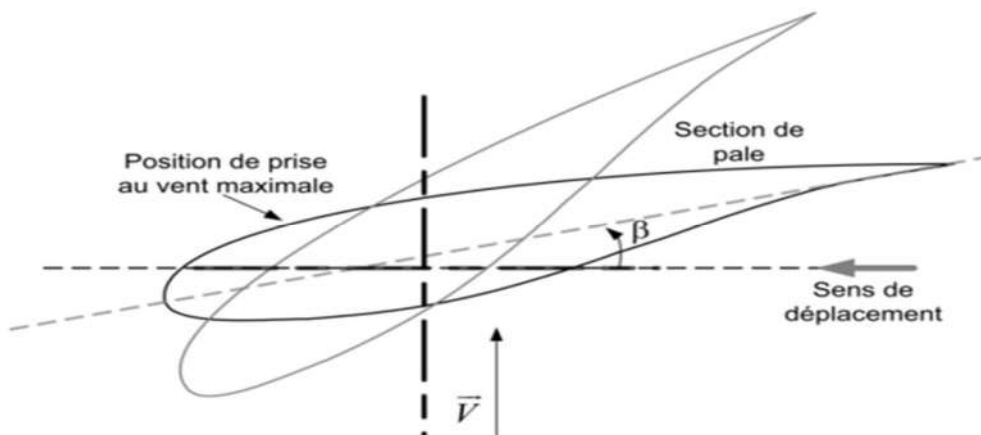


Figure I.11: Variation de l'angle de calage d'une pale [6]

### I.7.3 Système Stall passif

Les éoliennes à puissance de décrochage passive ont des pales simples fixées au moyeu à un angle constant, avec un profil aérodynamique réagissant à des vitesses de vent dépassant une limite de sécurité. Cela entraîne une augmentation de l'angle d'attaque, provoquant le passage de l'écoulement laminaire à la turbulence sur le côté supérieur de la pale. À l'inverse, les éoliennes à décrochage contrôlé présentent des pales légèrement tordues le long de leur axe longitudinal, favorisant un décrochage progressif plutôt que soudain. L'avantage clé de cette approche est d'éviter l'ajout de pièces mobiles au rotor, grâce à une interaction complexe entre la conception aérodynamique et la conception structurale dynamique du profil du rotor. Actuellement, environ deux tiers des éoliennes installées utilisent ce système de contrôle. [34]

### I.7.4 Système Stall actif

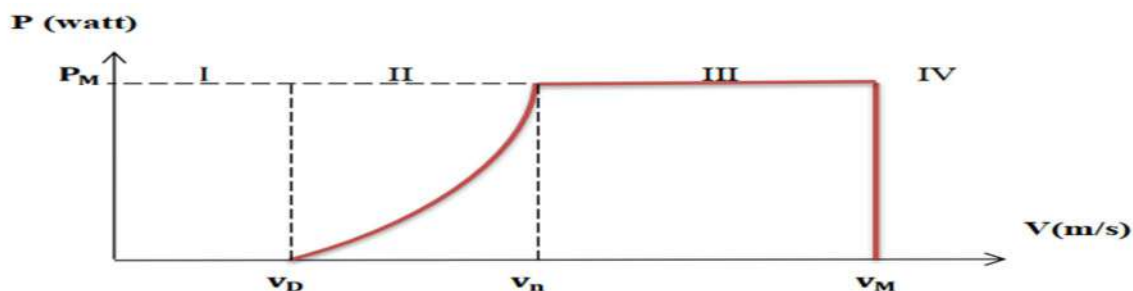
Les éoliennes de plus de 1 MW intègrent des mécanismes actifs de contrôle de la puissance de décrochage, utilisant des pales tangibles similaires aux machines à pas commandé. L'angle de la lame est ajusté par le système de contrôle. pour générer un couple significatif à basse vitesse du vent, similaire aux machines de contrôle de tangage. Cependant, lorsque la turbine atteint sa puissance nominale, les machines contrôlées par le décrochage adoptent une approche différente de celles contrôlées par le pas.

En cas de surcharge du générateur électrique, le système de commande oriente Les pales d'une machine à pas contrôlé tournent dans le sens opposé. Cela entraîne une augmentation de l'angle d'attaque du profil aérodynamique, induisant une condition de décrochage, au lieu de réduire l'angle d'attaque pour diminuer la portance et la vitesse de rotation des pales.

Le contrôle actif de décrochage présente deux avantages majeurs : la capacité à réguler la puissance de sortie pour éviter de dépasser La puissance nominale du générateur est conçue pour résister aux rafales de vent et maintenir constamment sa puissance nominale même en cas de vitesses de vent élevées. Cela contraste avec les éoliennes passives contrôlées par décrochage, qui ont tendance à subir Lorsque la vitesse du vent est élevée, sa puissance électrique diminue.en raison d'un décrochage plus prononcé de leurs pales de rotor. [36.]

### I.7.5 Zone de fonctionnement

En utilisant les courbes de conversion de puissance généralement fournies par les fabricants, il devient possible de classer les éoliennes en quatre zones opérationnelles distinctes. de d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent : [17].



**Figure I.12** : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent. [17]

$V_D$  : La vitesse du vent requise pour que l'éolienne démarre son fonctionnement est de 3 m/s et 5 m/s.

$V_n$  : représente la vitesse du vent qui correspond à la vitesse désignée du générateur.

$V_M$  : l'éolienne doit être capable de résister à des vitesses de vent égales ou supérieures à la vitesse de décrochage [17].

**Zone I** : la vitesse du vent descend en dessous de la vitesse minimale de démarrage,  $V_d$ , indiquant une force insuffisante pour faire fonctionner correctement l'éolienne.

**Zone II** : À chaque vitesse de vent, la consommation d'énergie maximale se produit.

**Zone III** : "La puissance est maintenue à son niveau nominal, et la régulation de la vitesse assure le maintien constant de la vitesse de rotation et la puissance fournie, notée  $P$ , reste égale à  $n$  fois"  $P$ . [32].

**La zone IV** : lorsque la vitesse du vent atteint des niveaux dangereusement élevés, un mécanisme de sécurité se déclenche pour protéger l'éolienne des dommages potentiels. Cela amène l'éolienne à être placée en position drapeau par mesure de précaution.

### I.8 Applications des éoliennes

L'attrait d'une éolienne repose sur sa capacité à exploiter l'énergie cinétique disponible dans le vent. Cette énergie peut être convertie en énergie mécanique et utilisée de deux manières principales :

Soit directement aux équipements d'alimentation électrique tels que les pompes de relevage d'eau ou les entraînements de générateurs. Concernant la production d'énergie électrique, deux configurations distinctes peuvent être identifiées :

- L'énergie peut être stockée dans des batteries en vue d'une utilisation ultérieure, ou l'énergie peut être injectée directement dans le réseau de distribution.

Ainsi, nous pouvons assister à une utilisation diversifiée de l'énergie éolienne dans de nombreuses applications électriques, notamment sa compatibilité avec les méthodes de production conventionnelles comme les centrales thermiques, les installations nucléaires et les barrages. Les zones dotées d'infrastructures établies sont bien adaptées à l'énergie

éolienne, offrant des possibilités de production dans des endroits qui ne sont pas liés au réseau de distribution typique. Il est important de souligner les avantages des systèmes de conversion de l'énergie éolienne apporte aux régions moins urbanisées et sur son potentiel dans les pays en développement. Ces avantages comprennent l'utilisation de l'énergie éolienne pour alimenter les équipements de dessalement, combinée à des groupes de moteurs diesel pour la cogénération et en conjonction avec des panneaux photovoltaïques [37].

### I.9 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Avantages	Inconvénient
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Contrairement aux énergies fossiles, l'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable.</li> <li>- Contrairement aux processus continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires, les éoliennes en fonctionnement peuvent être facilement arrêtées</li> <li>- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs comme l'énergie nucléaire.</li> <li>- Indépendance énergétique : Les éoliennes peuvent être installées localement, réduisant la dépendance à l'égard des importations d'énergie et renforçant l'indépendance énergétique des régions..</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des multiplicateurs.</li> <li>-Variabilité de la production : L'énergie éolienne dépend du vent, ce qui entraîne une variabilité de la production d'électricité. Les périodes de faible vent peuvent réduire la production d'énergie, nécessitant des solutions de stockage ou des sources d'énergie de secours.</li> <li>-Besoin d'espace : Les parcs éoliens nécessitent des zones étendues pour être efficaces, ce qui peut entraîner la conversion de terres agricoles ou d'habitats naturels en sites éoliens, entraînant la perte d'écosystèmes locaux</li> </ul>

**Tableau I.4 :** Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

### I.10 Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Aujourd'hui, la fonction la plus répandue des éoliennes est la production d'électricité, pour laquelle une machine électrique est indispensable. Sur le marché, une variété de machines électriques est disponible, pouvant être utilisées en tant que générateurs. Les composants des systèmes éoliens exigent des caractéristiques très spécifiques [12].

Le type et la taille du rotor jouent un rôle crucial dans la détermination des spécifications techniques d'une éolienne. Ce document de recherche vise à fournir un aperçu complet des principales caractéristiques et principes technologiques associés aux éoliennes.

### I.11 Types de machines électriques

#### I.11.1 Générateur synchrone :

Composé d'un rotor et d'un stator, le générateur synchrone est un composant essentiel. Le stator est équipé de trois enroulements qui alimentent une charge externe, tandis que le rotor génère le champ magnétique essentiel au fonctionnement du générateur. Le champ magnétique du rotor peut être généré grâce à l'utilisation d'aimants permanents placés sur la surface du rotor ou par un courant continu circulant dans un bobinage d'excitation connecté au rotor. Selon la composition du rotor, il existe deux types distincts de génératrices synchrones : la génératrice synchrone à aimant permanent et la génératrice synchrone à rotor bobiné.

#### a) le générateur synchrone à aimants permanents :

Comme dans les cas précédents, la vitesse de rotation du GSAP détermine la fréquence de la tension générée. De ce fait, il n'est pas possible de le relier directement au réseau électrique [13]. Le GSAP utilise un rotor avec plusieurs aimants permanents, ce qui offre l'avantage d'un couple important. Cette conception garantit que la machine n'utilise pas d'énergie réactive au niveau du rotor. [2], comme illustré dans (Figure I.13 / Figure I.14).

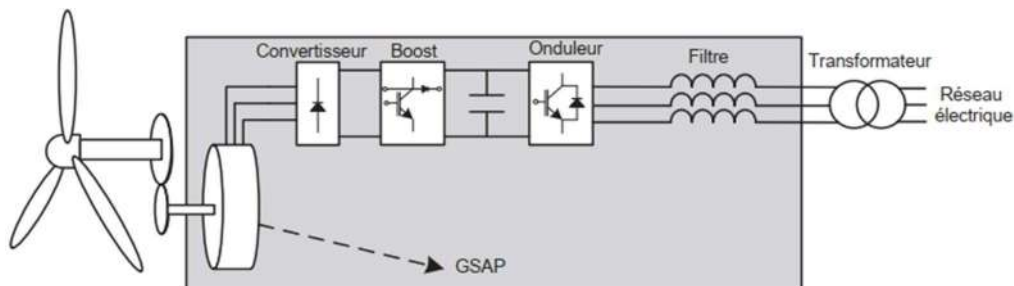


Figure I-13 : Eolienne/GSAP avec couplage unidirectionnel [18]

- système de conversion bidirectionnel

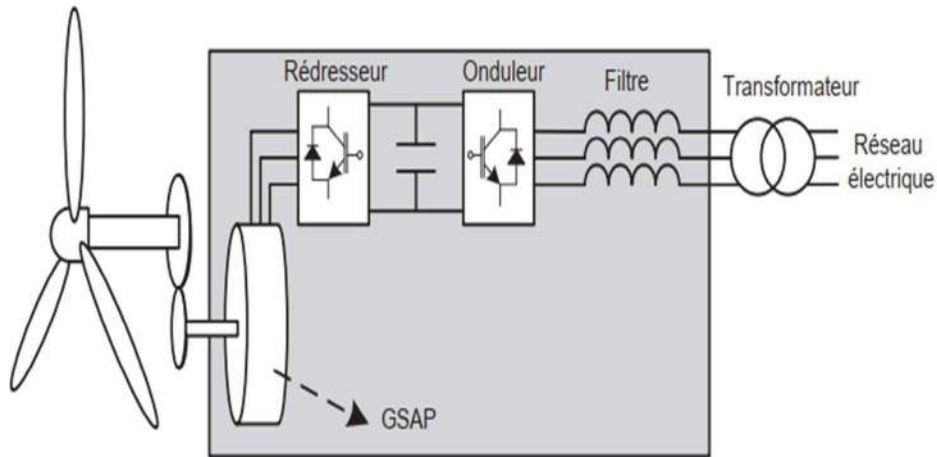


Figure I.14 : Eolienne GSAP avec couplage bidirectionnel [18]

**b) le générateur synchrone à rotor bobiné (GSRB):**

Pour les moteurs à rotor bobiné, le rotor est chargé de supporter un enroulement monophasé alimenté en courant continu, tandis que le stator est équipé d'un enroulement polyphasé qui fonctionne en courant alternatif [3].

La tension générée dans le stator du GSRB est directement influencée par la fréquence, qui est déterminée par la vitesse du rotor. La vitesse du rotor, quant à elle, dépend de la vitesse du vent. La vitesse du vent étant variable, la vitesse de rotation d'une éolienne ne peut pas rester constante. Le rotor magnétique rotatif est constitué d'enroulements alimentés en courant continu (roue polaire) via un redresseur connecté au secteur. Il s'avère qu'il n'est pas possible de connecter directement le GSRB au secteur. Pour cette raison, la connexion est réalisée à l'aide d'un système de commutation électronique tel que (Figure I.15) [17]

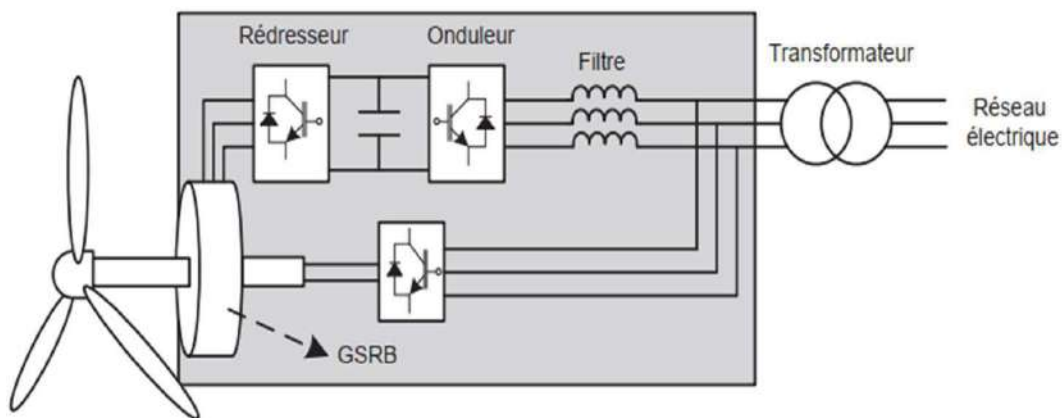


Figure I.15 : L'éolienne est reliée au GSRB [18].

### I.12 Générateur asynchrone

L'intégration directe de ce type de machine au réseau est Grâce à l'ajustement transparent du glissement entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. C'est la raison pour laquelle la plupart des éoliennes à vitesse fixe recourent à l'utilisation de machines asynchrones. Il convient de noter qu'il existe deux types de machines asynchrones : Les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné sont deux types de machines asynchrones couramment utilisées dans diverses applications.

#### I.12.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil:

En raison de sa réversibilité, de sa robustesse et de l'absence de système de contact glissant nécessitant un entretien minimal, la machine asynchrone à cage est devenue la machine la plus utilisée dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. De plus, sa facilité d'installation etsa connexion au réseau ont contribué à sa production de masse et à son déploiement à grande échelle, entraînant la génération d'une puissance importante à partir de ce type de machine [2].

La méthode d'établissement d'une topologie implique la connexion directe d'un MAS à cage d'écureuil au réseau. Un multiplicateur associé est utilisé conjointement avec la machine et un ensemble de condensateurs garantit le processus de magnétisation. Le glissement maximum du MAS sert de limitation à la vitesse de rotation légèrement variable dans cette architecture, qui offre l'avantage de la simplicité et du faible coût (Figure I.16) [16].

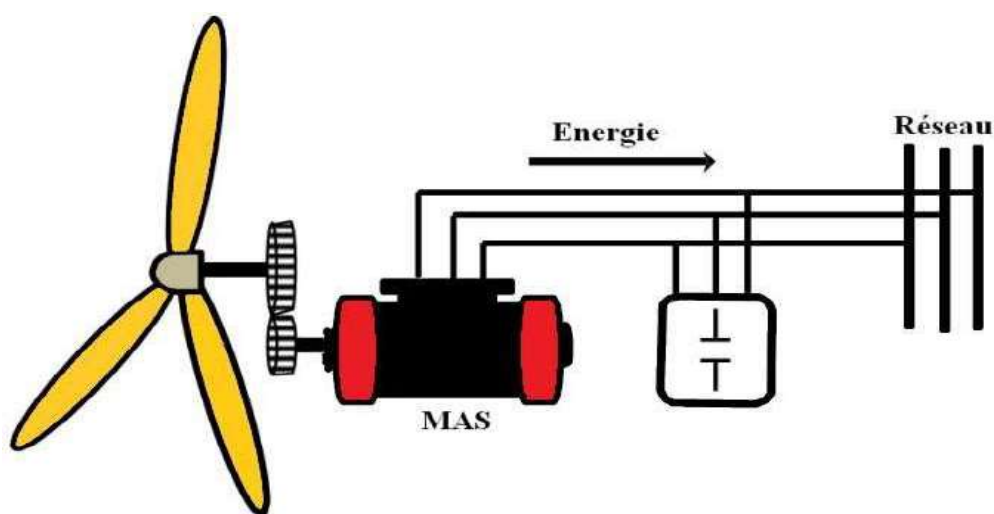


Figure I.16 : Système éolienne à base de machine asynchrone à cage d'écureuil

### I.12.2 Machine asynchrones à double alimentation

Actuellement, la machine asynchrone à double alimentation est le type de générateur à vitesse variable le plus fréquemment employé dans les installations de production dépassant 1 MW, en raison de ses diverses configurations :

### I.12.3 Description de la machine asynchrone à double alimentation:

L'introduction initiale de la machine asynchrone à double alimentation, également connue sous le nom de "doubly-fed induction machine (DFIM)", remonte à l'année 1899 [21]. Il convient de noter que cette innovation ne représente pas l'introduction Plutôt que d'introduire une conception complètement nouvelle, l'innovation réside dans la mise en œuvre d'un mécanisme d'alimentation différent [24]. Généralement, la machine est constituée de feuilles magnétiques empilées ensemble, comportant des rainures pour les enroulements. Cependant, ce qui distingue cette machine particulière est sa structure de rotor non conventionnelle. Au lieu de la cage d'écurie traditionnelle intégrée dans l'empilement de tôles, le rotor est composé de trois enroulements connectés en étoile. Ces enroulements sont reliés à des anneaux conducteurs, qui sont à leur tour brossés lors de la rotation de la machine [22]. (voir Figure I.17).

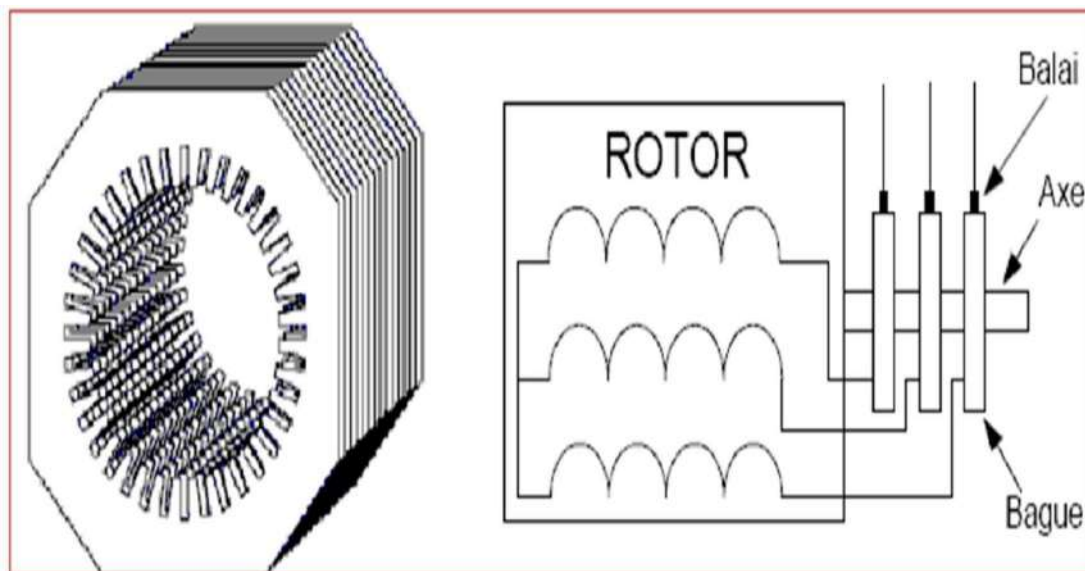


Figure I.17: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA

### I.12.4 Machine asynchrone à Double alimentation par le stator

Afin d'obtenir une double alimentation via le stator, la machine asynchrone est équipée de deux enroulements statoriques distincts. (figure1.18)



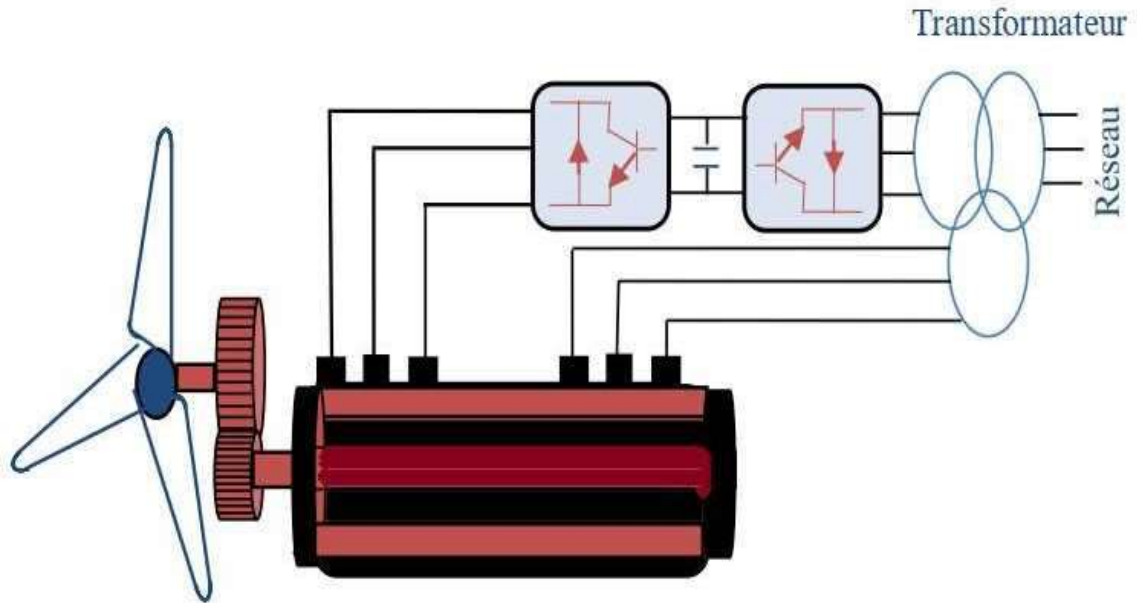


Figure I.18: Machine asynchrone à Double alimentation par le stator

### I.12.5 Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"

La machine asynchrone à double alimentation de type "rotor bobiné" offre un avantage significatif grâce à son aptitude au fonctionnement à vitesse variable, ce qui constitue un atout major. Très peu de puissance circule à travers le rotor, les coûts des convertisseurs sont réduits par rapport à éolienne à vitesse variable qui fonctionne via le stator et les convertisseurs électriques. C'est la principale raison du choix de ce générateur pour une production en série . Un autre avantage réside dans possibilité d'ajuster la tension au point de connexion où ce générateur est injecté [23].

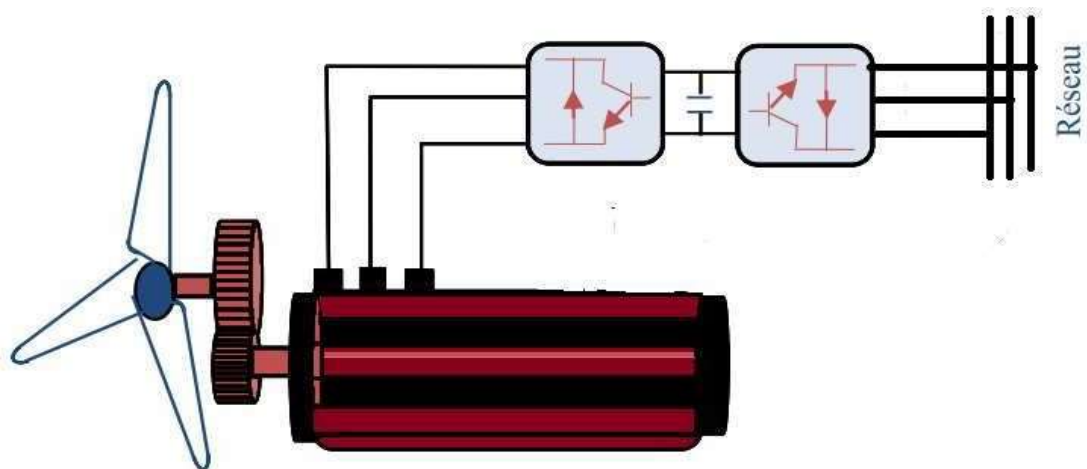


Figure I.19: Machine asynchrone à Double alimentation rotor bobiné

### A- Machine asynchrones à double alimentation à énergie rotorique dissipée

La disposition présentée dans la figure I.20 implique une connexion directe du stator au réseau, tandis que le rotor est relié à un redresseur à diode. En sortie de ce redresseur, un hacheur à IGBT est connecté pour alimenter la charge résistive.

L'objectif est d'instaurer un fonctionnement à vitesse variable en ajustant la puissance de glissement dissipée par les enroulements rotoriques. Cette dissipation de puissance vise à maintenir le glissement à un maximum de 10%. [27]

L'ajustement de l'énergie dissipée au niveau du rotor se réalise en modifiant le rapport cyclique de la commande de l'IGBT du hacheur. En cas d'un glissement significatif, la puissance extraite du rotor augmente, et elle est complètement dissipée dans la résistance R, entraînant ainsi une baisse de l'efficacité du système. En outre, cela entraîne une augmentation de l'exigence d'une résistance plus grande et de la puissance qui traverse le convertisseur.

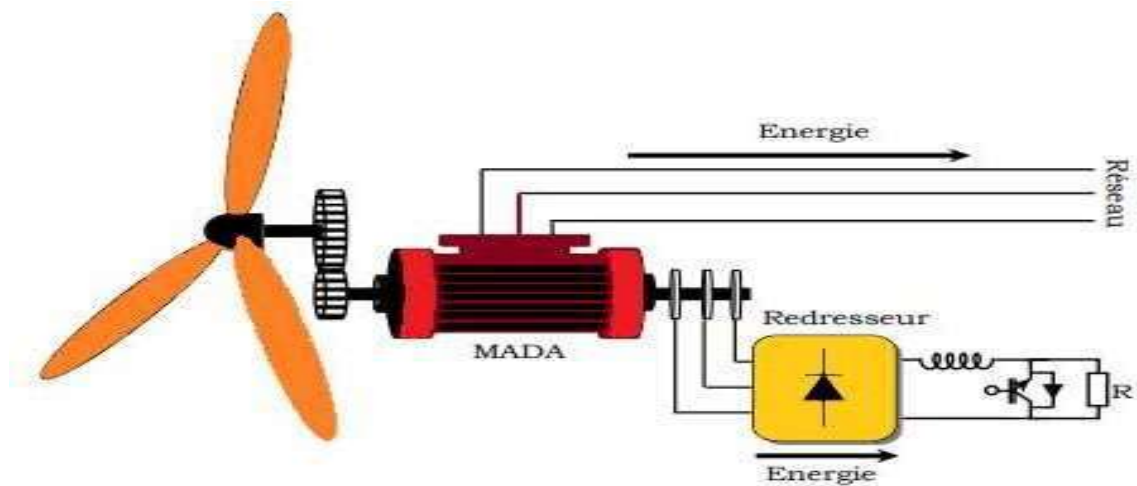


Figure I.20: La structure MADA à énergie rotorique dissipée

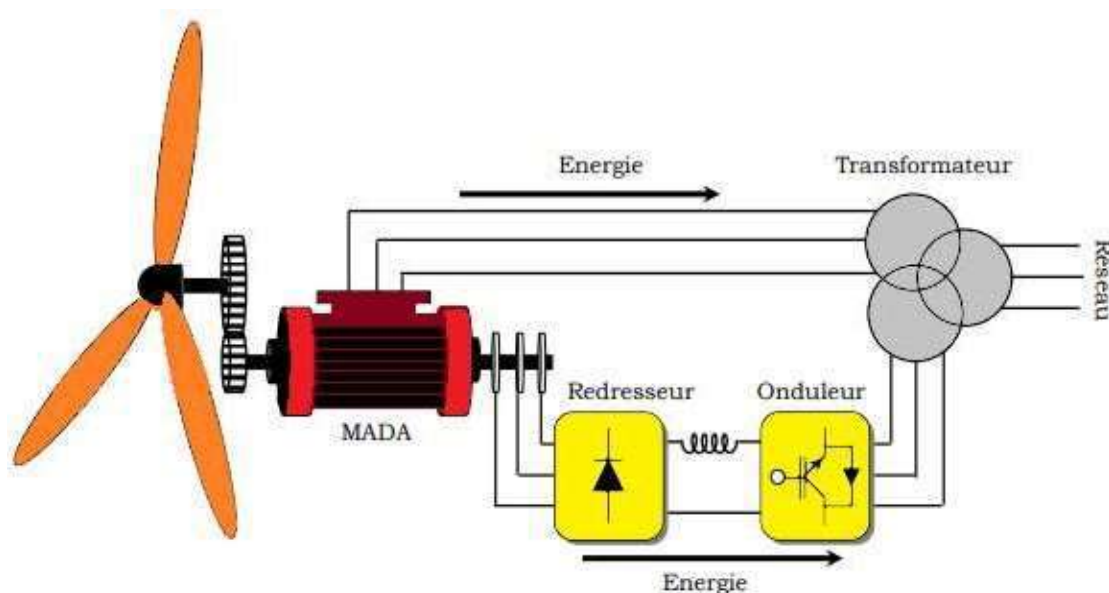
### B- Machine asynchrones à double alimentation à structure de Kramer

Afin de diminuer les pertes d'énergie engendrées par la configuration du système précédent, l'onduleur est introduit en remplacement du hacheur et de la résistance. Cet onduleur a pour fonction de réinjecter l'énergie de glissement dans le réseau. dite structure de Kramer est représentée sur la figure I.21 [19].

Une fraction de la puissance nominale de la machine est utilisée pour dimensionner l'ensemble redresseur onduleur. En mettant en œuvre ce système, la taille du convertisseur peut être considérablement réduite par rapport à sa puissance nominale, garantissant qu'elle reste

inférieure à 30 %. Néanmoins, l'introduction de thyristors au niveau de l'onduleur fait encore baisser le facteur de puissance : en effet, il n'y a que des transferts qui s'effectuent d'un point précis de l'énergie du rotor d'une machine vers son réseau, via une seule ligne . De ce fait, le générateur ne peut fonctionner qu'en mode hyper-synchrone ( $g < 0$ ), Cela implique que la machine génère de l'énergie pour des vitesses de rotation supérieures à celles du synchronisme , De plus cette configuration est caractérisée par une présence substantielle d'harmoniques dans le courant du stator et du rotor [27].

Pour garantir le transfert bidirectionnel de puissance, il est nécessaire de substituer Le redresseur à thyristor remplace le redresseur à diode dans ce scénario particulier.. Cette alternative autorise un fonctionnement à la fois en mode hypo synchrone et hyper synchrone, bien que maintienne untaux élevé d'harmoniques dans le courant.



**Figure I.21** : La structure MADA Kramer sert de base à un système éolien

### C- Machine asynchrones à double alimentation avec cyclo convertisseur

Afin de permettre l'ajustement de l'énergie de glissement afin de faire fonctionner la machine en mode générateur ou moteur, on voit que le flux de puissance peut aller dans deux directions : une évolution conduisant à une flexibilité accrue [20]. Néanmoins, cette méthode introduit de nombreuses harmoniques ayant un impact significatif. Le facteur de puissance du dispositif a été amélioré grâce aux développements de l'électronique de puissance et a ainsi rendu obsolète la structure avec deux convertisseurs IGBT contrôlés par modulation de largeur d'impulsion (MLI) qui est utilisé à la place du cyclo convertisseur .

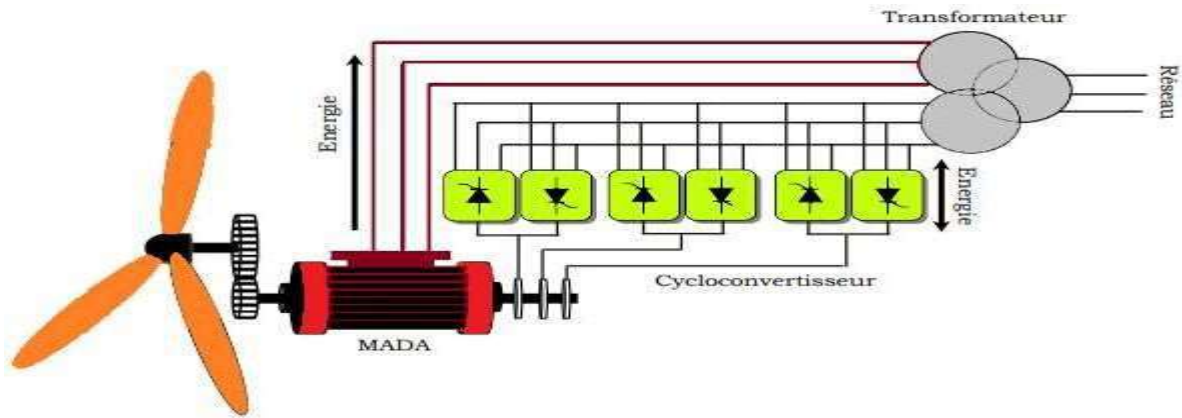


Figure I.22 : La structure MADA d'un convertisseur cyclo

**D- Machine asynchrones à double alimentation à structure scherbius**

La configuration illustrée dans la figure I.23, connue sous le nom de structure Scherbius, partage des caractéristiques similaires avec la structure Kramer qui intègre un redresseur à thyristors. Cependant, les interrupteurs utilisés dans cette configuration, à savoir les IGBT, Le contrôle de ces dispositifs ne se limite pas à la seule phase d'ouverture ou de fermeture ; cela peut être fait dans les deux phases. De plus, ils ont une fréquence de commutation plus élevée. Cette caractéristique unique permet d'ajuster les harmoniques du courant du rotor à des fréquences plus élevées, ce qui simplifie le processus de filtration [26].

La sélection de cette configuration offre la possibilité d'exercer un contrôle sur deux paramètres indépendants pour chaque convertisseur : d'une part, la régulation du flux magnétique et de la vitesse du dispositif d'ajustement du pas du côté de la machine, et d'autre part, la La gestion efficace du flux de puissances actives et réactives à travers le réseau est cruciale pour une gestion efficace.

Les avantages de cette série de convertisseurs peuvent être énumérés comme suit : Dans le système, le flux d'énergie entre le rotor et le réseau est bidirectionnel, contraint par les limitations des variations de vitesse de rotation fixées par des facteurs électriques et mécaniques. Un fonctionnement à une vitesse presque synchrone fournit les résultats les plus optimaux.

La caractéristique distinctive de celui-ci est sa capacité à maintenir une distorsion minimale des courants du rotor et du stator, garantissant ainsi l'intégrité de la tension et du courant.

La gestion du couple du générateur n'est pas affectée par l'injection de puissance réactive du rotor. [23]

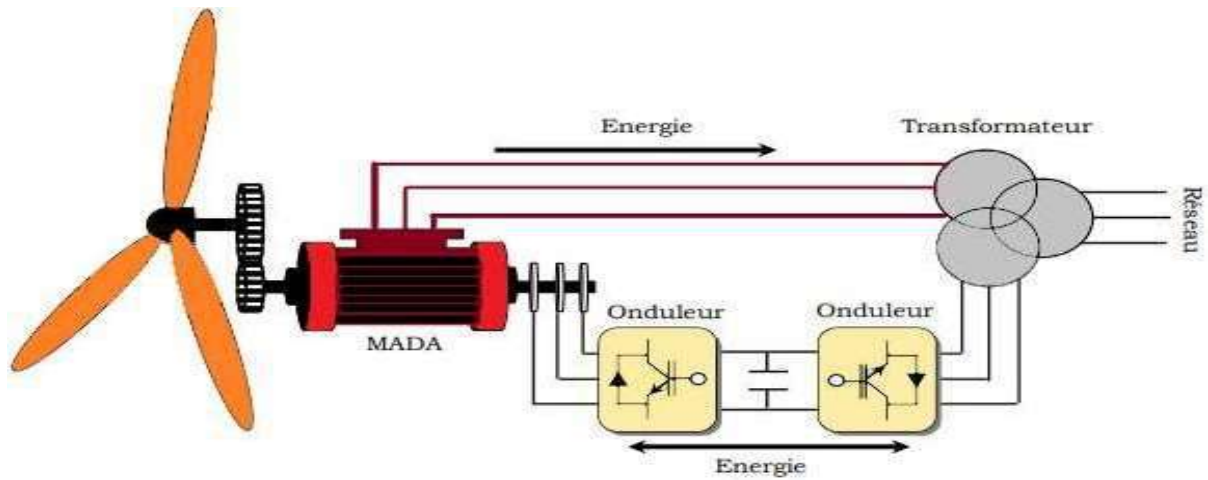


Figure I.23: La structure MADA -Scherbius avec convertisseurs MLI

### I.13 Mode de fonctionnement de la MADA:

La MADA est sous un contrôle optimal. La régulation précise du flux de puissance se produit dans les enroulements du rotor. En tant que machine capable qu'il fonctionne comme moteur ou comme générateur, avec des vitesses pouvant être hypo-synchrones ou hyper- synchrones, elle présente quatre modes opérationnels distincts. Dans ces modes, Les puissances du stator, du rotor et des composants mécaniques sont respectivement notées  $P_s$ ,  $P_r$  et  $P_m$  [25].

#### I.13 .1 Le fonctionnement d'un moteur hypo-synchrone :

Dans la Figure I.24, il est évident que le stator reçoit de l'énergie du réseau, tandis que l'énergie de glissement circule à travers le rotor et retourne au réseau. Par conséquent, lors du fonctionnement en mode moteur, la vitesse est inférieure à la vitesse de synchronisation. Bien que la machine à induction à cage traditionnelle puisse fonctionner de cette manière, La puissance de glissement finit par se perdre à mesure que le Joule perd dans le rotor [38] [33] [29].

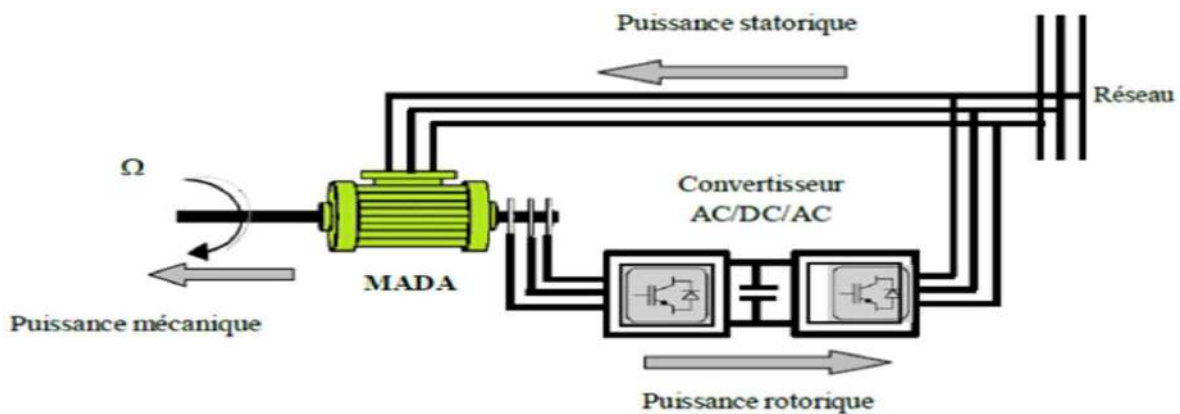


Figure I. 24: Le fonctionnement d'un mode moteur hypo-synchrone. [38]

**I.13 .2 Le fonctionnement d'un Mode Moteur Hyper-Synchrone:**

Sur la figure I.25, on peut observer que le réseau fournit de l'énergie à la fois au stator et au rotor, la puissance de glissement étant également fournie au rotor. En conséquence, le moteur fonctionne à des vitesses supérieures à la vitesse synchrone. Ce type de fonctionnement n'est pas possible pour la machine asynchrone à cage classique. [38]. [33]. [29].

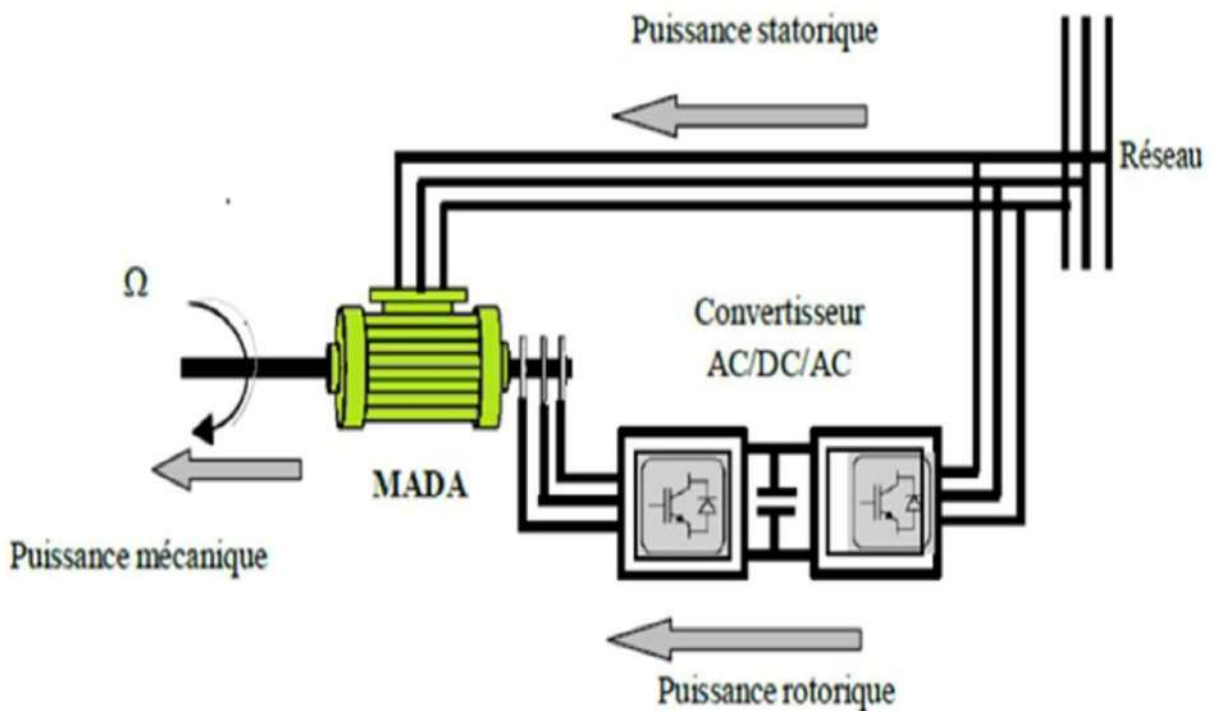


Figure I. 25: Le fonctionnement d'un mode moteur hypo-synchrone .[38]

**I.13 .3 Le fonctionnement d'un générateur Hypo-synchrone.:**

Sur la figure I.26, nous pouvons voir que le stator est chargé de fournir de l'énergie au réseau, tandis que le rotor absorbe la puissance de glissement. De ce fait, on peut observer la machine fonctionner en mode générateur lorsqu'elle est en dessous de la vitesse de synchronisme. Il est important de noter qu'une machine asynchrone à cage classique est incapable de fonctionner dans ce mode. [38]. [33]. [29].

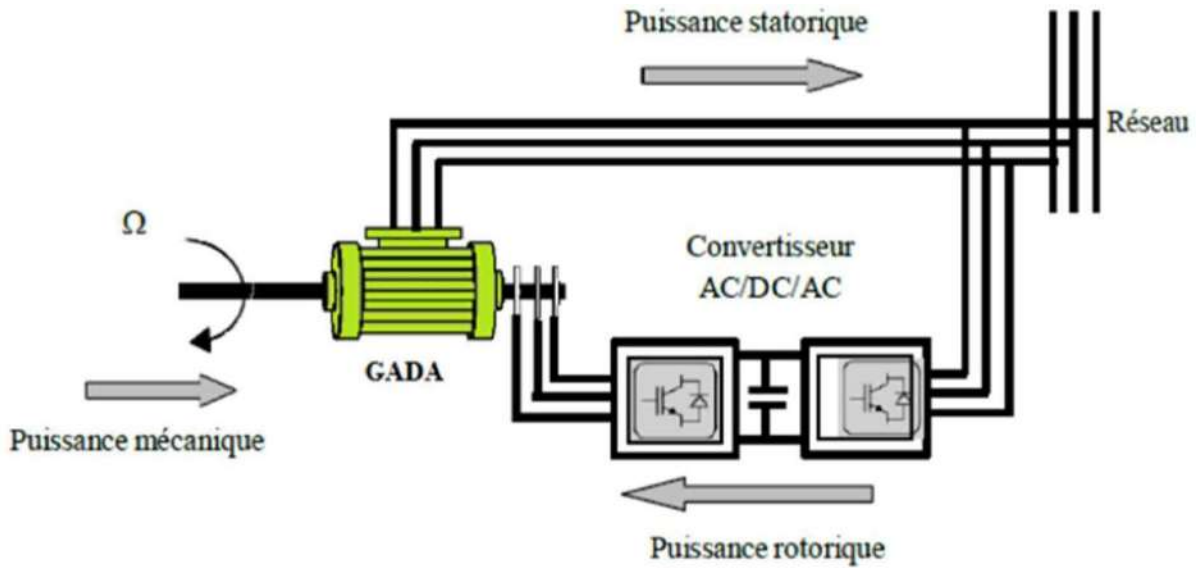


Figure I. 26: Le fonctionnement d'un générateur hypo-synchrone. [38]

#### I.13.4 Le fonctionnement d'un générateur Hypo-synchrone.:

Sur la figure I.27, on peut voir que le stator fournit de l'énergie au réseau, tandis que le rotor récupère l'énergie de glissement avant de la restituer au réseau. Le résultat est que le générateur fonctionne au-dessus de sa vitesse synchrone. Alors que la machine asynchrone à cage traditionnelle peut fonctionner dans ce mode, Dans cet agencement particulier, la puissance transférée par le mouvement de glissement est transformée en pertes d'énergie, notamment sous la forme d'un échauffement Joule à l'intérieur du rotor. [38]. [33]. [29].

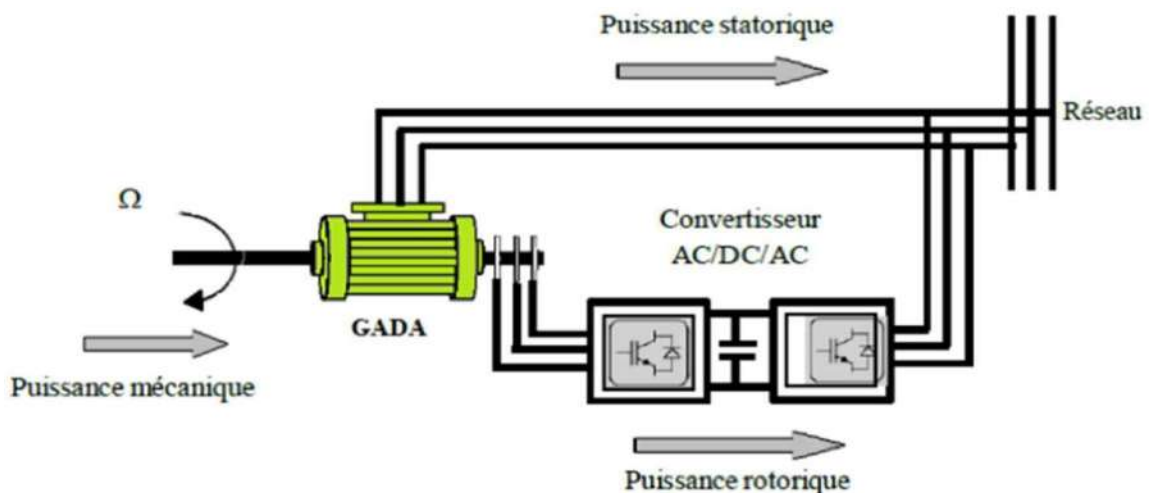


Figure I. 27: Le fonctionnement d'un générateur hypo-synchrone. [38]

Dans les quatre quadrants, le tableau I.1 présente un résumé des différents modes et régime de fonctionnement du MADA. Un signe négatif (-) associé à une puissance indique qu cette dernière est fournie par la MADA, tandis qu'un signe positif (+) est attribué lorsque l puissance provient de l'extérieur de la MADA. [38]. [33]. [29].

Tableau.I.5: Modes opérationnels de la MADA [38]

		Modes	
		Moteur $P_m < 0$	Génératrice $P_m > 0$
Régimes	Hypo synchrone	$P_s > 0$ $P_r < 0$	$P_s < 0$ $P_r > 0$
	Hyper synchrone	$P_s > 0$ $P_r > 0$	$P_s < 0$ $P_r < 0$

### I.14 Les applications de la GADA:

La section sur la conversion de l'énergie éolienne révèle que la puissance de sortie de l'éolienne dépend à la fois de sa vitesse de rotation et de la vitesse du vent. Étant donné que la vitesse du vent est variable, il est essentiel d'utiliser une vitesse variable afin de maximiser l'efficacité et garantir que la production d'électricité se situe à son niveau maximal.

La Générateurs asynchrone à double alimentation présente de nombreux avantages par rapport aux machines asynchrones et synchrones, en particulier en ce qui concerne la plage de vitesses opérationnelles et la puissance d'entraînement, ainsi que la puissance générée en mode générateur. En outre, elle se caractérise par un comportement flexible à la commande, ce qui lui confère une grande polyvalence dans divers domaines d'application. GADA est considéré comme le meilleur choix pour une telle application, principalement parce qu'il peut fonctionner sur une large plage de vitesses un scénario de production illimité. Pour les éoliennes utilisant la technologie GADA, le stator est directement relié au réseau tandis que la connexion du rotor implique une interface en deux parties avec des convertisseurs statiques : un côté GADA et un autre côté réseau. [28].



### I.15 Avantages de la GADA

- La vitesse optimale peut être sélectionnée en ajustant la fréquence et la phase de la tension appliquée au rotor, permettant ainsi d'atteindre la puissance maximale. La commande avancée du générateur asynchrone à double alimentation (GADA) offre une précision de contrôle notable, grâce à la capacité du convertisseur de puissance à ajuster à la fois l'amplitude et la phase de la tension appliquée au rotor. Cette caractéristique, combinée à la commande de tangage dans les éoliennes, offre à l'opérateur un contrôle de puissance plus fin.
- En incorporant une double alimentation, il devient possible de réduire la taille des convertisseurs statiques, minimisant ainsi les pertes fer de la machine et améliorant son efficacité globale.
- Le transfert de puissance du rotor peut s'effectuer dans les deux sens.
- Les objectifs incluent la fourniture de puissance mécanique à la charge, la réduction de la taille des convertisseurs statiques pour minimiser les pertes de fer et améliorer l'efficacité, et permettre un transfert bidirectionnel de la puissance du rotor.

### I.15 CONCLUSION :

Ce chapitre propose une vision d'ensemble des éoliennes, abordant la question de l'énergie éolienne à l'échelle mondiale et locale. Nous avons amorcé la discussion en fournissant des définitions des éoliennes, puis en introduisant divers types, incluant les éoliennes verticales et horizontales. Nous avons également examiné les applications, les avantages, et les inconvénients de l'énergie éolienne. De plus, nous avons mis en évidence plusieurs machines clés utilisées dans les systèmes éoliens. Enfin, le chapitre offre une analyse du générateur asynchrone à double alimentation (GADA), explorant ses applications et avantage.

## **Chapitre II**

**Modélisation de la chaîne de  
conversion de la Energie éolienne**

## II. 1 Introduction :

Dans le domaine de la production d'énergie éolienne, il existe deux catégories principales d'éoliennes : celles avec un axe vertical et celles avec un axe horizontal à l'heure actuelle, Les éoliennes horizontales sont plus couramment utilisées que leurs homologues à axe vertical en raison des considérations économiques associées à leur fabrication et à leur installation. Dans le domaine de l'axe horizontal, il y a une distinction entre vitesse constante et vitesse variable. Ce dernier type est fréquemment utilisé pour produire de l'électricité sur le réseau électrique.

La préférence pour l'éolienne à vitesse variable a augmenté par rapport à l'éolienne à vitesse fixe car elle améliore l'extraction d'énergie à faible vitesse de vent et maintient une puissance continue à des vitesses de vent élevées.

Dans notre recherche, nous avons pris la décision d'analyser les éoliennes à vitesse variable à l'aide d'un générateur électrique connu sous le nom de générateur asynchrone double alimentation (GADA), qui appartient à la catégorie des machines rotatives asynchrones.

L'objectif de ce chapitre est de fournir un modèle de système de vent à vitesse variable basé sur GADA. Après tout cela, les résultats de la simulation réalisée avec le logiciel MATLAB sont examinés et analysés.

## II.2 Modèle de la turbine eolienne

### II.2.1 Modèle source primaire : le vent

Lorsqu'il s'agit de reproduire les caractéristiques de la vitesse du vent, deux approches sont disponibles. Une option consiste à effectuer des mesures expérimentales à un endroit spécifique, tandis que l'autre implique l'utilisation d'une modélisation mathématique au moyen de techniques analytiques. Dans ce cas particulier, Nous opterons pour cette méthode finale en raison de sa polyvalence dans divers scénarios. La caractéristique spectrale de Van Der Hoven est la technique dominante et largement acceptée pour la modélisation du vent. En utilisant cette approche, Nous avons la capacité de déterminer la vitesse du vent, notée  $V$ .

$$V = f(t) \quad \text{II.1}$$

Dans le champ de représentation du vent , une fonction scalaire est souvent utilisée pour capturer ses variations temporelles [19]. Cette fonction peut être découpée en deux

composantes distinctes : une évolution progressive de la moyenne et des Fluctuations [19], [24].

$$V = v_0 + \sum_i^n = 1A_i \sin(w_i t + \varphi_i) \quad II.2$$

avec ;

$v_0$  : la valeur moyenne de la vitesse du vent ;

$A_i$  : amplitude de l'harmonique de l'ordre  $k$  ;

$W_i$  : pulsation de l'harmonique de l'ordre  $k$  ;

$n$  : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent ;

$\varphi_i$  : la phase initiale.

figure (II.1) fournit une illustration d'un profil de vent reconstruit dérivé de ces composantes.

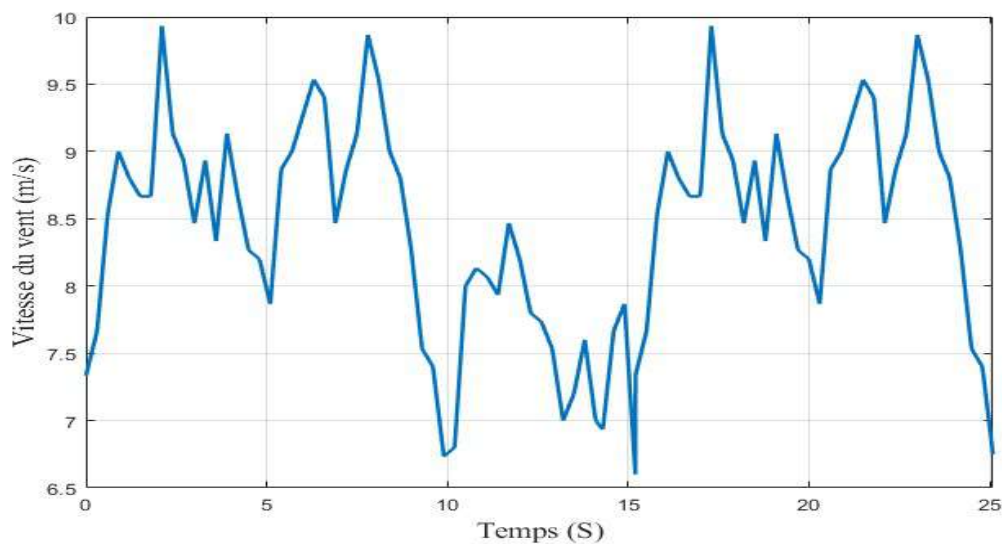


Figure II.1: – Le profil de vent s'applique aux éoliennes

#### a) Loi de Betz

Nous allons étudier le système éolien illustré dans la figure (II.2), comprenant une éolienne à axe horizontal. Les vitesses du vent avant la turbine et après son passage sont respectivement représentées par  $V_1$  et  $V_2$ . Pour déterminer la quantité d'air traversant le rotor en une seconde, nous supposons que la vitesse de l'air au rotor est la moyenne de  $V_1$  et  $V_2$ , soit  $(V_1 + V_2) / 2$ . L'air en mouvement, densité  $\rho$ , qui traverse la surface des pales de la turbine, désignée par  $S$ , est considéré comme tel.

$$m = \frac{\rho S(V_1 + V_2)}{2} \quad \text{II.3}$$

$$S = \pi R_t^2 \quad \text{II.4}$$

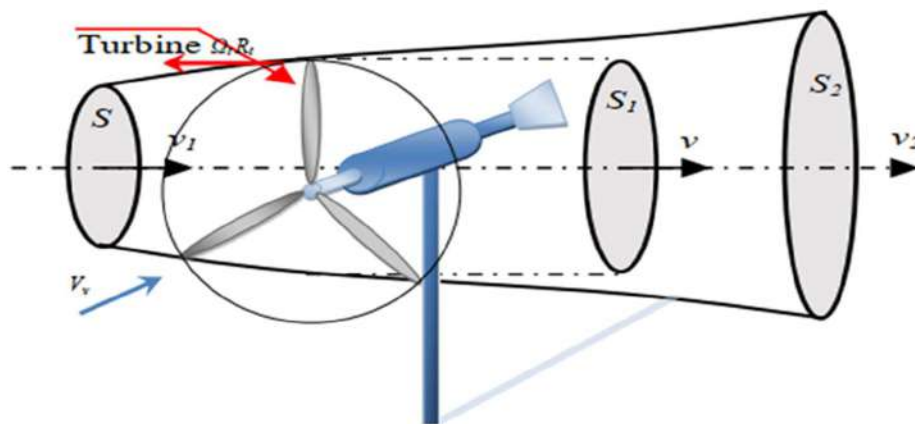


Figure II.2 : Tube de courant entourant l'éolienne

Calcul de la puissance d'extraction ( $P_t$ ) Selon la deuxième loi de Newton, il s'agit de prélever la moitié du produit massique en réduisant la vitesse du vent.

$$P_t = \frac{1}{2} m (V_1^2 + V_2^2) \quad \text{II.5}$$

Alternativement, nous pouvons remplacer l'expression de  $m$  de l'équation (II-4) pour obtenir le même résultat.

$$P_t = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 + V_2^2) \quad \text{II.6}$$

Si le vent passe sur la surface  $S$  sans aucune perturbation, il maintiendra la vitesse  $V_1$ , ce qui produira de la puissance  $P_v$ .

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad \text{II.7}$$

$\rho$  : Densité de l'air en  $\text{kg/m}^3$ .

$S$  : Surface circulaire balayée par la turbine en  $\text{m}^2$ .

$V_{\text{vent}}$  : Vitesse du vent en  $\text{m/s}$ .

La relation entre la puissance exploitée par le vent et la puissance potentielle maximale accessible détermine le rapport.

donc:

$$c_p = \frac{P_t}{P_v} = 0.593 \quad \text{II.8}$$

En examinant le graphique de la figure II.3, qui représente l'attribut associé à l'équation mentionnée précédemment, il devient évident que le coefficient de puissance CP, également connu sous le nom de rapport Pt/Pv, atteint son maximum à 16/27.

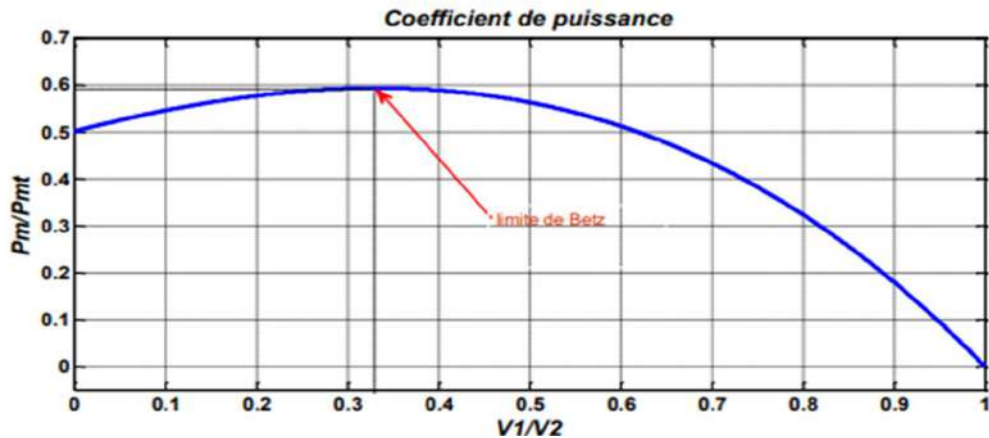


Figure II.3: Limite de Betz.

**b) Converti en énergie mécanique**

En fusionnant les équations (II-1) et (II-4), nous pouvons obtenir une expression de la puissance mécanique présente sur l'arbre de l'éolienne.

$$P_t = (P_t/P_v) * P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R_t^2 v_1^3 \cdot C_p \tag{II.9}$$

Cp : Le facteur de puissance est souvent appelé efficacité aérodynamique de la turbine.

Rt : Rayon des aubes de turbine. Appelé rapport de vitesse en bout d'aile ou vitesse spécifique,

Avec  $\Omega \cdot R_t$  : la vitesse linéaire aux deux bouts d'aile est déterminée par

En considérant le facteur de multiplication G, on peut calculer P<sub>mg</sub> disponible sur l'arbre en fonction du facteur de multiplica

$$P_{mg} = \frac{1}{2} c_p \left( \frac{\Omega_2 \cdot R_t}{G v_1} \right) \rho \cdot \pi \cdot R_t^2 v_1^3 \tag{II.10}$$

Avec

$\Omega_2$  : La vitesse mécaniquement grâce à l'utilisation d'un multiplicateur.

**II.3 Modèle et commande de la turbine éolienne**

**II.3.1 Modèle de la turbine**

Notre thèse se concentre sur l'examen d'un système constitué d'une éolienne comprenant trois pales d'une longueur notée R. Ces pales sont montées sur un arbre d'entraînement primaire interconnecté avec un multiplicateur de gain G, comme illustré sur la (Figure II. 4).

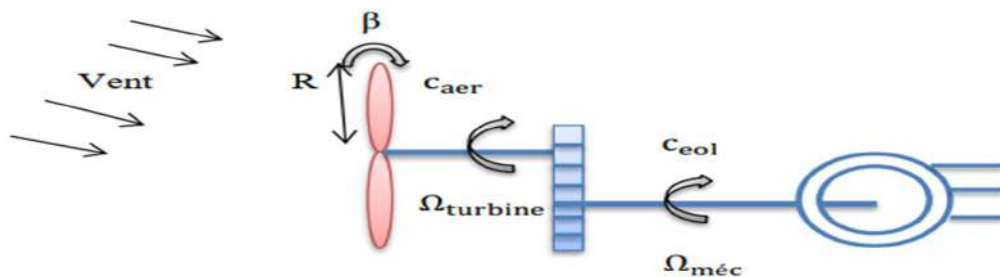


Figure II.4: Schéma de la turbine éolienne .

### II.3.2. Hypothèses simplificatrices

Afin de modéliser la turbine, nous utiliserons un ensemble d'hypothèses simplificatrices couramment utilisées. On suppose, pour l'essentiel, que :

- Les trois pales possèdent des paramètres identiques, notamment l'inertie, l'élasticité et le coefficient de frottement par rapport à l'air, ce qui indique qu'elles sont construites de manière équivalente.
- Les trois lames sont réglables et ont un coefficient de friction égal par rapport au support.
- La vitesse du vent est répartie uniformément entre toutes les pales.
- La négligence des pertes par frottement des turbines par rapport aux pertes par frottement des générateurs est évidente.

### II.2.2 Modèle aérodynamique

La puissance mécanique totale ( $P_t$ ) est une expression qui peut être dérivée en fusionnant les relations (II 8) et (II 9) de la section précédente, comme indiqué dans les références[40, 43- 44,46].

$$P_t = (P_t/P_v) * P_v = C_p * P_v = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R_t^2 v_1^3 \cdot C_p \quad \text{II.11}$$

L'introduction de "Oùaller". Estmarqué par : [43-44, 46] :

$$\lambda \lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v} \quad \text{II.12}$$

La vitesse relative, appelée Où  $\lambda$ ., est la mesure du rapport entre la vitesse linéaire des pales de l'éolienne à l'extrémité ( $\Omega \cdot R$ ) et la vitesse du vent ( $v$ ).

$\rho$  : La densité de l'air est mesurée à 1, 225kg/m<sup>3</sup>  $\Omega_t$  : La vitesse à laquelle la turbine tourne. ;

$R_t$  : La longueur d'une pale détermine le rayon de l'éolienne, tout comme le rayon du cercle est déni par la longueur de la pale.

L'efficacité aérodynamique de l'éolienne, appelée  $C_p$ , est déterminée à la fois par les caractéristiques de l'éolienne et par sa conception [40]. Il est important de noter qu'il existe une limite maximale à ce coefficient, appelée limite de Betz, qui a une valeur de 0,593. [43, 45]

$$C_p(\lambda, \beta) = (C1 - C2 \cdot (\beta - C3)) \cdot \sin \left[ \frac{\pi \cdot (\lambda + 0,1)}{18,5 - 0,3 \cdot (\beta - 2)} \right] - C4 \cdot (\lambda - C5) \cdot (\beta - C3) \quad \text{II.13}$$

Tel que selon

C1	C2	C3	C4	C5
0.5	0.0167	2	0.00184	3

Table 1.1 – les valeurs des coefficients

Pour notre thèse, nous utiliserons une corrélation estimée entre  $C_p$  et  $A$ , en tenant compte de leur relation en fonction. [43-44] :

$$c_t = \frac{p_t}{\Omega_t} = \frac{R p_t}{\lambda v} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \quad \text{II.14}$$

### II.3.3 Modèle de la partie mécanique

En simplifiant nos hypothèses, nous pouvons traiter les trois pales comme un système mécanique unifié, intégrant les propriétés mécaniques combinées de chaque pale. Cette approche nous permet de construire un modèle mécanique composé de deux masses, comme le montre l'illustration. (figure II.5)[43].

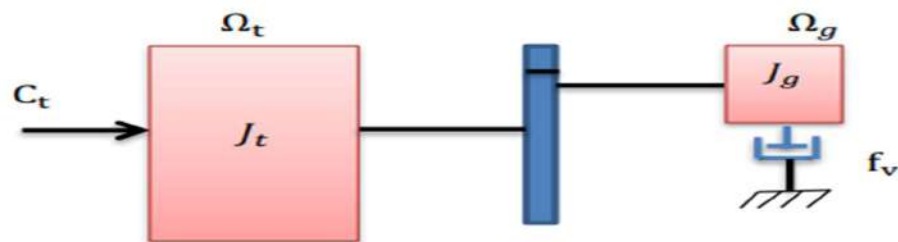


Figure II.5 : Modèle mécanique de la turbine

Le couple mécanique sur l'arbre GADA, représenté par  $C_m$ , et la vitesse de rotation du GADA, notée.

$\Omega_m$ : sont les variables clés à considérer.

Grâce au multiplicateur, la vitesse de rotation de l'arbre basse vitesse de la turbine est synchronisée



avec la vitesse de rotation de l'arbre rapide du GADA (Figure II .6). Il est important de noter la fonctionnalité sans faille du multiplicateur pour réaliser cette synchronisation. En conséquence, les pertes mécaniques peuvent être considérées comme insignifiantes, ce qui conduit à leur représentation à travers la paire d'expressions suivante [43].

$$\begin{aligned} C_m &= \frac{C_t}{G} \\ \Omega_m &= G * \Omega_t \end{aligned} \tag{II.15}$$

- $C_m$  et  $C_t$  représentent les couples du générateur et de l'éolienne en Newton mètres (N.m),
- $\Omega_m$  et  $\Omega_t$  désignent les vitesses angulaires du générateur et de l'éolienne en radians par seconde (rad/s ),
- $G$  représente le gain du multiplicateur.

### 2.3.4 Modèle de l'arbre

L'arbre de turbine se compose de divers composants, notamment la masse Les composants du rotor de la turbine, notamment les pales, le moyeu et une masse plus petite symbolisant le rotor du générateur, sont tous pris en compte. Lors de l'exploitation Une éolienne avec la possibilité d'ajuster sa vitesse, il y a deux régions distinctes à considérer : en dessous et au-dessus de la vitesse du vent désignée. Pour contrôler la vitesse de la turbine, des ajustements peuvent être apportés à la fois à l'angle des pales et au couple électromagnétique du générateur. Il est donc crucial d'examiner les performances de la turbine en dessous de sa puissance nominale.

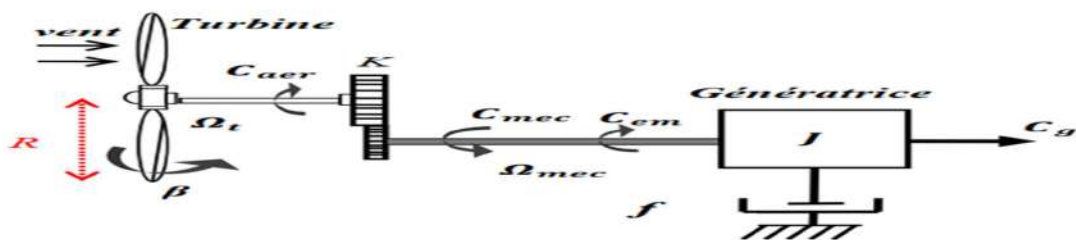


Figure II.6 : Modèle de transmission mécanique à une masse ramené sur l'arbre rapide la masse totale de l'éolienne, y compris les pales et le rotor, est indiquée comme inertie  $J_{Turbine}$  et est reportée sur l'arbre de la turbine.

Le modèle mécanique proposé intègre l'inertie combinée, appelée  $J$ , qui englobe à la fois l'inertie de la turbine transférée au rotor du générateur et l'inertie inhérente du générateur.

$$J = \frac{J_{turbine}}{G^2} + J_g \tag{II.16}$$

En utilisant L'équation de base de la dynamique sert de base à la compréhension des principes du mouvement., on peut déterminer avec précision la progression Le couple mécanique total du rotor peut être utilisé comme mesure de la vitesse mécanique.

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = c_{mec} \tag{II.17}$$

L'inertie totale du rotor du générateur, notée J, est un facteur dans le calcul du couple mécanique. C<sub>e</sub> couple comprend La force exercée par l'interaction des champs électromagnétiques C<sub>mec</sub> généré Le couple est généré par le générateur de friction C<sub>vis</sub> et La force de rotation générée par le multiplicateur C<sub>g</sub>.

$$c_{mec} = c_g - c_{em} - c_{vis} \tag{II.18}$$

Le couple résistant provoqué par le frottement, représenté par le coefficient de frottement visqueux f, est noté Cv dans le modèle.

$$c_{vis} = F \cdot \Omega_{mec} \tag{II.19}$$

La modélisation et la mécanique de l'éolienne sont illustrées à la figure II .7 sont représentées dans un schéma fonctionnel. Cette représentation visuelle illustre que La gestion de la vitesse de rotation Dm du GADA et de la turbine peut être réalisé grâce à des ajustements apportés soit à l'angle ~, soit à la Cem du GADA. De plus, La vitesse du vent est souvent prise en compte un élément perturbateur de l'aérodynamique, comme indiqué dans les références [43, 22].

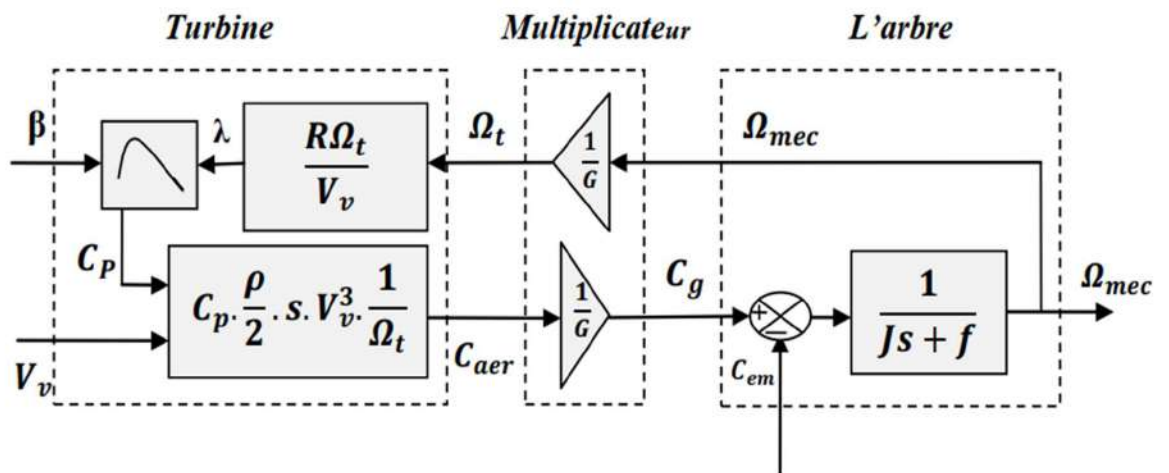


Figure II.7 : Modèle de l'éolienne

Après avoir fait référence au schéma fonctionnel du modèle, nous procédons à l'expression de la relation primaire régissant le système mécanique de la branche secondaire du GADA présente

une dynamique complexe, comme détaillé dans la référence [43].

$$\left(\frac{J_t}{G^2} + J_m\right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \cdot \Omega_m = C_m - C_{em} \quad \text{II.20}$$

### II.2.3.5 Les techniques permettant d'extraire une puissance maximale

Dans cette section, nous présenterons une technique de gestion des aspects électromagnétiques, et par conséquent de la puissance électromagnétique convertie, pour réguler la vitesse mécanique et optimiser la puissance électrique produite. L'approche communément appelée, connue sous le nom de suivi du point de puissance maximum (MPPT), fait partie intégrante de la zone 2 des caractéristiques opérationnelles de l'éolienne (Figure II.8). Il est important de faire la différence entre il existe deux familles distinctes de structures de contrôle, comme mentionné dans le.[18].

- Le contrôle de la vitesse mécanique grâce à des systèmes d'asservissement.;
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

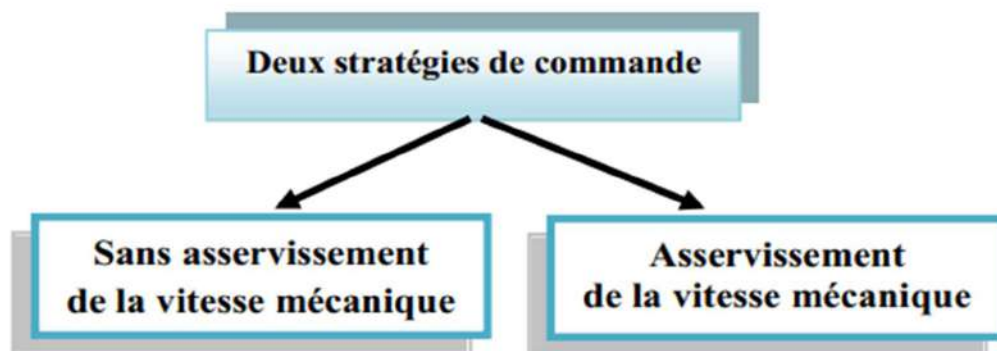


Figure II.8 : Stratégies de commande de la turbine

- Dans la pratique, parvenir à Détermination précise de la vitesse du vent. présente un défi pour deux raisons principales.
  - En raison de son emplacement derrière le rotor de la turbine, l'anémomètre produit des lectures inexactes de La vitesse du vent, telle qu'indiquée dans [21].
  - La vitesse du vent peut varier considérablement en fonction de la hauteur à laquelle l'anémomètre est placé, en raison du grand diamètre de la surface couverte par les pales de l'éolienne (généralement de l'ordre de 70 m pour une éolienne de 1,5 MW). S'appuyer sur un seul anémomètre ne fournit qu'une mesure locale de la vitesse du vent, qui peut ne pas représenter avec précision la vitesse moyenne subie par toutes les pales. [21]

La puissance extraite à l'aide de la technique d'extraction à vitesse contrôlée est compromise en cas de mesure de vitesse inexacte. En conséquence, de nombreuses éoliennes fonctionnent sans contrôle de vitesse pour éviter ce problème [21].

#### II.2.3.6 MPPT sans contrôle de vitesse de rotation

Le principe sous-jacent de La méthode de régulation utilisée repose sur la conviction que la vitesse du vent reste relativement constante pendant le mode dynamique, par rapport aux constantes de temps électriques de l'éolienne. Par conséquent, Le couple initial de la turbine est supposé négligeable [43, 45].

Avec cette hypothèse comme fondement, nous y sommes capables reformuler l'équation (3-42) comme indiqué dans [43].

$$JT \frac{d\Omega_t}{dt} = c_{mec} = c_t - c_{em} - c_f \quad \text{II.21}$$

Si l'on fait abstraction de l'impact du couple de frottement ( $C_{fv} = 0$ ) Par rapport au couple mécanique  $C_m$ , on peut le représenter de la manière suivante.

$$c_t = c_{em} \quad \text{II.22}$$

En mesurant la vitesse de rotation du générateur, il est possible d'estimer la vitesse de rotation de la turbine.

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad \text{II.23}$$

En raison de la complexité de mesurer avec précision la vitesse du vent, une estimation de cette variable est dérivée de  $\Omega_t$ .

$$v = \frac{R\Omega_t}{\lambda_{Opt}} \quad \text{II.24}$$

Estimations de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation des éoliennes. permettent de calculer le couple de l'éolienne. Cela peut s'exprimer ainsi :

$$c_t = \frac{1}{2\Omega_t} \rho_S v^3 CP(\lambda \cdot B) \quad \text{II.25}$$

En approchant le couple de l'éolienne, nous pouvons en déduire le couple électromagnétique.

$$C_{em\_ref} = \frac{c_t}{G} = \frac{1}{2G\Omega_t} \rho_S V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad \text{II.26}$$

En remplaçant les équations (II.16) et (II.17) dans l'équation (II.19), nous pouvons déduire le résultat suivant une relation du couple électromagnétique de contrôle, tel que :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2G^3\lambda^3} \rho\pi R^5 C_p(\lambda, \beta)\Omega_t^2 \tag{II.27}$$

Pour atteindre le plus haut niveau d'autorité , il est nécessaire d'ajuster la vitesse à sa valeur idéale, connue sous le nom de  $\lambda_{opt}$  , ce qui entraînera le CP maximum. Le couple électromagnétique peut être représenté par l'équation suivante [44] :

$$C_{em\_ref} = \frac{1}{2G^3\lambda_{opt}^3} \rho\pi R^5 C_{p\_max}\Omega_t^2 \tag{II.28}$$

Le principe du MPPT sans contrôle de la vitesse de rotation de l'éolienne est décrit dans la figure II.9, tel que référencé par les sources [22, 43-44].

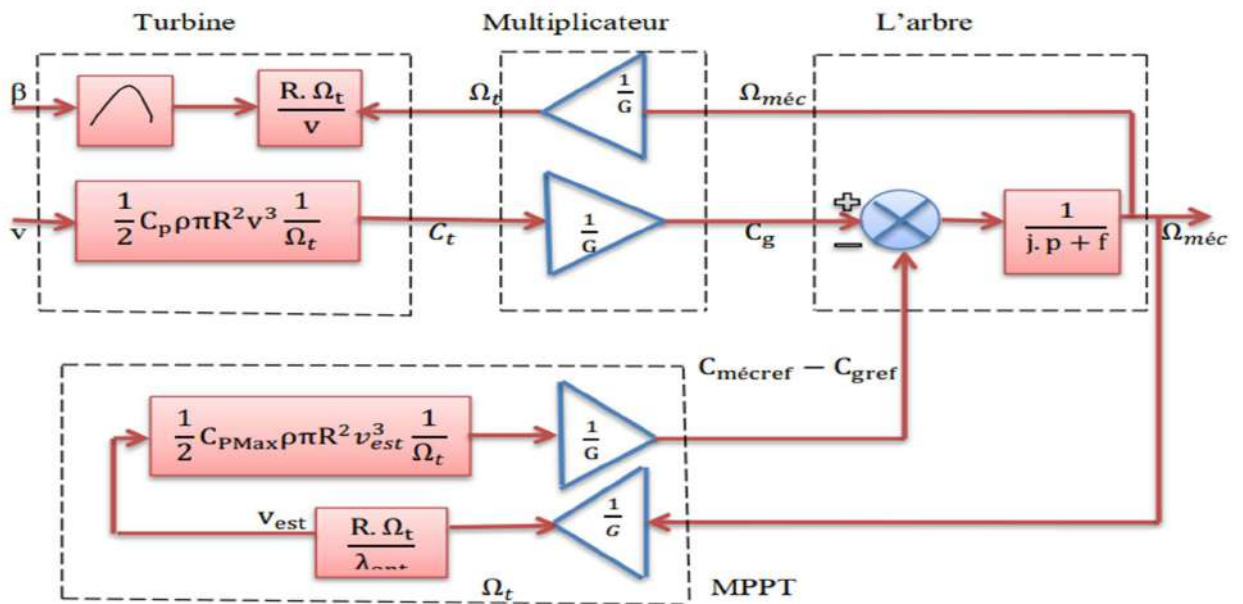


Figure II.9 : MPPT sans contrôle de vitesse de rotation

### II.4 Définition de l'onduleur.

Un onduleur utilise des composants électroniques pour transformer le DC en Ac en inversant Un onduleur utilise des composants électroniques pour transformer le DC en Ac en inversant la polarité du courant continu, permettant ainsi de produire un courant alternatif de sortie. Ceci est accompli en modifiant périodiquement les connexions entre l'entrée et la sortie, ce qui entraîne la production d'une tension et d'un courant alternatifs à la sortie. De plus, ce processus a la capacité de générer un système polyphasé. La Figure (II.10).

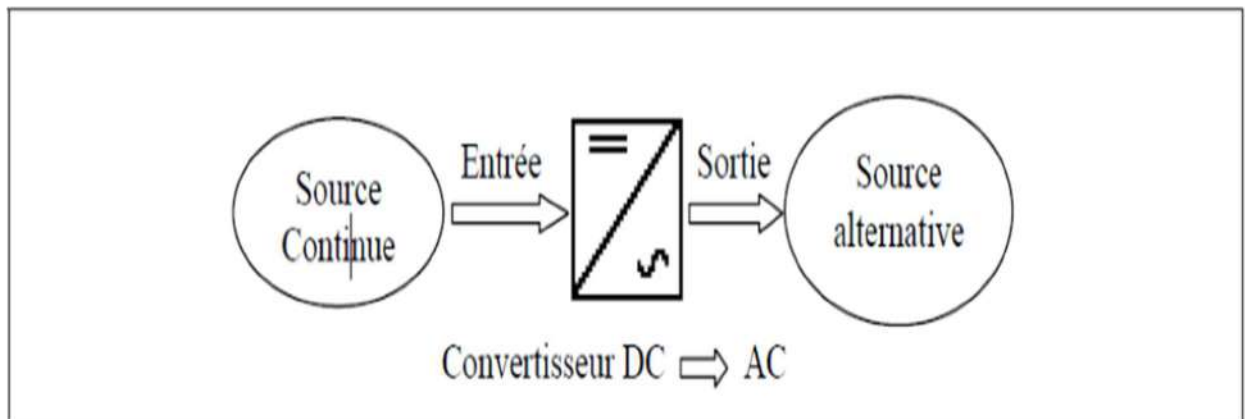


Figure II.10 : Schéma de principe de la conversion Continu - Alternative (DC – AC)

#### II.4.1 Modélisation et commande de l'onduleur

Un onduleur est un dispositif électronique statique qui transforme un DC en AC pour alimenter une charge [45],[46]. Différentes méthodes sont employées pour contrôler les interrupteurs d'un onduleur. La modulation de largeur d'impulsion (MLI) est la méthode principalement utilisée pour le contrôle. Différents types de MLI sont utilisés dans des applications pratiques, et une liste de certaines options peut être trouvée dans [27]

- Le processus de modulation sinusoïdale-triangle implique l'examen d'un signal de référence à des fins de comparaison sinusoïdale avec une forme d'onde porteuse typiquement triangulaire.
- Des modulations prédéterminées sont utilisées pour calculer les angles de commutation hors ligne, annulant efficacement des composants spécifiques du spectre de tension et générant une onde fondamentale souhaitée.

Nous nous concentrons sur la méthode initiale. Pour simuler l'onduleur de tension (Fig. II.12), nous traitons la nourriture est considérée par nous comme une source excellente et idéale, comprenant deux générateurs de force électromagnétique. Ces générateurs sont d'égale amplitude,  $E/2$ , et sont connectés en un point spécifique étiqueté  $n_0$  [13].

Nous avons utilisé des mesures de tension de base, notamment  $V_{an}$ ,  $V_{bn}$  et  $V_{cn}$ , pour construire la machine. Les opérations de l'onduleur sont régies par les grandeurs logiques  $S_i$ . Les transistors, appelés  $T_i$  et  $T_i'$ , sont considérés comme des commutateurs idéaux dans ce contexte.

- Dans le cas où  $S_i = 1$ ,  $T_i$  est considéré comme fermé, tandis que  $T_i'$  est considéré comme ouvert.
- Dans le cas où  $S_i = 0$ , on peut conclure que  $T_i$  est ouvert et  $T_i'$  est fermé.

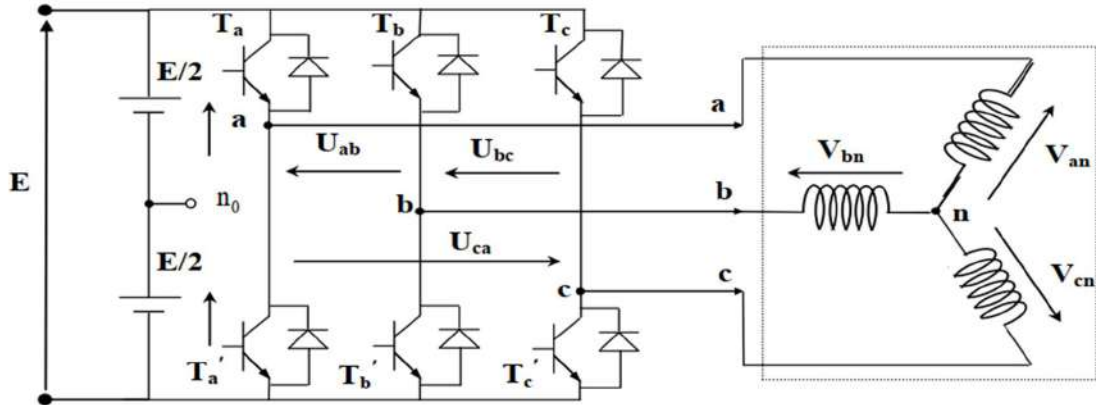


Figure II.11 : Schéma structurel d'un convertisseur de tension triphasé

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

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an_0} - V_{bn_0} \\ U_{bc} = V_{bn_0} - V_{cn_0} \\ U_{ca} = V_{cn_0} - V_{an_0} \end{cases} \quad \text{II.29}$$

Puisque les tensions composées donnent lieu à des tensions simples au niveau de la charge, la somme de ces phases est nulle, donc:

$$\begin{cases} V_{an} = 1/3[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn} = 1/3[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn} = 1/3[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad \text{II.30}$$

En intégrant la tension de la charge par rapport au point de référence  $n_0$ , on obtient une relative neutralité, il est possible de déduire ces valeurs Dérivé des tensions produites par la sortie de l'onduleur.

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn_0} = V_{an_0} \\ V_{bn} + V_{nn_0} = V_{bn_0} \\ V_{cn} + V_{nn_0} = V_{cn_0} \end{cases} \quad \text{II.31}$$

On peut donc en déduire que :

$$V_{nn_0} = 1/3 [V_{an_0} + V_{bn_0} + v_{cn_0}] \quad \text{II.32}$$

Si l'on considère l'état des commutateurs, qui sont supposés parfaits et peuvent être soit 1, soit 0, alors nous avons le scénario suivant.

$$V_{in_0} = S_i \cdot U_{dc} - \frac{U_{dc}}{2} = (S_i - 0.5)U_{dc} \quad \text{.II.33}$$

On trouve donc :

$$\begin{cases} V_{an_0} = (S_i - 0.5)U_{dc} \\ V_{bn_0} = (S_i - 0.5)U_{dc} \\ V_{cn_0} = (S_i - 0.5)U_{dc} \end{cases} \quad \text{II.34}$$

En remplaçant l'équation (II.29) dans l'équation (II.28), nous obtenons l'expression résultante.

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{2}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{bn} = \frac{1}{2}V_{an_0} + \frac{1}{3}V_{bn_0} - \frac{1}{3}V_{cn_0} \\ V_{cn} = \frac{1}{2}V_{an_0} - \frac{1}{3}V_{bn_0} + \frac{1}{3}V_{cn_0} \end{cases} \quad \text{II.35}$$

En remplaçant l'équation (II.62) par l'équation (II.64), le résultat obtenu peut être résumé comme suit :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II.36}$$

## II.4.2 Commande par modulation Sinus-Triangle

Dans le processus de modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale-triangle (PWM), une comparaison est effectuée entre une onde de modulation basse fréquence, appelée tension de référence, et une onde porteuse haute fréquence en forme de triangle . Les points d'intersection entre la porteuse et le modulateur déterminent le timing des commutations. L'onde porteuse est responsable du réglage de la fréquence de commutation des commutateurs, comme mentionné dans les références [13], [45] et [46].

L'expression des tensions sinusoïdales de référence est la suivante :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot E \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{II.37}$$

Afin d'assurer le transfert de puissance, utilisons la méthode de transformation triphasée/biphasée.



$$\begin{bmatrix} V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} \quad \text{II.38}$$

L'expression mathématique de l'équation du porteur est la suivante :

$$vp(t) = \begin{cases} 0 & 0 \leq t \leq \frac{t}{T_p} \\ Vm_p \left[ 4 \left( \frac{t}{T_p} \right) - 1 \right] & \text{Si } 0 \leq t \leq \frac{T_p}{2} \\ Vm_p \left[ -4 \left( \frac{t}{T_p} \right) + 3 \right] & \text{Si } \frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p \end{cases} \quad \text{II.39}$$

Ou

$$T_p = 1/f_p$$

f : ‘‘La fréquence de la tension de référence, mesurée en hertz (Hz)’’,

T<sub>p</sub> : désigne la période de la porteuse (en secondes)

V<sub>m</sub> : indique l'amplitude de la tension de référence (en volts)

V<sub>ref</sub> : représente la tension de référence (en volts)

V<sub>pm</sub> : La valeur maximale de l'onde de modulation est mesurée en volts (V).

Les deux paramètres suivants définissent cette technique :

1. L'indice de modulation m, qui est le rapport de la fréquence de modulation (f<sub>p</sub>) à la fréquence de référence (f),

$$m = f_p / f$$

2. Le coefficient r, utilisé pour ajuster la tension, est déterminé en divisant l'amplitude de la tension de référence (V<sub>m</sub>) par la valeur crête de l'onde de modulation (V<sub>pm</sub>).

$$r = V_m / V_{pm}$$

f<sub>p</sub>: La fréquence porteuse, mesurée en hertz (Hz),

La détermination des temps de commutation repose sur les intersections entre la porteuse et les points de modulation, comme le montre( la Figure II.12).

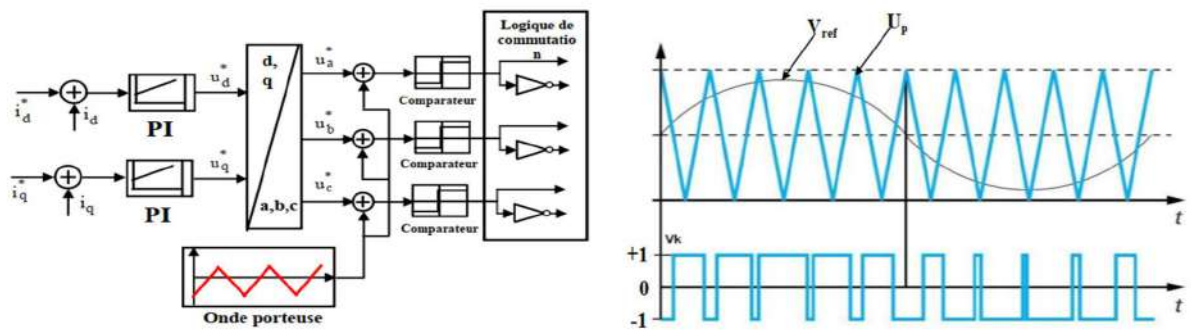


Figure II.12 : Principes techniques du triangle-sinusoidal.

## II.5 Modulation MLI vectorielle (SVM)

### A) Principe de la MLI vectorielle

Le concept de modulation vectorielle MLI ou SVM (Space Vector) implique la projection du vecteur de tension du stator  $V_s$  Vecteur de tension souhaités sur les L'onduleur a deux états distincts entre lesquels il est possible de basculer.. En calculant les projections, nous pouvons déterminer Les moments de commutation souhaités pour les états de commutation non nuls de l'onduleur, notés  $T_i$  et  $T_{i+1}$ . Il est important de s'assurer que la somme de ces deux temps est Afin de garantir une fréquence de commutation constante, la période de commutation  $T_s$  de l'onduleur est maintenue supérieure à une certaine valeur. De plus, un état zéro est implémenté dans l'onduleur pendant une durée correspondante de  $T_s$  pour contrebalancer cet ajustement. Afin de maintenir une fréquence de découpage constante, l'onduleur est soumis à un état zéro pendant une durée complémentaire de  $T_s$ , comme mentionné dans [59].

En calculant globalement un vecteur de tension de référence et en l'approchant Un vecteur de tension moyen sur une période de modulation  $T_s$  est la valeur moyenne du vecteur de tension sur cette période. Il est calculé en intégrant le vecteur de tension sur la période de modulation et en divisant par la période de temps  $T_s$ . Ce vecteur de tension moyen est obtenu en appliquant des vecteurs de tension adjacents, ainsi que des vecteurs zéro  $V_0$  et  $V_7$  [58], [59]

Sur la figure II.11, nous pouvons observer un scénario dans lequel le secteur 1 abrite le vecteur de référence, tandis que les vecteurs voisins sont nommés de manière appropriée  $V_1$  et  $V_2$ . Pour générer Le vecteur de modulation de largeur d'impulsion (MLI), De plus, le vecteur de tension statorique recherché est également inclus. est projeté sur les deux vecteurs de tension voisins associés à  $V_1$  et  $V_2$ . Notons respectivement Le temps nécessaire pour que ces vecteurs soient

appliqués  $t_1$  et  $t_2$ . Il est crucial de noter que la somme des  $A_{in}$  afin de garantir un bon fonctionnement, la durée d'application des vecteurs zéro doit être plus courte que la période de commutation  $T_s$  de l'onduleur, comme mentionné dans [59].

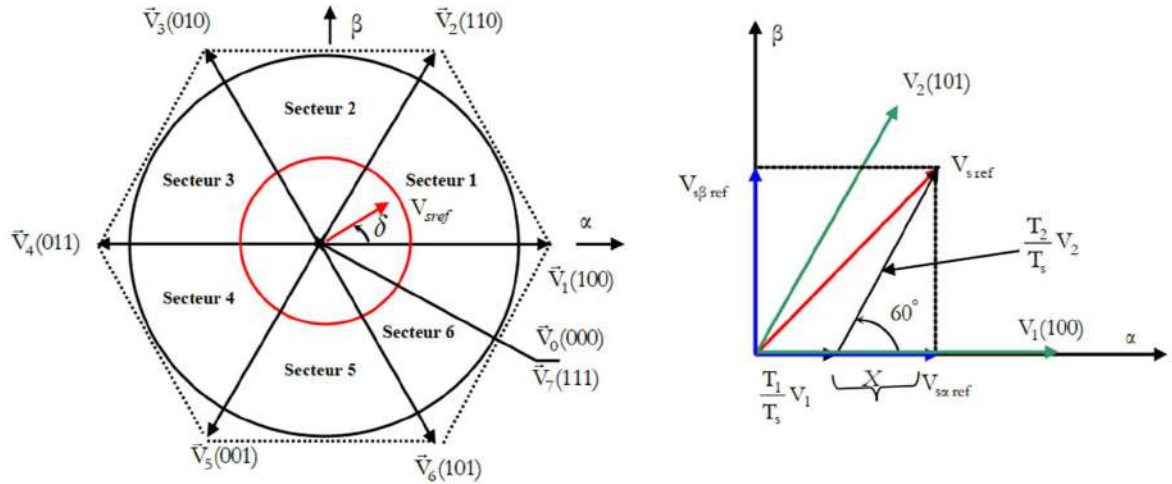


Figure II.13 : Analyse vectorielle de tension de référence.

Dans le cas de la zone 1, le vecteur tension de référence moyenne  $V_{s\_ref}$  est donné comme suit :

$$\begin{pmatrix} V_{sref} T_s = T_1 V_1 + T_2 V_2 \\ T_s = T_1 + T_2 + T_0 \end{pmatrix} \quad \text{II.40}$$

Où:

$T_s$ : La période de commutation est symbolisée

$T_1$ : Le temps nécessaire à l'application du vecteur  $V_1$

$T_2$ : Le temps d'application du vecteur  $V_2$

$T_0$ : a séquence de roue libre est appliquée pendant une durée

En supposant que le vecteur de référence  $V_{s\_ref}$  chevauche initialement le vecteur  $V_1$ , les deux chaînes sont actives simultanément. Pendant la période  $T_1$ , la séquence associée au vecteur  $V_1$  est appliquée. En revanche, pendant la période de temps  $T_0$ , la séquence de rotation libre est appliquée. Cependant, la séquence correspondant au vecteur  $V_2$  est invalide car sa durée  $T_2$  est nulle. À mesure que le vecteur de référence  $V_{s\_ref}$  s'éloigne du vecteur  $V_1$  et se rapproche du vecteur  $V_2$ , la période  $T_1$  diminue tandis que la période  $T_2$  augmente. Lorsque le vecteur  $V_{s\_ref}$  atteint le vecteur  $V_2$ , la période  $T_1$  devient égale à 0 et la période  $T_2$  atteint son maximum [58], [59].

$S_a$	$S_b$	$S_c$	$V_{an}$	$V_{bn}$	$V_{cn}$	$V_{s\alpha}$	$V_{s\beta}$
0	0	0	0	0	0	0	0
1	0	0	$\frac{2E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$\frac{2E}{3}$	0
1	1	0	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$-\frac{2E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{\sqrt{3}}$
0	1	0	$-\frac{E}{3}$	$\frac{2E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$\frac{E}{\sqrt{3}}$
0	1	1	$-\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$-\frac{2E}{3}$	0
0	0	1	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$\frac{2E}{3}$	$-\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{\sqrt{3}}$
1	0	1	$\frac{E}{3}$	$-\frac{2E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$\frac{E}{3}$	$-\frac{E}{\sqrt{3}}$
1	1	1	0	0	0	0	0

Tab.II.2: Tensions statoriques.

En utilisant la relation II.34, nous avons la possibilité d'établir les tensions qui existent sur les bobinages du moteur. Afin d'acquérir ces tensions dans le référentiel, nous utiliserons l'équation II.35 qui, L'onduleur est soumis à l'application des huit vecteurs de commutation, donnera les données présentées dans le tableau II.1.

❖ Détermination des arcs

La répartition des secteurs  $S_i = (1, 2, 3, 4, 5, 6)$  différents angles est déterminée par le tableau II.2.

$\delta$	$0 \leq \delta \leq \frac{\pi}{3}$	$\frac{\pi}{3} \leq \delta \leq \frac{2\pi}{3}$	$\frac{2\pi}{3} \leq \delta \leq \pi$	$\pi \leq \delta \leq \frac{4\pi}{3}$	$\frac{4\pi}{3} \leq \delta \leq \frac{5\pi}{3}$	$\frac{5\pi}{3} \leq \delta \leq \pi$
Secteur $S_i$	$S_1$	$S_2$	$S_3$	$S_4$	$S_5$	$S_6$

Tab.II.3: Identification du secteur.

La détermination du secteur repose sur la localisation spécifique du vecteur dans le plan complexe, désignée par les coordonnées  $(\alpha, \beta)$ , qui représente la phase du vecteur telle que définie dans .

$$\delta = \arctan \left( \frac{V_{s\beta ref}}{V_{s\alpha ref}} \right) \quad \text{II.41}$$

❖ **Calcul des variables X, Y et Z**

Le calcul des périodes T1 et T2 peut être déterminé grâce à une méthode de projection simple. (Fig.II.11) :

$$\begin{aligned} V_{s\beta-ref} &= \frac{T_2}{T_s} |V_2| * \text{Cos} (30^\circ) \\ V_{s\alpha-ref} &= \frac{T_1}{T_s} |V_1| + X \\ X &= \frac{V_{s\beta-ref}}{\text{tang}(60^\circ)} \end{aligned} \quad \text{II.42}$$

Comme indiqué dans le tableau II.1, les délais d'application de chaque vecteur sont fournis.

$$\begin{aligned} T_1 &= \frac{T_s}{2E} (3V_{s\alpha ref} - \sqrt{3}V_{s\beta ref}) \\ T_2 &= \sqrt{3} \frac{T_s}{E} V_{s\beta ref} \end{aligned} \quad \text{II.43}$$

Pendant toute la durée restante, le vecteur zéro est appliqué.

Pour chaque secteur, ce calcul est effectué de manière répétée, établissant un lien entre le temps d'application des vecteurs et les variables X, Y et Z.

$$\begin{aligned} X &= \sqrt{3} \cdot \frac{T_s}{E} V_{s\beta ref} \\ Y &= \frac{T_s}{2E} (\sqrt{3}V_{s\beta ref} + 3 \cdot V_{s\alpha ref}) \\ Z &= \frac{T_s}{2E} (\sqrt{3} \cdot V_{s\beta ref} - 3 \cdot V_{s\alpha ref}) \end{aligned} \quad \text{II.44}$$

Pour le secteur 1,  $T_1 = -Z$  et  $T_1 = X$

❖ **Calcul de T1 et T2 pour chaque secteur**

La détermination du secteur (i) repose sur l'utilisation de l'argument de la tension de référence comme fondement.

$$\delta = \arctan \left( \frac{V_{s\beta ref}}{V_{s\alpha ref}} \right), (i - 1) \frac{\pi}{3} \leq \delta \leq i \frac{\pi}{3}. \quad \text{II.45}$$

Ci-dessous, vous trouverez un tableau qui décrit Sur la base des valeurs fournies de X, Y et Z, les durées T1 et T2 d'application de vecteurs adjacents pour chaque secteur sont déterminées..

Secteur	1	2	3	4	5	6
T <sub>i</sub>	-Z	Y	X	Z	-Y	-X
T <sub>i+1</sub>	X	Z	-Y	-X	-Z	Y

Tab.II.4: fournit des calculs pour déterminer les temps d'application de vecteurs qui ne sont pas égaux à zéro.

❖ Génération des signaux modulants Ta-on Tb-on et Tc-on

Parmi les ratios conjoncturels essentiels, trois sont jugés nécessaires:

$$\begin{aligned}
 T_{aon} &= \frac{T_s - T_i - T_{i+1}}{2} \\
 T_{bon} &= T_{aon} + T_i \\
 T_{con} &= T_{bon} + T_{i+1}
 \end{aligned}
 \tag{II.46}$$

❖ Génération des séries d'impulsions Sa, Sb et Sc

Le tableau ci-dessous fournit les signaux de contrôle (Sa, Sb, Sc) en fonction de T<sub>xon</sub>, démontrant le processus de détermination.

Secteur	1	2	3	4	5	6
Signaux						
S <sub>a</sub>	T <sub>aon</sub>	T <sub>bon</sub>	T <sub>con</sub>	T <sub>con</sub>	T <sub>bon</sub>	T <sub>aon</sub>
S <sub>b</sub>	T <sub>bon</sub>	T <sub>aon</sub>	T <sub>aon</sub>	T <sub>bon</sub>	T <sub>con</sub>	T <sub>con</sub>
S <sub>c</sub>	T <sub>con</sub>	T <sub>con</sub>	T <sub>bon</sub>	T <sub>aon</sub>	T <sub>aon</sub>	T <sub>bon</sub>

Tab.II.5: Signaux de commande des interrupteurs de l'onduleur.

**II.6 modèle GADA une générateur asynchrone à double alimentation.**

Afin d'analyser plus facilement le générateur asynchrone idéalisé à double alimentation, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été incorporées..

- ✓ En maintenant une épaisseur constante de l'entrefer, les effets négatifs des encoches sont efficacement minimisés.
- ✓ L'impact de la saturation des circuits magnétiques, de l'hystérésis et des courants de Foucault peut être considéré comme négligeable.
- ✓ Quelle que soit la température, les résistances des bobinages restent constantes, on choisit donc de faire abstraction de l'effet peau.

Nous reconnaissons que la distribution sinusoïdale du f.m.m est le résultat direct des contributions

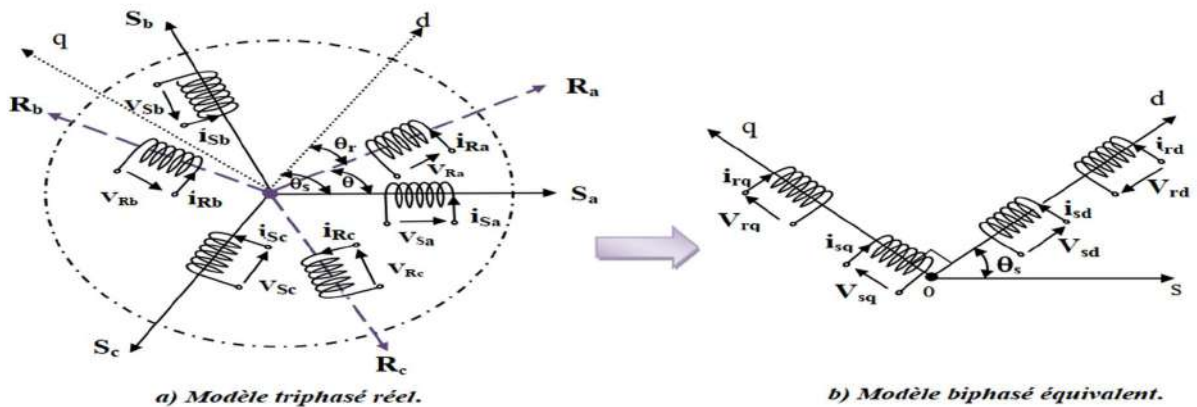
apportées par chacun des renforts.

**II.6.1 Modèle de la GADA:**

Ensuite, nous approfondirons le fonctionnement complexe des machines asynchrones à double source. Constituée de deux parties essentielles : le stator et le rotor, cette machine fonctionne selon un modèle dynamique. Le rotor, situé à l'intérieur du compartiment moteur, tourne, tandis que les stators restent rapprochés, séparés seulement par un mince entrefer.

Le stator et le rotor, tous deux constitués de trois enroulements du même type, font partie intégrante du circuit. Les circuits sont méticuleusement formés en enroulant ces bobines, ce qui leur permet d'être interconnectés dans une configuration en étoile ou en triangle. La seule distinction notable est que l'enroulement du rotor est relié à trois ou quatre spires, qui servent de plate-forme mobile pour les balais de charbon. Les enroulements placés dans le stator sont nommés A, B et C.

Enroulements d'une machine électrique à rotor bobiné asynchrone. répartis dans une configuration sinusoïdale, parallèlement au rotor et espacés de 120 degrés. La figure (II-15) présente visuellement la répartition des bobinages dans une machine électrique avec une paire de pôles  $P=1$ . En règle générale, les machines électriques comportent de nombreuses paires de pôles, En disposant les bobines en parallèle et en les espaçant de 120 degrés, un couple plus important est généré par la machine, ce qui entraîne une diminution de la vitesse de rotation.



**Figure II.14 :** Représentation de la MADA dans le repère de Park.

$S_a, S_b, S_c$  : Vecteurs directeurs le long du bobinage du stator.

$R_a, R_b, R_c$  : Vecteurs de direction le long du bobinage du rotor.

$\theta_r$ : est l'angle du rotor entre l'arbre du rotor et l'axe d.

$\theta_s$  : est l'angle du stator entre l'axe du stator et l'axe d.

$\theta$  : angle de position entre stator et rotor.

simplificatrices, nous pouvons exprimer les équations pour les tensions triphasées du stator et du rotor triphasé comme suit :

$$\begin{cases} [V_{ABC}] = R_S [I_{ABC}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{ABC}] \\ [V_{abc}] = R_r [I_{abc}] + \frac{d}{dt} [\varphi_{abc}] \end{cases} \quad \text{II.47}$$

L'expression des flux dans les phases statorique et rotorique est représentée sous forme totalisée.

$$\begin{cases} [\varphi_{ABC}] = [L_s][I_{ABC}] + [M][\varphi_{abc}] \\ [\varphi_{abc}] = [L_r][I_{abc}] + [M][\varphi_{ABC}] \end{cases} \quad \text{II.48}$$

Avec:

$L_s$  : L'inductance du stator varie de manière cyclique.

$L_r$  : L'inductance du mouvement cyclique du rotor.

$M$  : Inductance mutuelle .

### II.6.2 Transformation de Park

La transformation biaxiale, souvent appelée transformation de Park, permet de transformer des quantités réelles en leurs composantes homopolaires correspondantes (indexées par O), l'axe direct (indexé par d) et l'axe en quadrature (indexé par q). Cette transformation simplifie le passage d'une machine réelle multiphasée à une machine virtuelle biphasée.

En référence à la figure II.2, on peut utiliser la transformation de Park, comme dans la référence [36]. Concernant le stator :

$$[H_{s \ 0dq}] = [p_\theta][H_{s \ abc}] \quad \text{II.49}$$

Où

$H_s$  : est la grandeur statorique (tension, courant ou flux), avec .

$[p_\theta]$  : est la matrice de Park, déterminée par :

$$[P_\theta] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta & \cos \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta & -\sin \left( \theta - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad \text{II.50}$$

De même Concernant le rotor :

$$[H_{r \ 0dq}] = [p_\theta][H_{r \ abc}] \quad \text{II.51}$$

Pour une quantité de rotor (tension, courant ou flux) notée  $H_r$ .



Le système abc peut être transformé en dq par une transformation inverse biphasée à polyphasée, Le système peut être exprimé à l'aide de l'équation suivante.

$$[H_{abc}] = P_{\theta}^{-1}[H_{dq0}] \quad \text{II.52}$$

Son inverse est donné par :

$$[P^{-1}_{\theta}] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos \theta_a & \cos \left( \theta_a - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \theta_a - \frac{4\pi}{3} \right) \\ -\sin \theta_a & -\sin \left( \theta_a - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \theta_a - \frac{4\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad \text{II.53}$$

### II.6.3 Modèle de la GADA dans le repère de Park

En effectuant une conversion PARK, il est possible de convertir la référence triphasée en un modèle biphasé plus raisonnable (Figure II.2). Cette transformation rationalise considérablement la gestion des modèles. Les équations MADA sont dérivées de la transformation PARK et sont applicables dans des référentiels tournant à vitesse électrique  $\omega_s$  et aux systèmes tournant à vitesse électrique  $p.\Omega$ , peut être trouvé dans les références citées [16], [34] et [39].

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \Phi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} - \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad \begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_r \Phi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} - \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad \text{II.54}$$

La corrélation entre les flux et les courants peut être déterminée à travers les équations suivantes :

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad \text{II.55}$$

$$\begin{cases} \Phi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qr} \end{cases} \quad \text{II.56}$$

Où

$R_s, R_r, L_s, L_r$  : sont respectivement la résistance et l'inductance du stator et du rotor du GADA.

$V_{s(dq)}, V_{r(dq)}, I_{s(dq)}, I_{r(dq)}, \Phi_{s(dq)}, \Phi_{r(dq)}$  : Les axes d et q des tensions, des courants, des flux du stator et du rotor représentent chacun leurs composants respectifs

La relation entre le couple électromagnétique et les courants et flux statoriques peut être décrite par une fonction mathématique.

$$C_{em} = p(I_{sq}\Phi_{sd} - I_{sd}\Phi_{sq}) \quad \text{II.57}$$

L'expression du couple électromagnétique s'écrit comme suit :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (I_{rq}\Phi_{sd} - I_{rd}\Phi_{sq}) \quad \text{II.58}$$

La puissance active et la puissance réactive du stator et du rotor peuvent être exprimées de la manière suivante :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd}I_{sd} + V_{sq}I_{sq} \\ Q_s = V_{sq}I_{sd} - V_{sd}I_{sq} \\ P_r = V_{rd}I_{rd} + V_{rq}I_{rq} \\ Q_r = V_{rq}I_{rd} - V_{rd}I_{rq} \end{cases} \quad \text{II.59}$$

La pulsation du courant rotatif est déterminée par La fréquence de tension statorique est déterminée par le réseau électrique.

$$\omega_r = \omega_s - P\Omega \quad \text{II.60}$$

En termes d'unités,  $\omega_s$  et  $\omega_r$  représentent respectivement les pulsations des tensions du stator et des rotors, mesurées en radians par seconde.

### II.7 Résultats de simulations

Dans cette section, nous étudions le fonctionnement stable d'un système éolien conçu pour générer le maximum de puissance en fonction de la vitesse du vent. Les résultats de simulation examinés portent sur un système éolien basé sur une MADA. La figure II.15 illustre comment le coefficient de puissance  $C_p$  et la vitesse spécifique varient en fonction du profil du vent, tandis que la figure II.16 présente la vitesse de rotation de la turbine, similaire au profil du vent. Le coefficient de puissance atteint 0,48, se rapprochant du maximum, comme indiqué par la figure II.17. En ce qui concerne la puissance active, elle suit le profil de vitesse du vent (Figure II.18), avec une puissance réactive supposée nulle. L'augmentation de la vitesse du vent entraîne également une augmentation des courants du stator et du rotor, comme illustré par les figures II.19 et II.20.

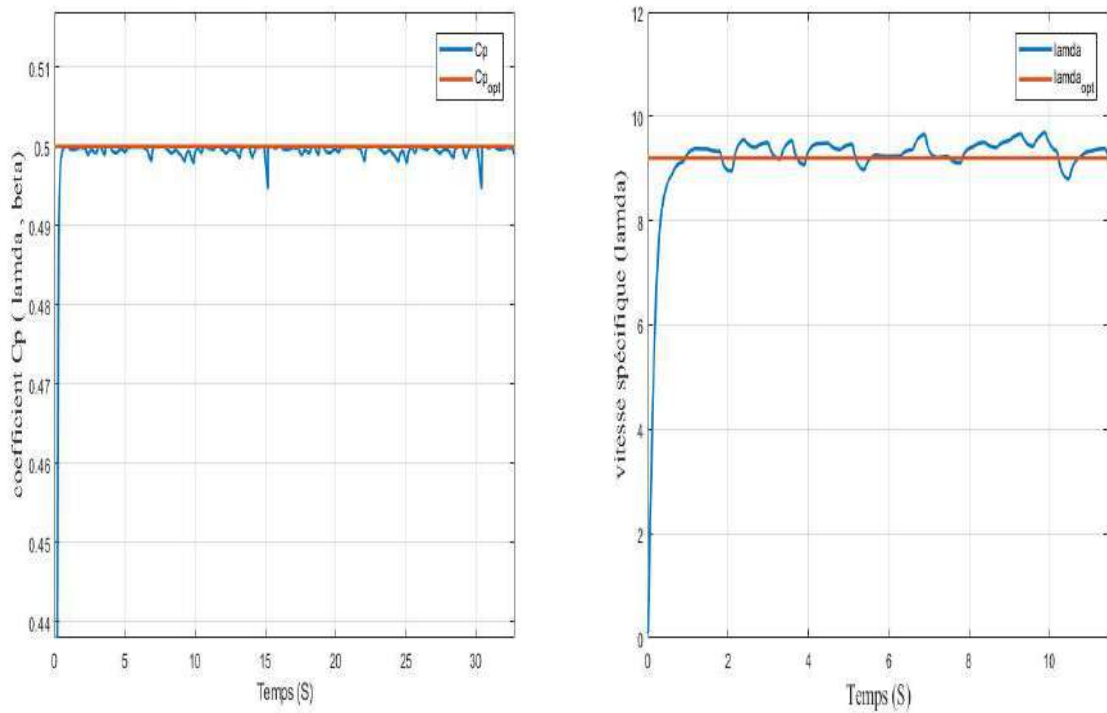


Figure II.15 : Variation du coe-cient de puissance  $C_p$  et vitesse spécifique  $\lambda$

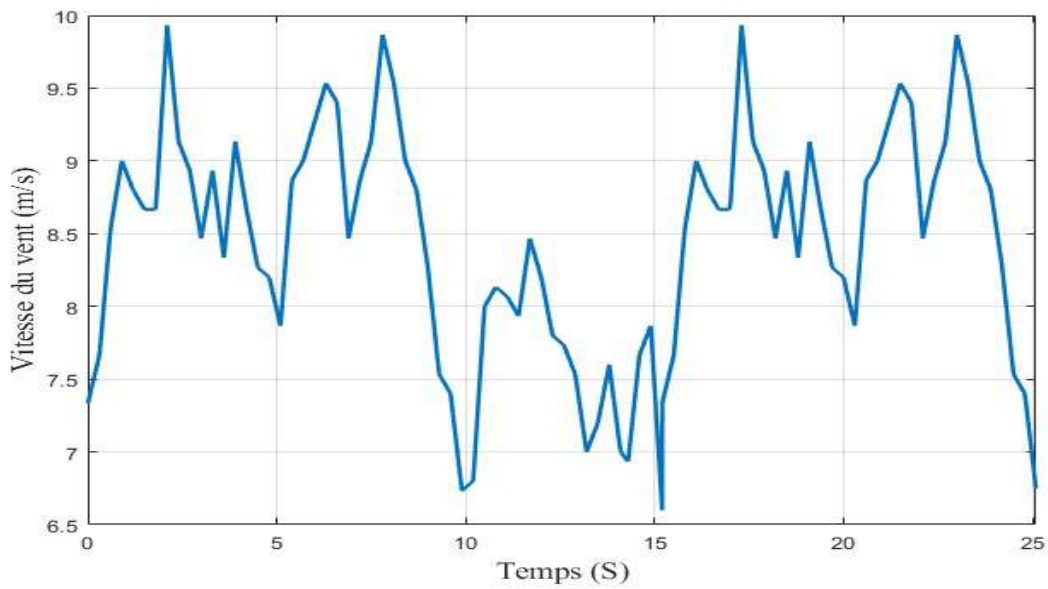


Figure II.16 : Profil du vent utilisé

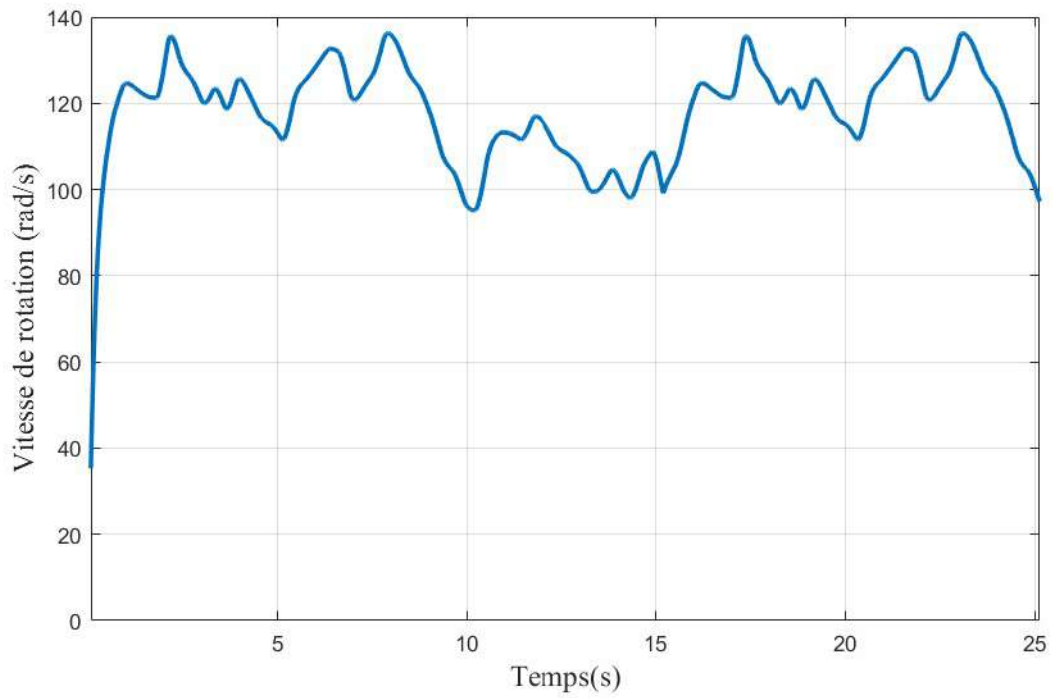


Figure II.17 : Vitesse de la turbine selon le MPPT

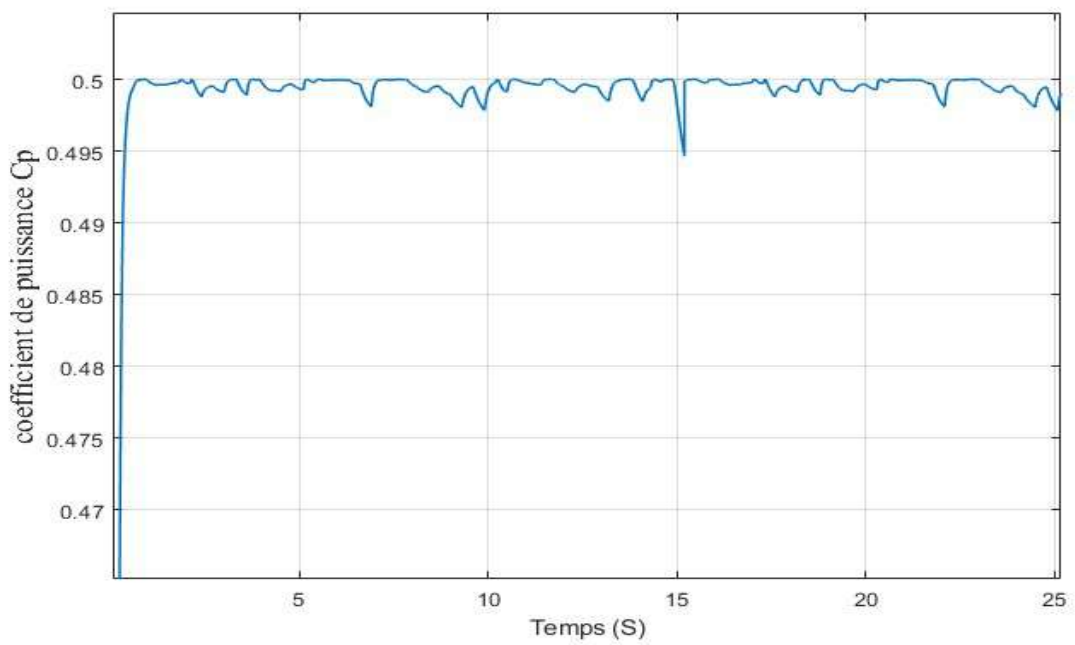
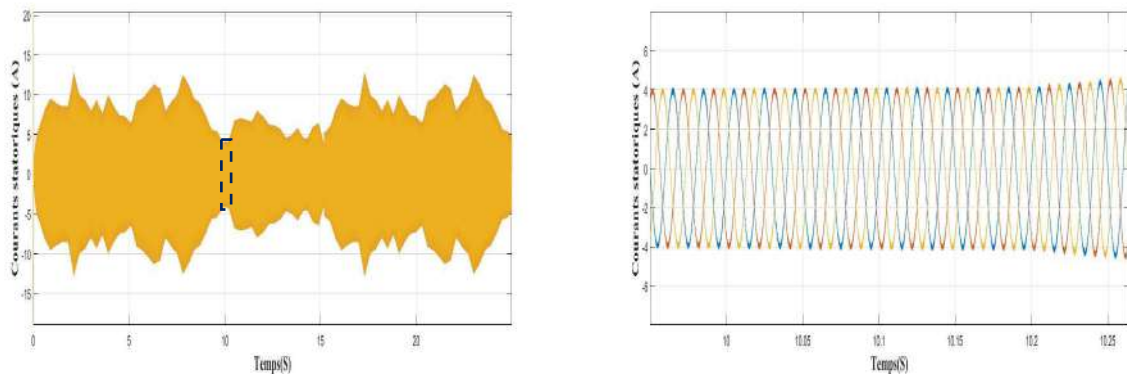
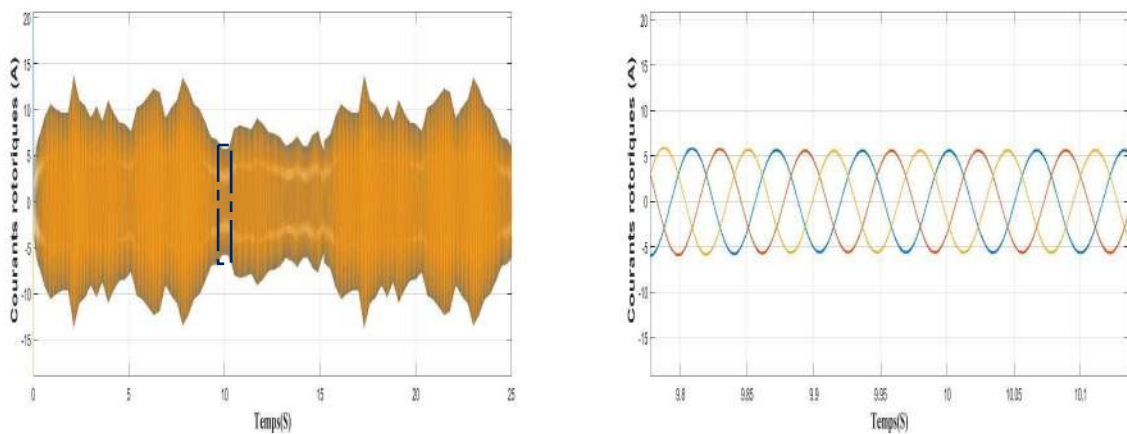


Figure II.18 : Variation du coe-cient de puissance Cp



**Figure II.19** : Courants statoriques avec un zoom



**Figure II.20** : Courants rotoriques avec un zoom

Les résultats de simulation révèlent que pendant le fonctionnement dynamique, les courants du stator adoptent des formes sinusoïdales avec une fréquence constante de 50 Hz pour les courants du stator du MADA, tandis que la fréquence des courants du rotor varie (figure II.19 et II.20).

### II.8 Conclusion :

Le chapitre impliquait la modélisation du canal de transmission dans son ensemble ainsi que de la vitesse du vent ; un modèle détaillé étape par étape de l'éolienne a également été inclus. Nous avons introduit une méthode spécifique de suivi du point de puissance maximale pour ce système d'éolienne proposé, après quoi nous avons approfondi le modèle de générateur GADA.

Cela a ensuite été complété par une discussion sur la transformation PARK et la commutation à deux niveaux via des simulations : tous les modèles ont été analysés collectivement à travers les formes d'onde à la d'on de cette étude exhaustive.

## **Chapitre III**

### **La commande vectorielle de la GADA**

### III.1. Introduction :

La commande vectorielle de la GADA, qui signifie Génération d'Actions de Déplacement Automatisées, représente une méthode visant à assurer une gestion minutieuse des mouvements d'un système électromécanique, généralement un moteur électrique. Cette approche s'appuie sur des techniques issues du traitement du signal et de la théorie de contrôle.

Dans cette démarche, la commande directe sans boucle de courant se distingue comme l'une des stratégies utilisées. Contrairement à l'approche classique qui implique la surveillance et le contrôle du courant circulant dans le système, cette méthode permet de réguler directement la tension ou le courant d'entrée du moteur pour obtenir le mouvement désiré, sans nécessiter de mesures explicites du courant.

La mise en œuvre de cette approche repose souvent sur l'utilisation de modèles mathématiques du moteur pour anticiper son comportement en réponse à des commandes de tension ou de courant spécifiques. De plus, des algorithmes de contrôle sophistiqués sont utilisés pour ajuster la commande en fonction des conditions réelles du système.

En somme, la commande vectorielle de la GADA, en particulier la méthode de commande directe sans boucle de courant, permet d'atteindre un contrôle précis et dynamique des moteurs électriques. Ceci s'avère crucial dans diverses applications industrielles telles que la robotique, les machines-outils et les systèmes de propulsion.

### III.2 Principe de la commande vectorielle de la MADA :

L'objectif principal de l'application du contrôle vectoriel dans les machines à courant alternatif est d'améliorer leurs performances constantes et dynamiques en utilisant une structure de contrôle similaire à celle des machines à courant continu.

Le processus de détermination du carré du courant est une question importante lorsqu'il s'agit d'une machine fonctionnant au courant continu, en particulier le courant de sortie et le courant de sortie. Dans notre scénario, la séparation s'effectue entre la puissance active et réactive du stator. L'approche du flux directionnel implique la sélection d'un système de coordonnées (d, q) où un axe s'aligne avec la direction de flux prévue, qu'il s'agisse du rotor, fixe ou aérien. Un axe représente le flux statorique tandis que l'autre représente le flux rotorique.

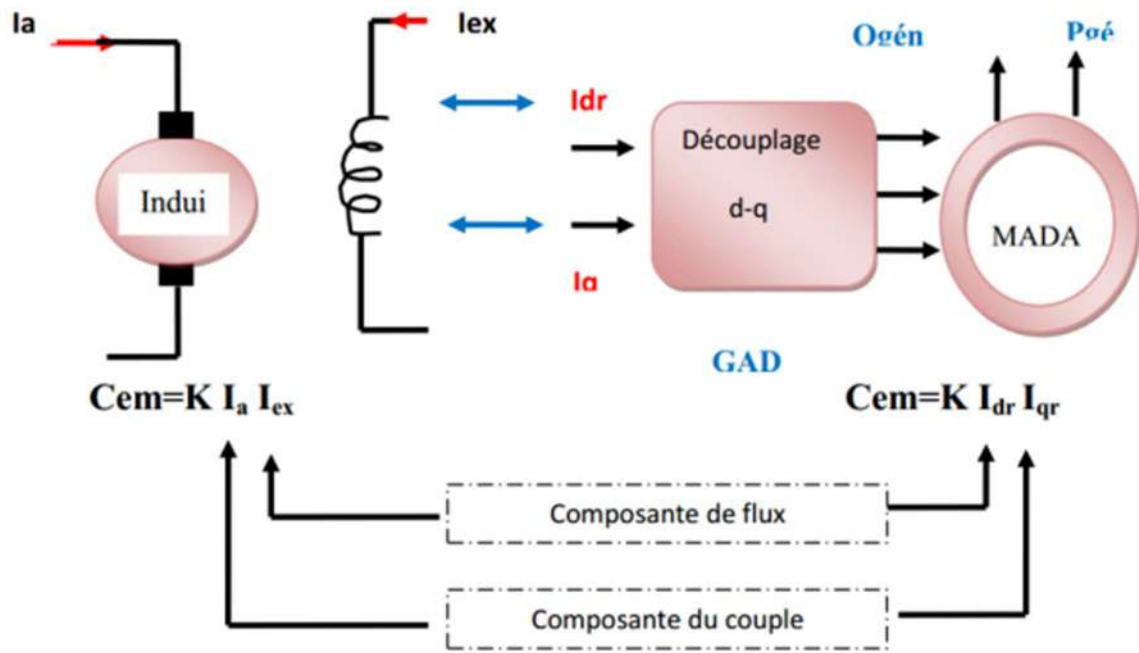


Figure III-1 : Principe de la commande vectorielle

### III.3. Modèle de la GADA avec orientation du flux statorique :

Pour les besoins de notre discussion, nous partirons de l'hypothèse l'axe d du système de coordonnées Park s'aligne avec la direction d'écoulement du stator. Ce choix n'est pas aléatoire, mais plutôt fondé sur la compréhension que la machine est généralement connectée à un réseau stable avec une tension et une fréquence constantes, ce qui entraîne un courant constant circulant à travers le stator. [66] En utilisant le système d'équations différentielles (II.56) et (II.57) , il devient possible d'établir une définition d'une machine à induction dans le cadre de référence associé au domaine du circuit, comme l'indique l'équation suivante :

$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - W_s \varphi_{sq} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + W_s \varphi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\varphi_{rd}}{dt} - W_r \varphi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\varphi_{rq}}{dt} + W_r \varphi_{rd} \end{cases} \quad \text{III.1}$$

#### III.3.1 Choix du référentiel du modèle diphasique

.garantir que les paramètres contrôlés maintiennent une flux statorique nul le long de l'axe q  
 Nous pouvons écrire :

$$\varphi_{ds} = \varphi_s, \varphi_{qs} = 0 \quad \text{III.2}$$

En simplifiant le système d'équations, nous pouvons améliorer le processus en utilisant les équations (III.1) et (III.2) comme base.



$$\begin{cases} V_{sd} = -R_s I_{sd} + \frac{d\phi_{sd}}{dt} \\ V_{sq} = -R_s I_{sq} + \omega_s \phi_{sd} \\ V_{rd} = R_r I_{rd} + \frac{d\phi_{rd}}{dt} - \omega_r \phi_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \frac{d\phi_{rq}}{dt} + \omega_r \phi_{rd} \end{cases} \quad III.3$$

Dans un référentiel triphasé (a, b, c), la relation globale illustre la tension de la phase n du stator

$$V_{ns} = R_s i_{ns} + \frac{d}{dt} \phi_{ns} \quad III.4$$

De plus, lorsque l'on fait abstraction de la résistance des enroulements statoriques, qui est une hypothèse plausible pour les éoliennes de forte puissance, les équations régissant les tensions statoriques de la machine se simplifient en [61].

$$V_{ns} = \frac{d}{dt} \phi_{ns} \quad III.5$$

La relation entre une référence connectée au flux statorique et la vitesse de rotation du vecteur tension statorique est clairement établie. La référence est positionnée en avant du vecteur de  $(\pi/2)$  radians. En maintenant un flux statorique constant, cette relation peut être exprimée de la manière suivante:

$$V_{ds} = 0, V_{qs} = V_s \quad III.6$$

La figure (II.2) illustre visuellement l'orientation de la tension et du flux statorique, démontrant le principe en question.

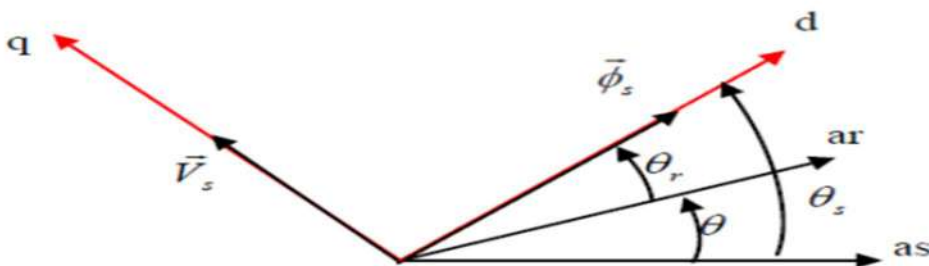


Figure. III.2 : Orientation de l'axe d du flux statorique. [67]

Le maintien d'un flux  $\phi_{ns}$  statorique constant, assuré par un réseau stable lié au stator, est essentiel pour déterminer le couple électromagnétique produit par la machine, ce qui entraîne la production de puissance active. Cette dépendance repose uniquement sur le courant du rotor

sur l'axe q. Par conséquent, l'expression du couple électromagnétique peut être formulée comme suit.

$$C_e = np \cdot \frac{M}{L_s} \cdot \phi_{ds} i_{qr} \quad III.7$$

En mettant en œuvre les simplifications décrites précédemment, il devient possible de rationaliser les équations de tension et de flux statoriques de la manière suivante.

$$\begin{cases} V_{sd} = 0 \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \phi_{sd} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad III.8$$

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_{sd} = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ V_{sq} = V_s = \omega_s \phi_{sd} = \omega_s \phi_s \end{cases} \quad III.9$$

En utilisant les équations (II.9), nous sommes en mesure d'établir un ensemble d'équations qui relient les courants du stator aux courants du rotor.

$$\begin{cases} I_{sd} = -\frac{M}{L_s} I_{rd} + \frac{\phi_s}{L_s} \\ I_{sq} = -\frac{M}{L_s} I_{rq} \end{cases} \quad III.10$$

Les puissances active et réactive d'une machine asynchrone dans un référentiel diphasé peuvent s'exprimer comme suit :

$$\begin{cases} P_s = V_{sd} \cdot I_{sd} + V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sq} - V_{sd} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad III.11$$

En appliquant le système d'axes choisi et en incorporant les hypothèses simplificatrices faites dans notre cas spécifique ( $V_{sd}=0$ ), les équations sont adaptées avec succès, ce qui donne le résultat suivant :

$$\begin{cases} P_s = V_{sq} \cdot I_{sq} \\ Q_s = V_{sq} \cdot I_{sq} \end{cases} \quad III.12$$

Lors de la substitution des courants statoriques par leurs valeurs correspondantes de l'équation (II.10) dans l'équation (II.11), nous dérivons les équations suivantes qui représentent les puissances active et réactive.

$$\begin{cases} p_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{\phi_s}{L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad III.13$$

L'expression de la puissance réactive peut être obtenue en utilisant  $\phi_s = V_s/\omega_s$  l'équation (II.13) et en extrayant les termes pertinents.

$$\begin{cases} p_s = -V_s \frac{M}{L_s} I_{rq} \\ Q_s = \frac{V_s^2}{\omega_s L_s} - V_s \frac{M}{L_s} I_{rd} \end{cases} \quad III.14$$

D'après l'équation suivante :

$$\begin{cases} \phi_{sd} = \phi_s = L_s I_{sd} + M I_{rd} \\ \phi_{sq} = 0 = L_s I_{sq} + M I_{rq} \\ \phi_{rd} = L_r I_{rd} + M I_{sd} \\ \phi_{rq} = L_r I_{rq} + M I_{sq} \end{cases} \quad III.15$$

En substituant les expressions des courants statoriques, nous obtenons :

$$\begin{cases} \varphi_{rd} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + \frac{M \cdot V_s}{\omega_s L_s} \\ \varphi_{rq} = \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \end{cases} \quad III.16$$

les expressions des tensions deviennent :

$$\begin{cases} V_{rd} = R_r I_{rd} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rd}}{dt} - g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rq} \\ V_{rq} = R_r I_{rq} + \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{rq}}{dt} + g \omega_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{rd} + g \frac{M V_s}{L_s} \end{cases} \quad III.17$$

Les équations (III.14) et (III.17) présentées dans la figure III.3 nous orientent vers le modèle de contrôle de puissance.

Lorsqu'il s'agit de glissements faibles, il devient justifiable d'éliminer ce terme de couplage, action qui aboutit à un découplage complet entre les deux axes. Néanmoins, il existe des applications spécifiques où le glissement ne peut être négligé en raison du mode d'appel magnétisant ; de tels cas impliquent que le glissement n'est pas négligeable car la variation de la vitesse de rotation peut avoir une importance.

Pour cette raison, il devient impératif de factoriser certains termes de compensation afin d'affirmer un contrôle individuel sur chaque axe sans se soucier de l'axe réciproque.

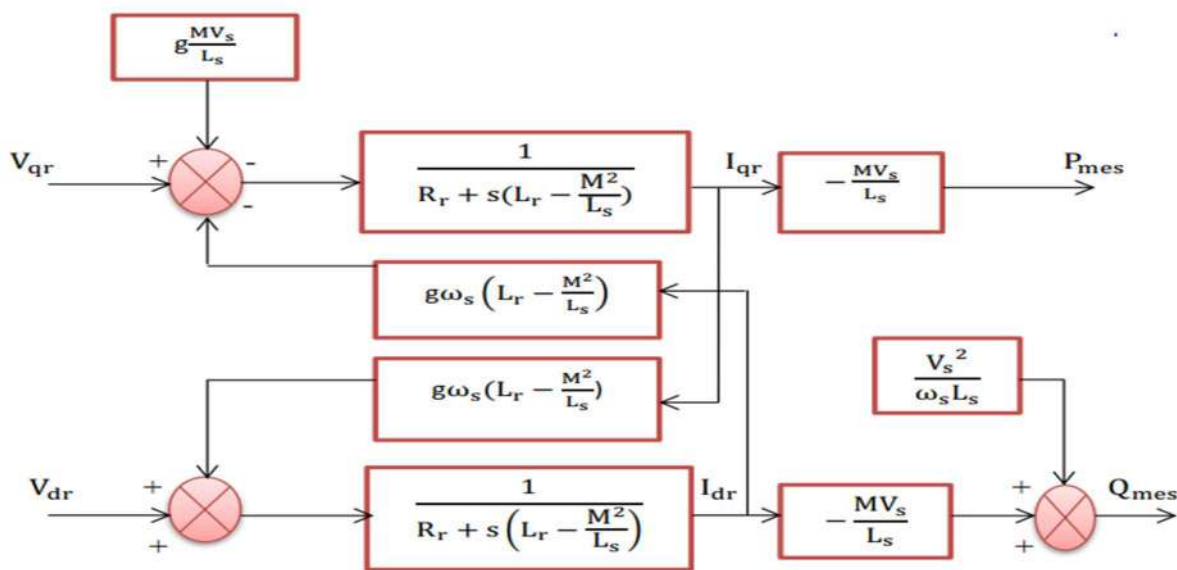


Figure III.3 : Schéma fonctionnel du modèle GADA simplifié.

Cette figure illustre les fonctions de transfert de premier ordre pour les deux axes : connecter les tensions du rotor aux puissances active et réactive du stator. Cela suggère que la mise en œuvre du contrôle vectoriel est réalisable puisque chaque axe (à l'exception des couplages) peut être régulé de manière autonome. Les grandeurs de référence pour ces régulateurs sont : la puissance active pour l'axe q du rotor et la puissance active pour l'axe d du rotor.

Pour optimiser la qualité de l'énergie réinjectée dans le réseau, le côté stator maintiendra un facteur de puissance unitaire en réglant la consigne de puissance réactive à zéro. De plus, la consigne de La puissance active doit être réglée. pour garantir que l'éolienne fonctionne à un coefficient de puissance optimal.

### III.4. Différents types de commande vectorielle:

L'intégration du contrôle vectoriel dans la Génératrice asynchrone à double alimenté pour les applications éoliennes exige une excellente performance dynamique afin de réguler le couple et la vitesse. Pour atteindre ce niveau de performance, il est essentiel d'avoir une connaissance précise du vecteur de flux statorique en termes d'amplitude et de phase.

Deux approches ont été développées pour répondre à cette exigence : la commande vectorielle directe et la commande vectorielle indirecte [26].

Dans notre étude, nous choisirons d'adopter la commande vectorielle directe.

### III.4.1. La Commande vectorielle directe

Dans le domaine de la gestion de la puissance statorique de la GADA, cette méthode, suggérée par BLASCHKE, nécessite une compréhension du module de flux et de sa phase afin de permettre une distinction entre le couple et le flux, peu importe le régime transitoire [63]. En effet, la rétroaction est responsable de la régulation du flux, ce qui nécessite une mesure ou une estimation en se basant sur les signaux de tensions et de courants du stator [64]. On peut utiliser des capteurs comme des sondes à effet Hall ou des spires de mesure pour mesurer l'amplitude et la phase du flux, et les placer sous les dents du stator (entrefer de la génératrice). Cette stratégie présente l'avantage de ne pas être influencée par les variations paramétriques [3, 36]

Cependant, les capteurs présentent des limitations, étant mécaniquement fragiles et incapables de fonctionner. Dans notre étude, nous utiliserons La Commande directe sans boucle de courant. [11].

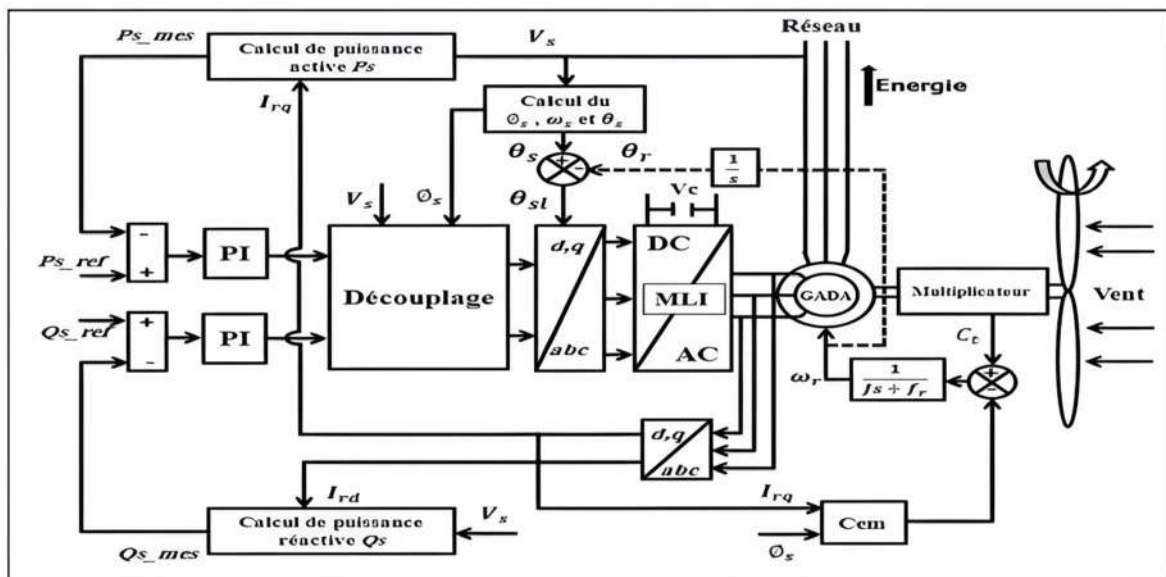


Figure III.4 : Schéma synoptique du la commande vectoriel direct de la GADA. [63]

#### III.4.1. 1. La Commande directe sans boucle de courant

Nous examinons ici la capacité de gérer indépendamment les puissances actives et réactives pour le générateur, sur la base de ce que nous avons observé précédemment. Nous établissons une connexion entre la puissance active et la tension  $V_{rq}$  ainsi qu'entre la puissance réactive et la tension  $V_{rd}$

(Figure 5). Après avoir examiné de près le schéma fonctionnel du système de contrôle illustré à la figure 06, nous pouvons identifier les éléments essentiels nécessaires à la mise en œuvre du contrôle. Dans l'expression qui relie les courants du rotor aux puissances du stator, un terme frappant est  $(M \cdot V_s / L_s)$  que nous supposons constant en raison de notre analyse considérant que l'éolienne est liée à un réseau stable de haute puissance - donc aucun contrôleur n'est interposé entre courants et puissances du rotor.

Pour faciliter le contrôle de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA), nous supposons que la tension du réseau est stable, permettant ainsi l'utilisation d'une seule boucle de contrôle pour chaque puissance avec un contrôleur indépendant (la Figure 5).

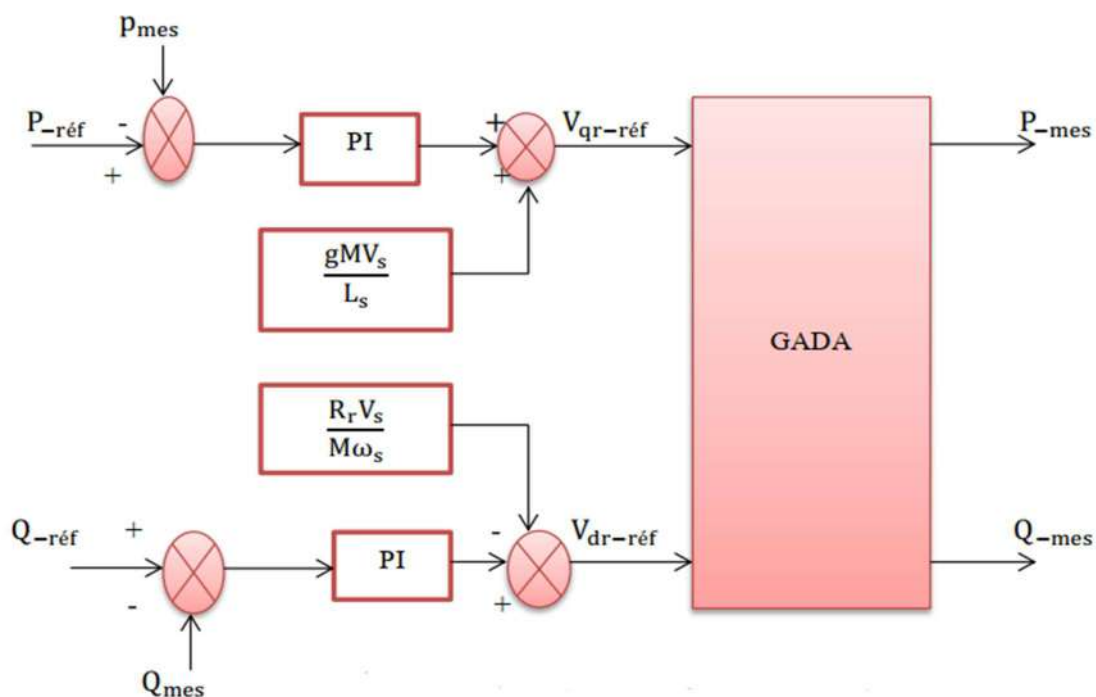


Figure. III.5: Schéma Commande en puissance sans boucle de courant

### III.5. Conception du régulateur PI

Un régulateur PI est nécessaire pour que les puissances actives et réactives du GADA répondent à leurs spécifications. L'objectif principal du régulateur PI est d'augmenter la robustesse face à toute perturbation, qu'elle soit interne ou externe [13]. Le schéma bloc de la figure III 6 représente les boucles de régulation de puissance active  $P_s$  et de puissance réactive  $Q_s$ . N'oubliez pas que l'objectif principal de ces diagrammes est de faciliter la

représentation, alors n'hésitez pas à utiliser des marqueurs et des indicateurs appropriés.

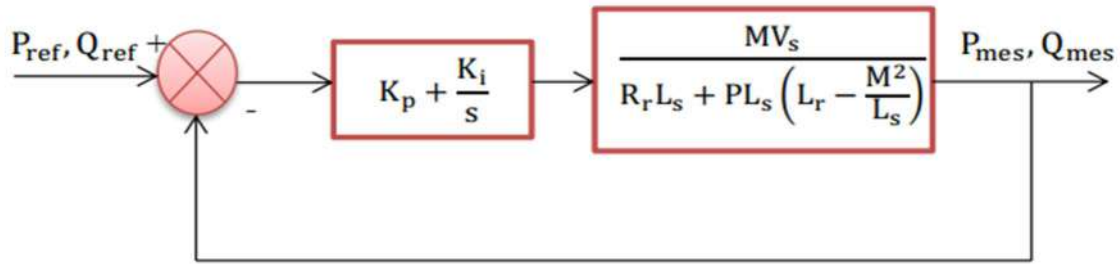


Figure. III 6 : Le schéma System régulé par un PI

Il est à noter que les régulateurs proportionnels-intégraux (PI) sont configurés avec des gains égaux pour l'axe d et l'axe q.

Examinons la fonction de transfert d'un régulateur PI

$$PI(p) = K_p + \frac{K_i}{p} \quad \text{III.18}$$

La fonction de transfert en boucle ouverte (FTBO) qui correspond à la figure III.6 peut être représentée de la manière suivante :

$$FTBO = \frac{p + \frac{k_i}{k_p}}{\frac{p}{k_p}} \cdot \frac{\frac{MV_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p + \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}} \quad \text{III.19}$$

En respectant la condition de compensation des pôles, on obtient une nouvelle expression pour le rapport des gains intégral et proportionnel, donnée par :

$$\frac{k_i}{k_p} = \frac{L_s R_r}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)} \quad \text{III.20}$$

Le FTBO a été formellement défini et enregistré comme suit :

$$FTBO = \frac{k_p \frac{MV_s}{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}}{p} \quad \text{III.21}$$

Ce qui nous fournit la fonction de transfert en boucle fermée :

$$FTBF = \frac{1}{1 + p\tau_r} \quad \text{avec} \quad \tau_r = \frac{1}{k_p} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s} \quad \text{III.22}$$

Pour un temps de réponse de 4% ( $\tau$ ) réglé à 1 milliseconde, nous obtenons :

$$K_p = \frac{1}{\tau_r} \frac{L_s \left( L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)}{MV_s}; K_i = \frac{1}{\tau_r} \frac{R_r L_s}{MV_s} \quad \text{III.23}$$

### III.6 Résultats de simulations

Nous avons choisi le contrôle direct et le contrôle vectoriel dans notre tâche de gestion du système de conversion d'énergie éolienne à l'aide de GADA. Nous avons testé divers algorithmes pour contrôler d'autres composants de ce système via des simulations logicielles Matlab/Simulink. Les résultats présentés dans la section suivante valident les commandes détaillées dans ce chapitre : elles sont dérivées sur la base de lois de contrôle actif et réactif, qui sont appliquées lors de la simulation

#### III.6.1 Résultats de Simulation de la Commande Directe

Nous pouvons clairement voir sur les chiffres que le générateur est capable de suivre les niveaux de puissance active et réactive du stator sans aucun dépassement. De plus, il existe un bon découplage entre les deux axes de commande (d et q) avec des oscillations minimales lors des changements de pas, comme le montrent les figures III.7 et III.8. La nature sinusoïdale des courants représentés sur les figures III.9 et III.10 — au niveau du stator et du rotor — implique une énergie propre sans qu'aucune harmonique ne soit fournie ou absorbée par GADA.

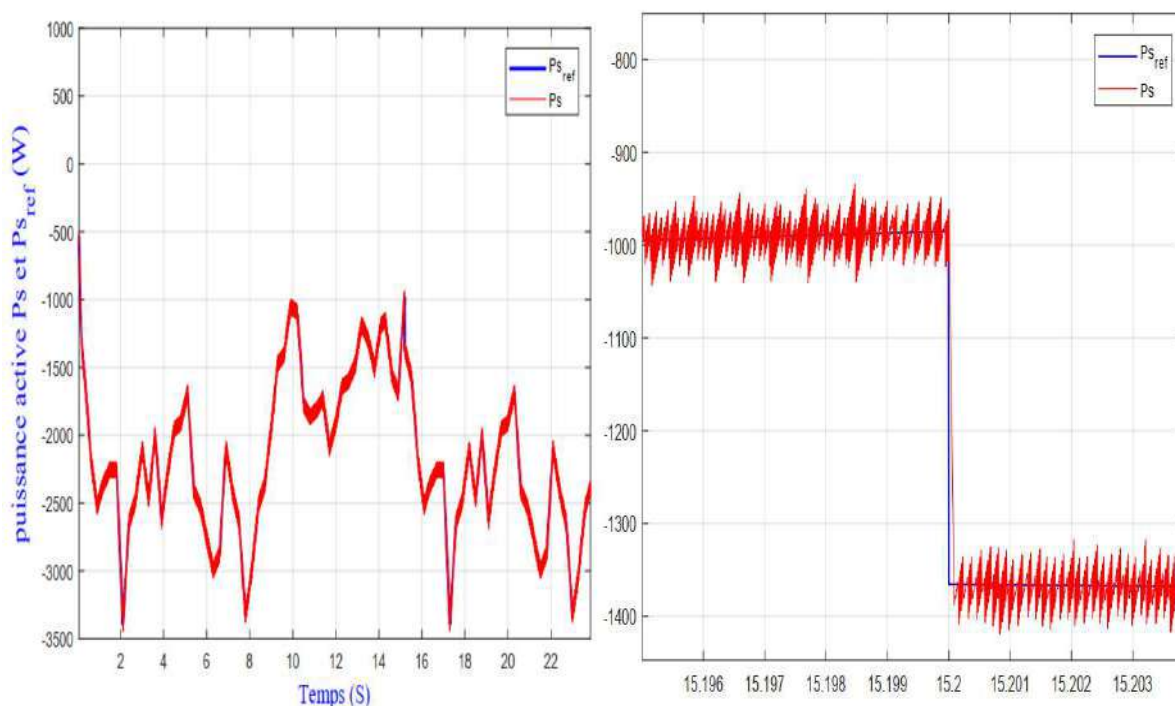


Figure III.7 : Puissance active statorique zoom la commande directe avec zoom



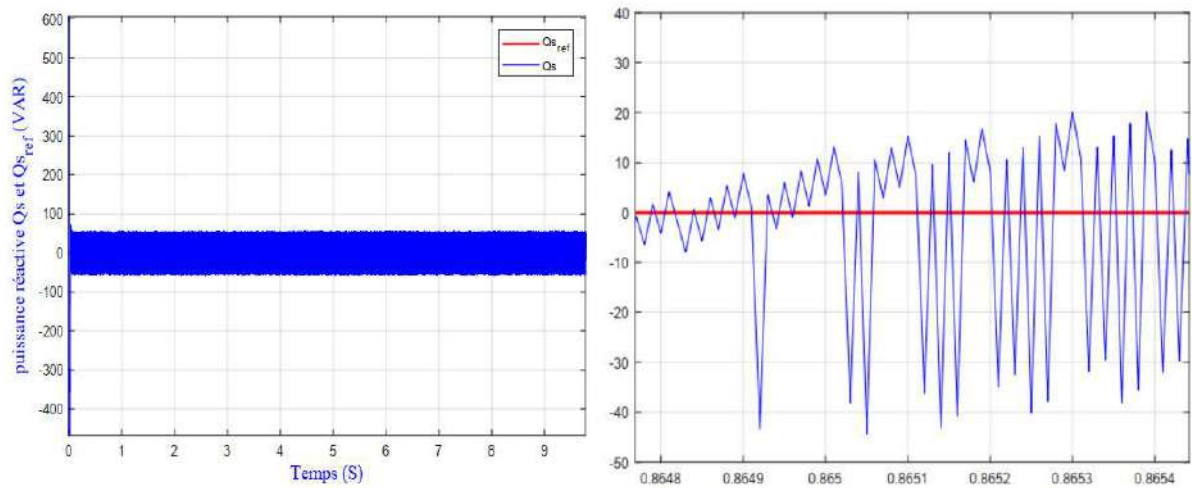


Figure III.8 : Puissance réactive statorique avec zoom la commande directe avec zoom

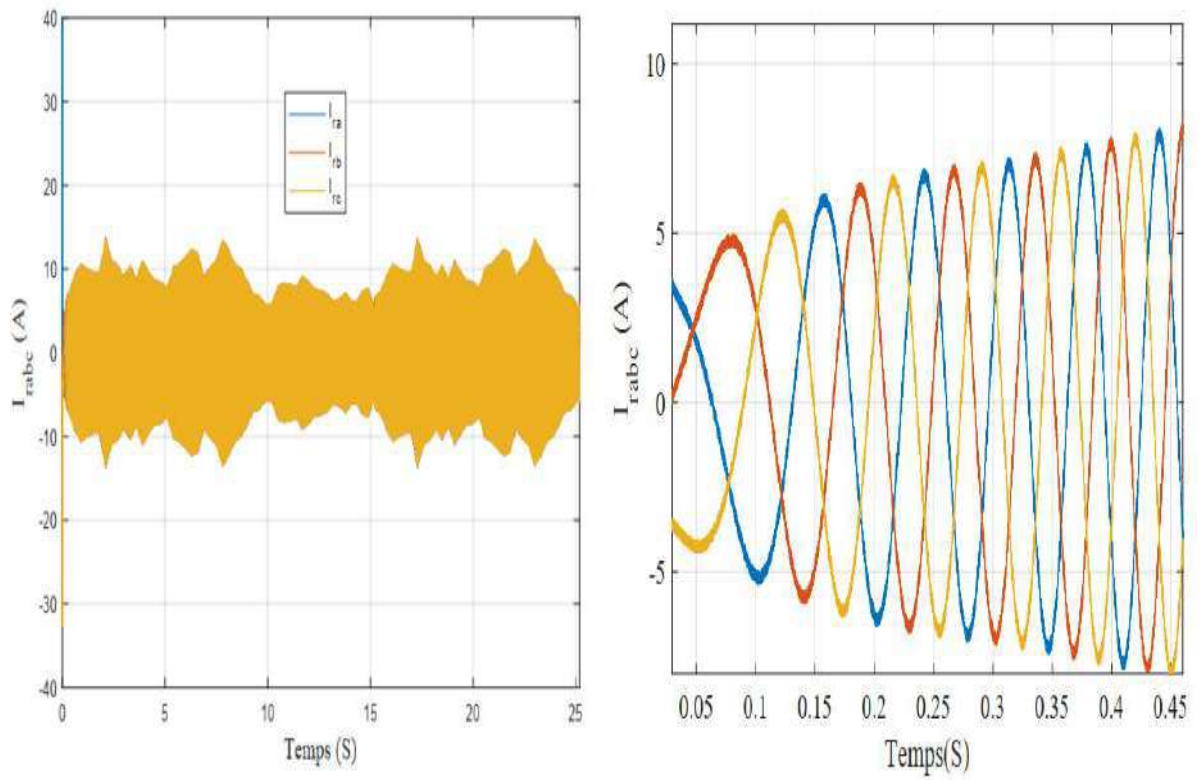
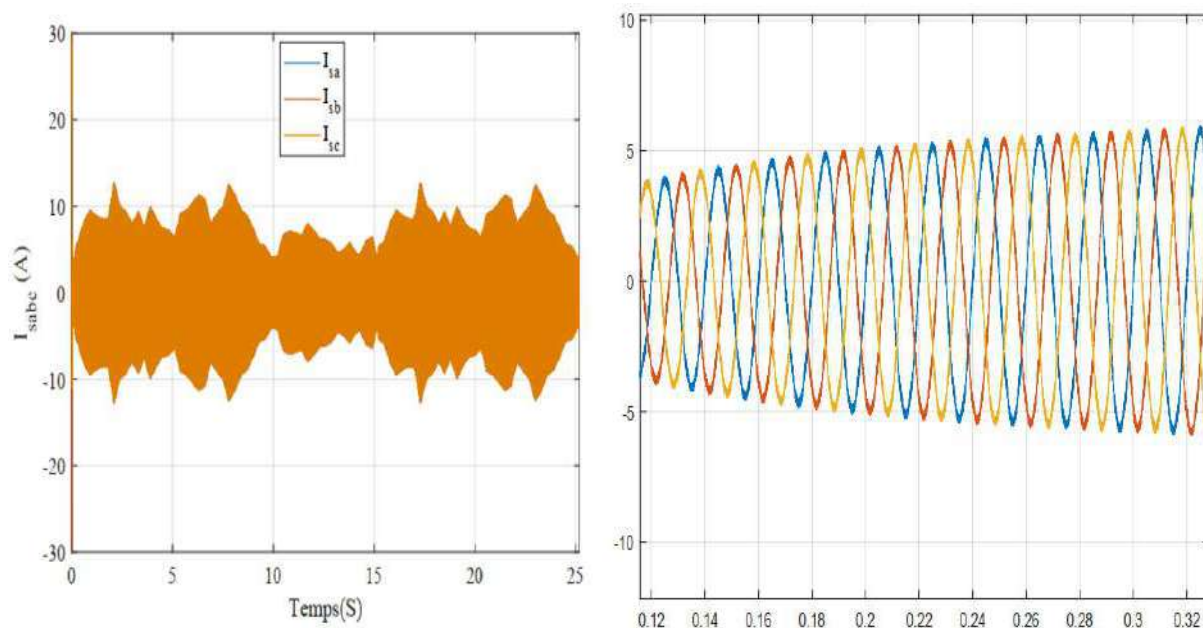


Figure III.9: Courants rotoriques de la commande directe avec zoom



**Figure III.10** : Courants statoriques avec zoom de la commande directe avec zoom

### III.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons examiné la commande vectorielle de la génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) dans le contexte des systèmes de production éolienne.

Pour réguler la GADA, nous avons adopté une approche de commande vectorielle directe sans boucle de courant, basée sur un système d'orientation du flux statorique. Cette méthode réduit les équations du modèle de la machine à deux équations, simplifiant ainsi le contrôle de la machine à double alimentation.

Nos simulations numériques ont confirmé que l'orientation du flux statorique permet effectivement de découpler les puissances, de sorte que la composante directe du courant rotorique régit la puissance réactive tandis que la composante en quadrature contrôle la puissance active. Cette approche offre des performances dynamiques élevées comparables à celles obtenues avec la commande à modulation de largeur d'impulsion (MLI).

## **Chapitre IV**

Commande de par mode glissant du  
GADA

## **IV.1 Introduction**

Lorsque l'on élabore un problème de contrôle, il est fréquent de rencontrer des écarts entre le système réel et le modèle mathématique élaboré pour concevoir le contrôle. Ces divergences peuvent être causées par des modifications dans la dynamique du système ou par la simplification du comportement complexe du système dans le modèle. Par conséquent, une attention particulière a été portée au développement de méthodes de contrôle robustes pour résoudre ce défi.

Dans le domaine des systèmes linéaires à paramètres constants, les lois de contrôle de type PI sont efficaces. Cependant, pour les systèmes non linéaires ou ceux avec des paramètres discontinus, ces lois de contrôle traditionnelles peuvent se révéler insuffisantes, comme expliqué dans le chapitre précédent. Ceci est particulièrement vrai lorsqu'il s'agit de répondre à des exigences précises et dynamiques. Dans de telles situations, il devient impératif d'utiliser des lois de contrôle qui puissent tolérer les divergences, les perturbations et incertains.

Pour résoudre efficacement le défi des différences essentielles et pour obtenir un système de contrôle stable, rapide et fiable, l'application de techniques de contrôle est nécessaire. L'une de ces méthodes, appelée contrôle par mode glissant, est reconnue pour sa simplicité et sa flexibilité. Cette approche, d'origine soviétique, a été initialement développée pour relever les défis dans diverses applications.

Ce chapitre se concentre sur une analyse théorique du contrôle de structures changeantes et sur son application dans la régulation de l'énergie active et réactive générée par la GADA. De plus, nous évaluerons l'efficacité de cette technique de contrôle par rapport à celles discutées dans le chapitre précédent.

## **IV.2. Introduction aux systèmes de réglage à structure variable**

### **IV.2.1. Historique**

Une attention considérable a été accordée au contrôle de systèmes non linéaires à dynamique incertaine, souvent en proie à des perturbations et à des changements de paramètres. La théorie des systèmes présentant des contrôleurs de variables structurelles ainsi que leurs modes de glissement associés a fait l'objet d'études approfondies qui ont valu des décennies [65].

La littérature soviétique (Emelyanove 1967, Utikin 1974) a introduit des contrôleurs de variables structurelles, et ils sont largement perçus comme une solution possible à ce problème (Gao et Hung 1993). De Carlo. (1998) et Suspendu.

(1993) s'est penché sur le contrôle de structure variable où l'action de contrôle oblige la trajectoire du système à intercepter des marqueurs d'espace d'état spécifiques en tant que surfaces glissantes à des vitesses de commutation lentes. Les traces de surface émergeant des éléments du système fournissent des contrôles qui aident au maintien de la surface en tous les points traversés par les trajectoires, formant ainsi un mode glissant..

En fin de compte, un mérite important du contrôle variable de la structure lorsqu'il fonctionne en mode glissant se démarque : sa résilience à tout changement de paramètre ou perturbation externe qui pourrait survenir pendant le fonctionnement du système à des vitesses élevées où ces surfaces seraient générées dynamiquement sur la base des informations disponibles sur le comportement du système.

### **IV.2.2. Objectifs du contrôle par mode glissant**

Les cibles de contrôle du mode coulissant peuvent être intensifiées en deux objectifs principaux :

- ❖ Créez la surface  $S(x, t)$  afin que toutes les pistes du système suivent le comportement de suivi, l'organisation et la stabilité requise.
- ❖ Mettez une loi de contrôle (commutateur)  $U(x, t)$  capable d'attirer tous les cas à la surface de glissement et de les maintenir sur cette surface.

### **IV.2.3. Principe :**

Un système à structure variable (VSS) est un système dont la configuration évolue pendant son fonctionnement. Il se distingue par la sélection d'une structure et d'une logique de commutation spécifiques. Cette sélection autorise le système à basculer d'une structure à une autre à tout moment. De plus, un tel système peut acquérir de nouvelles propriétés qui ne sont pas présentes dans chaque structure individuelle.

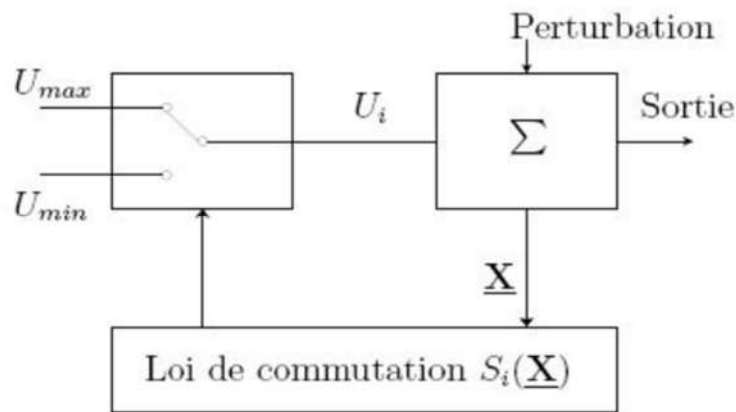
### **IV.3. Généralités sur la théorie du contrôle par mode de glissement**

La commande par mode de glissement propose trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes :

- La première configuration, la plus élémentaire, consiste en une commutation directe au niveau de l'organe de commande, désignée comme une structure de commutation au niveau de l'organe de commande.
- Une autre configuration implique la commutation au niveau d'une rétroaction d'état.
- Enfin, une structure de "contrôle équivalent" peut être ajoutée au niveau de l'unité de contrôle [53].

**IV.3.1. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande**

Le schéma de structure du commutateur au niveau des composants de commande est représenté sur la figure (IV.1). Cette structure de contrôle particulière est largement reconnue et fréquemment utilisée, car elle s'aligne sur la fonctionnalité marche-arrêt de l'interrupteur d'alimentation. La majorité des applications impliquent des fluctuations de vitesse, ce qui rend cette structure de contrôle idéale pour le contrôle des moteurs pas à pas [68].



**Figure. IV.1** :Structure de régulation par commutation au niveau del'organe de commande

**IV.3.2 Structure par Commutation au Niveau d'une Contre Réaction d'Etat :**

La structure en changeant au niveau d'un retour d'état découle de la nature classique du contrôle par retour d'état d'un état, la nature de l'ajustement passe par les gains d'ajustement. La non-linéarité dérive de la transition entre les gains, que l'on crée ensuite une transition dans la dynamique du système [54]. Cette conception est moins complexe à la demande du contrôle. Il est utilisé dans la régulation du courant continu et des aimants permanents qui sont à la fois des machines permanentes et à induction. On peut examiner le diagramme du graphite sur la figure (IV.2)

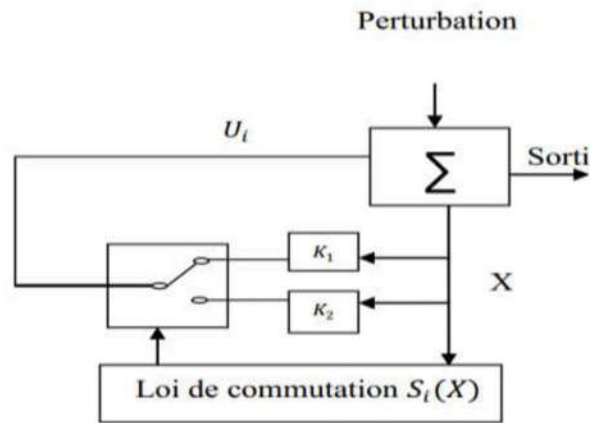


Figure. IV. 2 : Structure de régulation par commutation au niveau d'une Contreréaction d'état

### IV.3.3. Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la commande équivalente

L'introduction de cette commande supplémentaire confère à cette structure un avantage significatif. Elle simplifie le repositionnement de l'état futur du système grâce à une commande équivalente qui correspond simplement à la valeur souhaitée du système à un moment donné. Cela allège la charge sur le contrôleur, mais repose davantage sur des variations paramétriques en raison de l'expression de la commande équivalente [41].

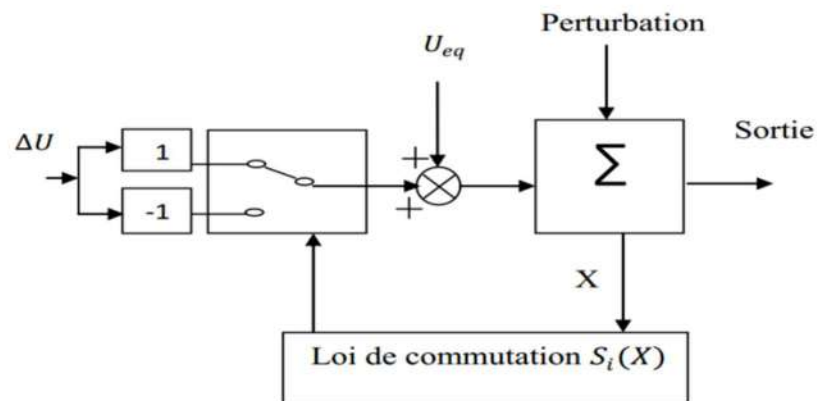


Figure IV.3 : Schéma de régulation avec commutation au niveau de l'organe de commande et intégration de la commande équivalente

$U$  : loi vectorielle de commande.

$U_{eq}$  : vecteur de signe égal.

$\Delta U$  : constante du vecteur de contrôle.

$X$  : vecteur de variables.

Si : modification de surface vectorielle.

#### **IV.4. Principe de la commande à mode glissant**

Ce type de contrôle, appelé contrôle par mode glissant, est à la fois efficace et polyvalent, adapté aux systèmes linéaires et non linéaires.

L'objectif principal du contrôle par mode glissant est de créer une surface qui permet au système de passer à un nouvel état, tout en respectant les lois d'existence, de convergence et de stabilité. Cette surface de commutation est accessible par le biais du chemin d'état via des ajustements appropriés de la structure contrôlée du système.

L'objectif du contrôle par mode glissant est de guider l'état du système le long de la surface de glissement définie (S), puis de le faire glisser autour de celle-ci. Une fois que la surface de glissement est traversée, la dynamique du système n'est pas perturbée par les variations des paramètres du processus ou les perturbations externes [56],[57].

#### **IV.5. Conception de la commande par mode de glissement**

La procédure de conception du régulateur par modes glissants est structurée de telle manière qu'elle traite systématiquement les spécifications de stabilité et de performance. Elle comporte trois étapes principales, mais complémentaires.

1. Le choix de la surface de glissement est crucial.
2. La mise en place de conditions garantissant l'existence et la convergence du mode glissant est essentielle.
3. Trouver la bonne loi de contrôle est essentiel.

##### **IV.5. 1.Choix de la surface de glissement :**

La sélection de la surface de glissement dépend non seulement du nombre nécessaire de ces surfaces, mais également de leurs formes en fonction de l'application et du but recherché. L'approche la plus prudente et la plus simple consiste à choisir une surface qui bascule dans la direction du vecteur d'erreur. Pensez au système complexe avec les équations suivantes .

$$\dot{X} = \frac{dX}{dt} = A \cdot X + B \cdot U \quad \text{IV.1}$$

Où,

X(t) : est le vecteur d'état.

U(t): est le vecteur de commande.



Dans la plupart des cas, le nombre de surfaces de glissement est choisi égal à la dimension du vecteur de contrôle. La surface de glissement — qui est une fonction scalaire — agit comme un chemin pour la variable régulée dans le plan de phase qu'elle suit vers l'origine. De nombreuses formes différentes de surfaces de glissement ont été présentées dans divers textes ; chacun offre un meilleur contrôle en fonction de l'application. La surface utilisée le plus souvent pour atteindre le régime de glissement et garantir la convergence de l'état vers le point de référence peut être définie comme :

$$s(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda\right)^{r-1} (x_{ref} - x) \tag{IV.2}$$

Où,

$r$  : est le degré relatif au nombre qui doit être dérivé de la sortie pour faire apparaître la commande

$\lambda$  : est une constante positive.

**IV.5.2 Conditions de convergence**

La surface de glissement, établie par les conditions d'existence et de convergence, agit comme un point de rencontre pour la dynamique du système. Il doit se rassembler sur cette surface commune et rester insensible aux perturbations, quelles qu'elles soient. Le mode de convergence dépend de deux facteurs qui assurent une telle convergence. En fait, ce sont ces deux facteurs qui dictent la forme que prendra ce mode ; s'il serait capable de converger ou pas du tout. [40].

**IV.5.2.1. La fonction discrète de commutation**

Emilyanov et Outkine ont proposé et examiné la méthode la plus ancienne, connue sous le nom d'approche directe. Bien qu'il offre une solution complète, il ne garantit pas un temps d'accès limité. Cette approche peut être décrite comme suit [41] .

$$s(x). \dot{s}(x) < 0 \tag{IV.3}$$

**IV.5.2.2 La fonction de Lyapunov**

La méthode Lyapunov est une condition globale pour atteindre le mode glissant. Elle consiste à sélectionner une fonction scalaire positive appelée fonction de Lyapunov, typiquement

notée en standard :

$$V(x) = \frac{1}{2} s^2(x) \tag{IV.4}$$

Il s'agit de choisir la fonction de manière à garantir que la variable contrôlée soit attirée vers sa valeur de référence ; une commande  $U$  est alors conçue telle que le carré de la surface corresponde à une fonction de Lyapunov. La dérivée de la fonction  $(x)$  donne

$$V(x) = s(x). \dot{s}(x) \tag{IV.5}$$

Pour que la fonction candidate de Lyapunov puisse décroître et converger vers zéro (pour garantir l'existence du mode de glissement), il suffit d'assurer que :

$$s(x). \dot{s}(x) < 0 \tag{IV.6}$$

Cette équation particulière illustre une situation dans laquelle le carré de la distance à la surface basée sur  $s(x)$  diminue continuellement. Cela oblige le système à se déplacer vers les deux côtés de la surface de manière continue ( Figure VI.5) ; on suppose que cette condition est sous un régime de glissement idéal.

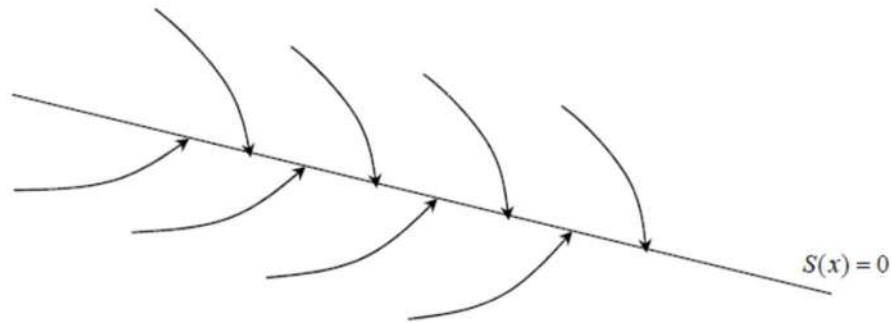


Figure. IV. 4 : Trajectoire de l'état vis-à-vis la surface de glissement.

**IV.5.3 Détermination de la loi de commande**

Lorsque la surface de glissement est choisie avec le critère de convergence, elle reste à  $\dot{S}$  puis se déplace vers son point d'équilibre tout en respectant la condition d'existence des modes de glissement. La conception d'un contrôleur à mode glissant comprend deux éléments : l'un lié à la linéarisation exacte ( $u_{eq}$ ) et l'autre la stabilité ( $u_N$ ) . Le premier est crucial dans le contrôle du mode glissant car il contribue à annuler l'impact des inexactitudes du modèle et des perturbations externes [42]. améliorant ainsi la stabilité. Selon la loi de contrôle du mode glissant,  $u_N$  peut être déterminé comme. :

$$u(t) = u_{eq}(t) + u_N \tag{IV.7}$$

**IV.5.3.1 La commande équivalente**

Filipov et Utkin ont suggéré la commande équivalente  $u_{eq}(t)$ . considérée comme la plus simple et la plus directe. Il est calculé en notant que le comportement du système en mode glissant peut être décrit comme :  $\dot{s}(x) = 0$ .

La composante équivalente peut être interprétée comme la valeur moyenne modulée Nous avons :

$$\dot{S}(x) = \frac{dS}{dt} = \frac{\partial S}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial S}{\partial x} \{f(x, t) + g(x, t)u_{eq}(t)\} + \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)u_N\} \quad \text{IV.8}$$

En mode de glissement et en régime permanent, la dérivée de la surface est nulle (car la surface est égale à zéro). Ainsi, nous obtenons :

$$u_{eq}(t) = - \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} g(x, t) \right\}^{-1} \left\{ \frac{\partial S}{\partial x} f(x, t) \right\}, u_N = 0 \quad \text{IV.9}$$

Pour que la commande équivalente puisse prendre une valeur finie, il faut que :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)u_N\} \neq 0$$

Durant le mode de convergence, en remplaçant le terme  $u_{eq}$  par sa valeur (VI.7) dans l'équation (VI.6). Donc, nous obtenons une nouvelle expression de la dérivée de la surface, soit :

$$\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)u_N\}$$

$u_N(t)$  est un terme introduit pour satisfaire la condition de convergence  $S(x)\dot{S}(x) < 0$ .

Il détermine ainsi le comportement dynamique du système durant le mode de convergence, donc pour garantir l'attractivité de la variable à contrôler vers la surface de glissement et il est

donné par :  $\dot{S}(x) = u_N$

Le problème revient à trouver  $u_N$  tel quel :

$$S(x)\dot{S}(x) = S(x) \frac{\partial S}{\partial x} \{g(x, t)u_N\} < 0 \quad \text{IV.10}$$

La solution la plus simple est de choisir  $u_N$  sous la forme de relais (Figure.IV.6).

Dans cecas , la commandes écrit comme suit :

$$u_N = K \text{sign}(S(x)) \quad \text{IV.11}$$

$$\text{sing}(S) = \begin{cases} 1 & \text{si } S > 0 \\ -1 & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad \text{IV.12}$$

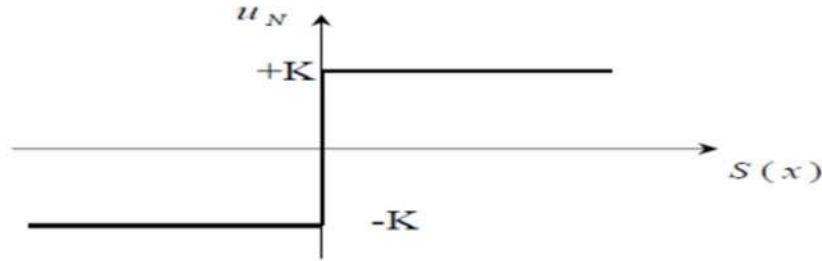


Figure. IV. 5 : Représentation de la fonction « SIGN ».

En remplaçant l’expression (IV.11) dans (IV.10), on obtient :

$$S(x)\dot{S}(x) = \frac{\partial S}{\partial x}g(x, t)K|S(x)| < 0 \tag{IV.13}$$

Où le facteur  $\frac{\partial S}{\partial x}g(x, t)$  La situation est toujours négative lorsqu’on considère la classe système.

Soit k une constante représentant la valeur de gain de la commande discontinue.

K : le gain, est pris positif afin de remplir la condition (IV.13). L’alternance du contrôle entre K positif et K négatif à une fréquence infinie induit des oscillations à haute fréquence connues sous le nom de bavardage ou « anneau de bavardage » en mode coulissant. L’apparition de ces oscillations constitue un obstacle sérieux aux applications de contrôle du mode de glissement, car le fonctionnement des circuits de puissance peut être compromis par les oscillations provoquées par ce phénomène, appelé anneau de broutage. Ce problème est presque toujours problématique et a nécessité d’importants efforts de recherche visant à l’atténuer ou à l’éliminer, car il peut compromettre les applications de contrôle du mode glissement en raison des effets nocifs introduits par les oscillations à haute fréquence (bavardage) ou « anneau de bavardage ». [43]

Une méthode qui permet de réduire l’effet du broutement est de remplacer la fonction discontinue par une fonction de saturation, adéquate qui filtre les hautes fréquences. On donne par l’équation (IV.14) un exemple de fonction ( la Figure IV.7).

•Fonction SAT :

$$\text{sat} = \begin{cases} K\text{si} & S(x) > \epsilon \\ -K & \text{si} S(x) < -\epsilon \\ \frac{K.S(x)}{\epsilon} & \text{si} |S(x)| \leq \epsilon \end{cases} \tag{IV.14}$$

$\epsilon$ : Un paramètre petit et positif

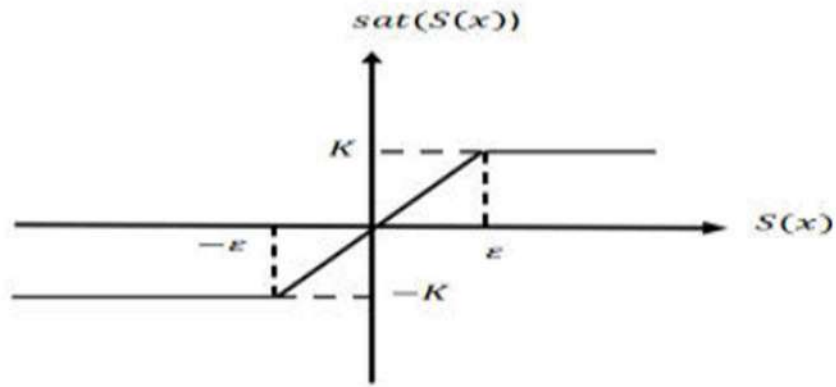


Figure. IV.6: Fonction de saturation

## IV.6 Commande de la puissance active et réactive de la GADA avec le mode glissant.:

### IV.6.1 Contrôle de la puissance active

Pour contrôler la puissance on prend le degré relatif de la surface est égal à ( $r=1$ ). L'expression de la surface de contrôle de la puissance active a pour forme [44] :

$$S(P) = P_{sref} - P_s \tag{IV.15}$$

La dérivée de la surface est :

$$S(\dot{P}) = P_{sref} - \dot{P}_s \tag{IV.16}$$

On remplace l'expression de la puissance (IV.16) devient

$$S(\dot{P}) = P_{sref} - V_s \frac{L_m}{L_s} i_{qr} \tag{IV.17}$$

On calcule l'expression du courant de l'équation de la tension  $V_{qr}$  :

$$S(\dot{P}) = P_{sref} - V_s \frac{L_m}{L_s} (V_{qr} - R_r I_{qr}) \tag{IV.18}$$

En remplaçant l'expression de  $V_{qr}$  par  $(V_{rreq} + V_{rqn})$ , la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$S(P) = P_{sref} - V_s \frac{L_m}{L_s} ((V_{rreq} + V_{rqn}) - R_r I_{qr}) \tag{IV.19}$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(P)=0 ; \dot{S}(P) = 0 \text{ et } V_{rqn} = 0$$

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

$$V_{rreq} = \frac{-P(\dot{s})_{sref}(L_s L_r \sigma)}{L_m V_s} + R_r I_{qr} \quad \text{IV.20}$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $S(P) \cdot \dot{S}(P) \leq 0$  soit vérifiée, on pose:

$$S(P) = \frac{-V_s \cdot L_m}{L_s L_r \sigma} V_{rqn} \quad \text{IV.21}$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

$$V_{rqn} = K \cdot \text{sat}(S) \quad \text{IV.22}$$

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre K doit être positif

### IV.6.2 Contrôle de la puissance réactive

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

$$S(Q) = Q_{sref} - Q_s \quad \text{IV.23}$$

La dérivée de la surface est :

$$S(\dot{Q}) = \dot{Q}_{sref} - \dot{Q}_s \quad \text{IV.24}$$

On remplace l'expression de la puissance (IV.23) devient :

$$S(\dot{Q}) = \dot{Q}_{sref} - V_s \frac{L_m}{L_s} I_{dr} \quad \text{IV.25}$$

On tire l'expression du courant de l'équation de la tension  $V_{dr}$ :

$$S(\dot{Q}) = \dot{Q}_{sref} - V_s \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} (V_{dr} - R_r I_{dr})_s \quad \text{IV.26}$$

En remplaçant l'expression de  $V_{dr}$  par  $(V_{rdeq} + V_{rdn})$ , la commande apparaît clairement dans l'équation suivante :

$$S(\dot{Q}) = \dot{Q}_{sref} - V_s \frac{L_m}{L_s L_r \sigma} ((V_{rdeq} + V_{rdn}) - R_r I_{dr}) \quad \text{IV.27}$$

Durant le mode de glissement et en régime permanent, on a :

$$S(Q)=0 \quad S(\dot{Q})=0 \quad \text{et} \quad V_{rdn} = 0$$

On tire de l'équation précédente la grandeur de commande équivalente qui s'écrit :

$$V_{rdeq} = \frac{-Q(s)_{sref}(L_s L_r \sigma)}{L_m V_s} + R_r I_{dr} \quad \text{IV.28}$$

Durant le mode de convergence, pour que la condition  $\dot{Q}_{sref} \cdot \dot{Q}_s \leq 0$  soit vérifiée, on pose:

$$S(\dot{Q}) = \frac{-V_s \cdot L_m}{L_s L_r \sigma} V_{rdn} \quad \text{IV.29}$$

Par conséquent, le terme de commutation est donné par :

Pour vérifier la condition de stabilité du système, le paramètre K doit être positif. Le schéma bloc de la commande par mode glissant de la GADA est illustré sur la figure VI.7

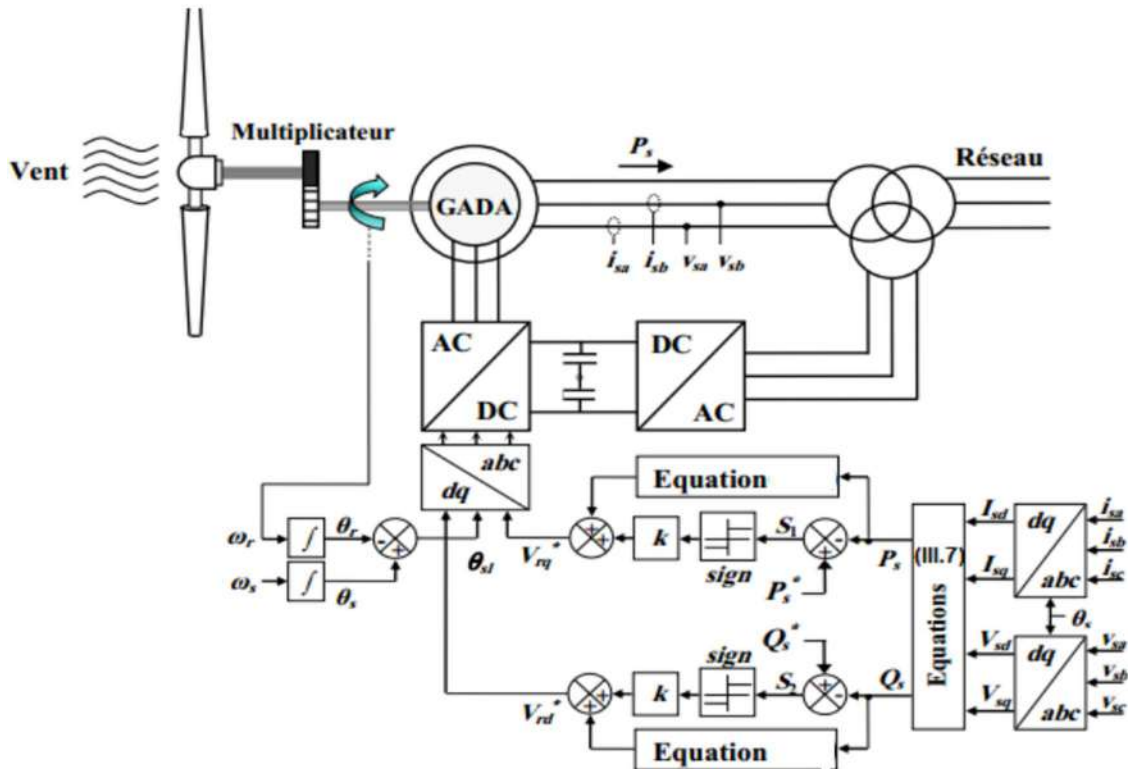


Figure IV.7 : Schéma fonctionnel de l'unité de commande par mode glissant de La GADA

### IV.7 Résultats de Simulation :

Dans le troisième chapitre, nous avons déjà mentionné que le générateur suit les variations des niveaux de puissance active et réactive appliqués à son stator rapidement mais sans dépassement. Un bon découplage entre les axes de contrôle d et q avec de faibles oscillations est observé lors de ces étapes comme le montrent les figures III.7 et III. 8. De plus, il ressort des figures III. 9 et III 10 que les courants obtenus au

Le GADA présente une forme sinusoïdale pour le stator et le rotor, ce qui implique une fourniture ou une absorption d'énergie propre sans harmoniques.

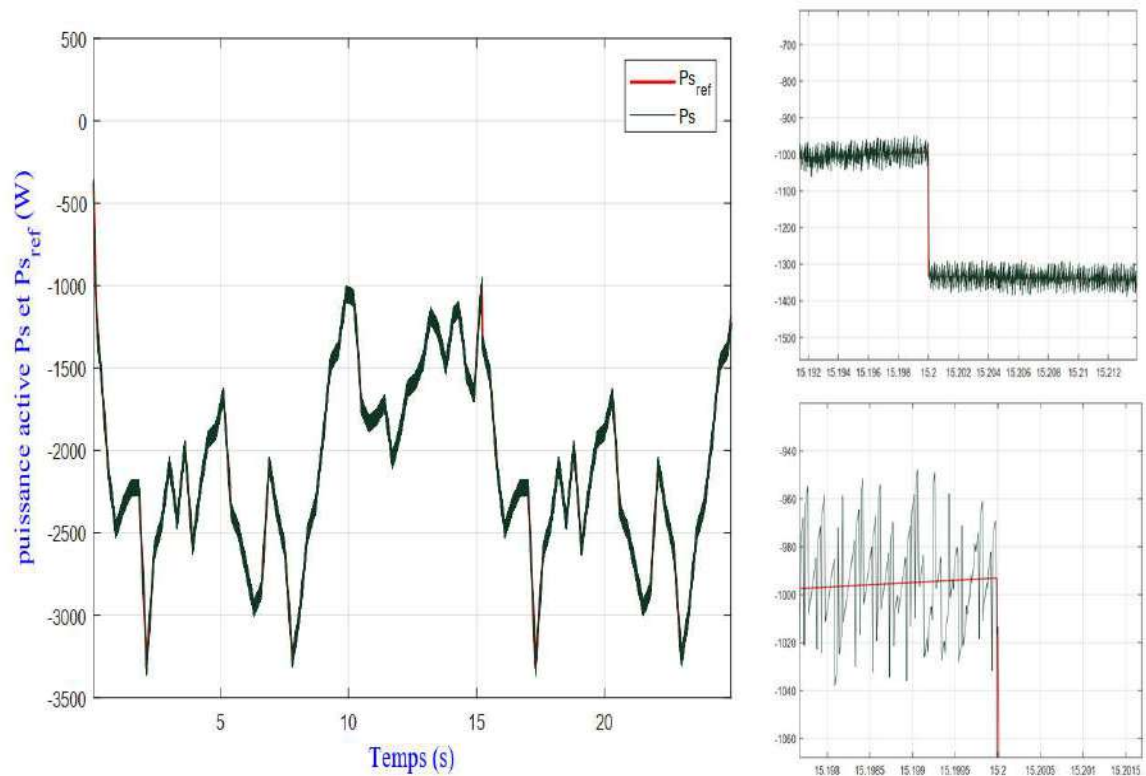


Figure IV.8 : Puissance active statorique par SMC

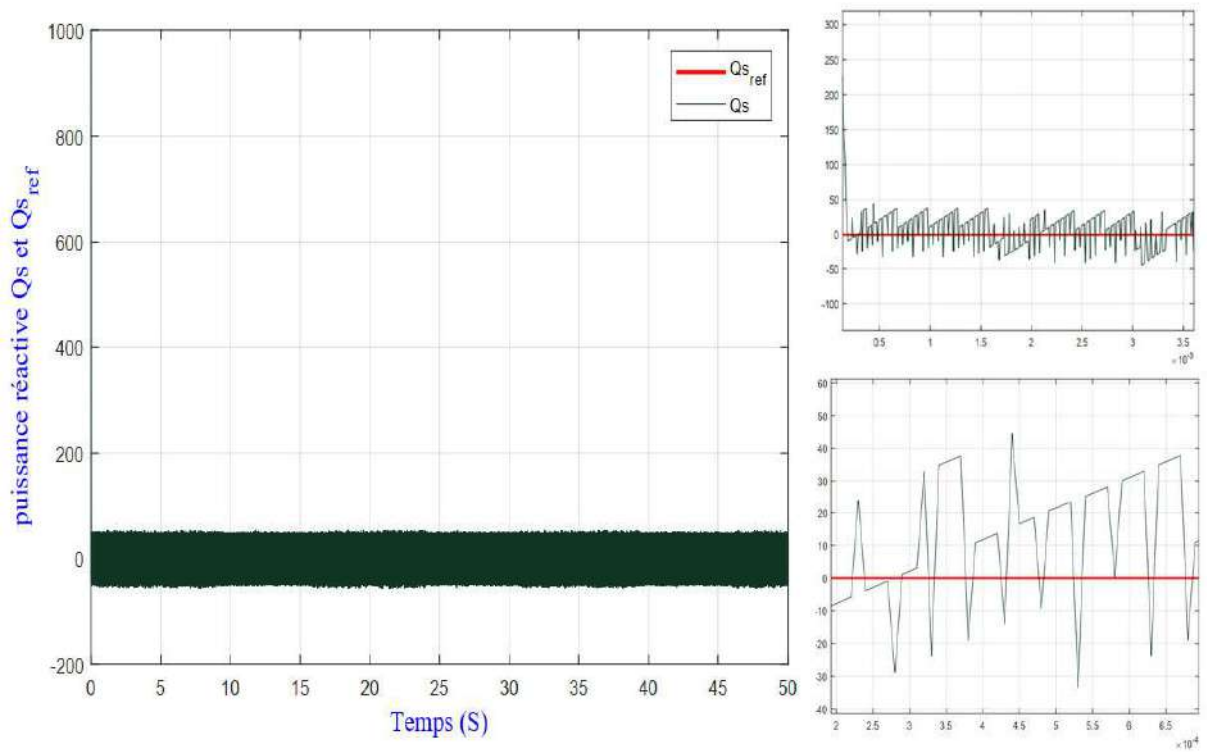


Figure IV.9 : La puissance réactive par SMC



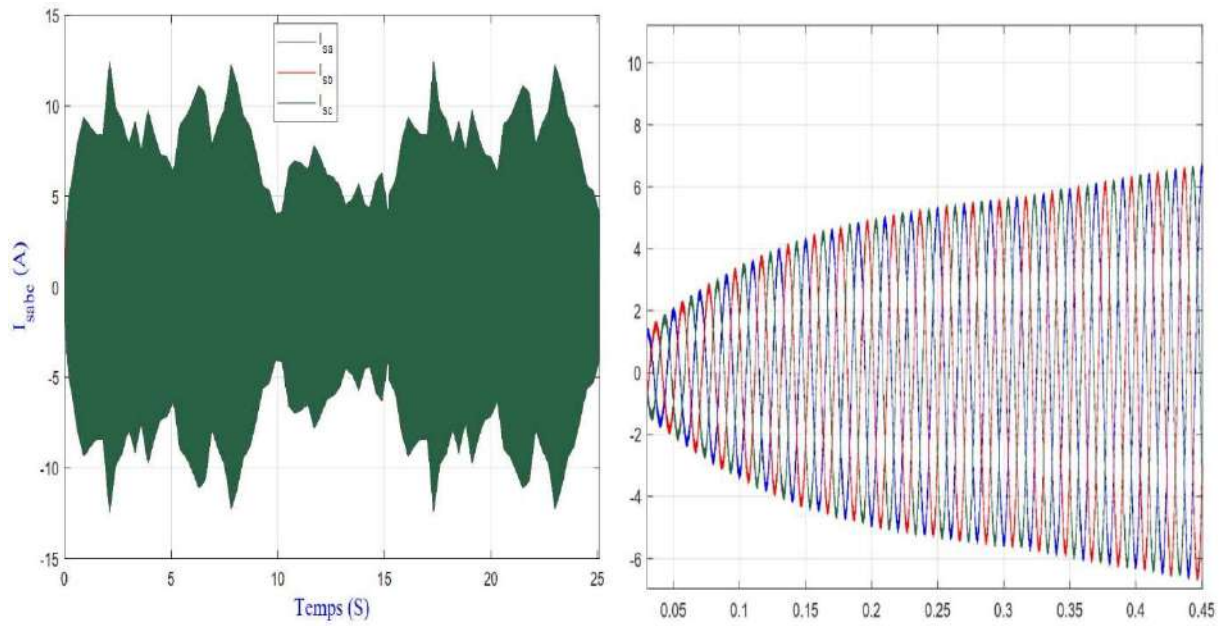


Figure IV.10 : Courant statorique par SMC

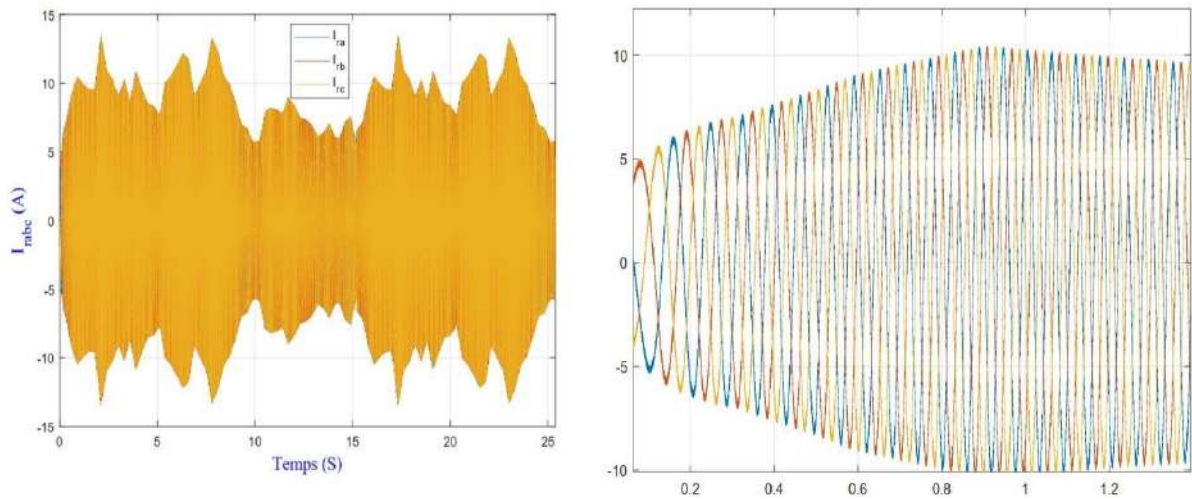


Figure IV.11 : Courants rotoriques de la commande par SMC

**IV.8. Conclusion :**

Ce chapitre présente la théorie du contrôle par mode glissant et son application dans les générateurs à induction à double alimentation (GADA) pour obtenir un contrôle robuste de la puissance active et réactive du stator, où le contrôle a une forme différente par rapport au contrôle vectoriel classique.

Les résultats de la simulation montrent la fiabilité et la robustesse du contrôle. Le contrôle peut maintenir la puissance active du stator et sa valeur de référence bien, rapidement et sans dépassement, et l'erreur est presque négligeable.

# CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le cadre de notre recherche , nous sommes penchés sur la production et la conversion de l'énergie éolienne. Notre objectif était d'étudier et de simuler une chaîne de conversion d'énergie éolienne comprenant une turbine de puissance moyenne et un générateur asynchrone à double alimentation.

Dans le premier chapitre, nous avons découvert un aperçu de la production éolienne qui discutait des principes de base derrière la transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique. Il s'est également penché sur les différentes technologies des éoliennes et les types de machines électriques impliquées dans le processus de conversion. Sur la base de cette étude, nous avons opté pour la machine asynchrone à double alimentation par rapport aux autres car elle nous a été jugée plus adaptée. de ses performances avérées..

Le chapitre suivant s'est penché sur la modélisation de divers composants du système. Ces modèles ont ouvert la voie au développement de nombreuses approches de contrôle, toutes visant à obtenir une surveillance exacte et ininterrompue des puissances statoriques produites. L'objectif est double : garantir une production rapide, stable et sans faille, avec comme résultat final un rendement élevé, malgré le système qualité. En se concentrant de cette manière sur les différents composants du système, il est possible d'atteindre un haut niveau de précision dans le contrôle tout en maintenant une cohérence transparente tout au long du processus, quels que soient les facteurs de complication qui pourraient survenir en cours de route.

Le troisième chapitre a donc été consacré à l'application du contrôle vectoriel utilisant l'orientation du flux statorique. Nous avons également introduit le contrôle vectoriel via l'orientation du flux du stator pour la machine asynchrone à double alimentation ; ici, le contrôle est réalisé avec un cadre de référence de puissance ( $d$   $q$ ) qui régit l'échange de puissances actives et réactives entre le stator et le réseau sans exigences strictes en matière de précision et de performances du système, les algorithmes de réglage conventionnels tels que PI pouvant suffire.

Le chapitre quatre nous a vu approfondir la mise en œuvre d'une approche de contrôle en mode glissant. Les résultats ont démontré que cette méthodologie d'ajustement a conduit à des améliorations significatives, dépassant de loin celles réalisables avec les contrôleurs PI

# CONCLUSION GÉNÉRALE

classiques. En règle générale, les régulateurs à mode glissant présentent des capacités statiques et dynamiques impressionnantes ; ils ont tendance à éliminer complètement toute forme de perturbation tout en assurant également un suivi optimal. En résumé, notre travail de mémoire a identifié plusieurs opportunités de développement, dont :

- L'étude et l'utilisation de convertisseurs de niveau supérieur, tels que les convertisseurs à trois niveau , dans une chaîne de conversion éolienne
- La mise en place d'une plateforme expérimentale pour tester et mettre en œuvre les méthodes de commande proposées
- L'analyse des problèmes liés à la production d'énergie éolienne en relation avec le dés- équilibre du réseau, les chutes de tension et les variations de tension.
- La création d'un modèle MADA prenant en compte la saturation magnétique.
- Étudier les stratégies de contrôle non linéaires et intelligentes comme alternative aux régulateurs classiques dans le but de remédier à leurs lacunes.
- Concevoir des contrôles tolérants aux pannes pour améliorer la fiabilité des installations de production d'énergie éolienne.

Ces points de vue ouvrent la voie à de nouveaux domaines de recherche et permettent d'identifier certains aspects clés de l'énergie éolienne, qui doit être abordée parallèlement à l'amélioration des performances et à une meilleure intégration dans les réseaux électriques.

# Référence

- 1- AHMIDAT, Zana, Zahra KOUIDRI, and S. Encadreur MEKHLLOUFI. *Commande d'une éolienne à base d'une GADA par un onduleur multi-niveaux*. Diss. Université Ahmed Draia-Adrar, 2018.
- 2- Aldwaihi, Hani Alhamed. *Commande non linéaire fondée sur la platitude d'un système de production éolien*. Diss. Université de Bretagne occidentale-Brest, 2013.
- 3- Ben Idriss, A. Elhella, M. E. *Commande Backstepping d'une Machine Synchrone à Rotor Bobiné (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA)*.2022
- 4- Mayouf, Messaoud. *Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone a aimants permanents*. Diss. Batna, Université El Hadj Lakhdar. Faculté des sciences de l'ingénieur, 2008.
- 5- SARAH, NASR, and MOUBAYED NAZIH. "Etude comparative entre éolienne à axe horizontal et éolienne à axe vertical." *Université Libanaise, Faculté de Genie 1* (2011).
- 6- Krafczyk, Pascal. "Modélisation et mise en œuvre d'une chaîne de production éolienne à base de la MADA." *Mémoire présentée pour l'obtention du diplôme d'ingénieur en Electrotechnique, Centre d'enseignement de Nancy 10* (2013).
- 7- Multon, Bernard, et al. "Aérogénérateurs électriques." *Techniques de l'ingénieur. Génie électrique* 7.D3960 (2004).
- 8- Guenoune, Ibrahim. *Commandes non linéaires robustes de systèmes éoliens*. Diss. École centrale de Nantes; Université Abou Bekr Belkaid (Tlemcen, Algérie), 2018.
- 9- <https://fr.statista.com/statistiques/828693/capacite-production-energie-eolienne-mondiale/>
- 10- D. KAOUA and Y. ZIDELMAL, 2020"Commande linéaire d'un éolienne basé surlamachine asynchrone double alimentation," Université Ahmed Draïa Adrar, 2020..
- 11- Tir, Zoheir. *Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade*. Diss. 2018
- 12- Arnaltes, S. "Comparison of Variable Speed Wind Turbine Control Strategies." *RE&PQJ* 1.1 (2003).
- 13- Tamaarat, A.J.U.M.K., Biskra, *Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergieéolienne à base d'une MADA*. 2015.
- 14- SABONNADIÈRE, Jean-Claude. *Nouvelles Technologies de l'énergie 2*. Hermes science publications, 2007.
- 15- Philippe Missirliu. « Stratégies de commande des onduleurs ». Lycée Newton- Entrea Clichy, 2003.
- 16- KHADRAOUA, Narimene, and Sakina HABIB HANSALI. "Régulation floue de vitesse de la machine synchrone à aimant permanent." (2019).
- 17- MOUAZ, Khadidja, and Halima HADJE AHMED. *Commande non linéaire d'une turbine éolienne connectée à une MSAP*. Diss. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2018.
- 18- Malika, Boudissa, and Boudjemil Houria. *Commande d'une éolienne à base d'une Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)*. Diss. Université Mouloud Mammeri, 2017.

# Référence

- 19- KOUIDER, KEDDOURI. "Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) utilisée dans la conversion de l'énergie éolienne." Diss. Université Mohamed Khider de Biskra 2022 .
- 20- Aldwaihi, Hani Alhamed. Commande non linéaire fondée sur la platitude d'un système de production éolien. Diss. Université de Bretagne occidentale-Brest, 2013.
- 21- Refoufi, L., B. A. T. Al Zahawi, and A. G. Jack. "Analysis and modeling of the steady state behavior of the static Kramer induction generator." IEEE Transactions on Energy Conversion 14.3 (1999): 333-339.
- 22- Ben Khelifa, Kamel, and Abdelhamide Touil. "Commande de génératrice asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-reliée au réseau." (2018).
- 23- Salloum, Georges. Contribution à la commande robuste de la machine asynchrone à double alimentation. Diss. 2007.
- 24- Boyette, Armand. Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne. Diss. Université Henri Poincaré-Nancy I, 2006.
- 25- HAMZA, M. M. A., KAIS, M. N., en Electrotechnique, M. Commande de la machine asynchrone à double alimentation—apport des techniques de l'intelligence artificielle. Diss. Université El-Oued, 2017.
- 26- Elbia, Youcef. Commande floue optimisée d'une machine asynchrone à double alimentation et à flux orienté. Diss. Université de Batna 2, 2009.
- 27- ARAMA, Mohamed Amin, and Fatima ARAMA. Commande non linéaires d'une éolienne basé sur la machine asynchrone double alimentation. Diss. UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR, 2021.
- 28- Mourad, Loucif. Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur. Diss. Ph. D. thesis, Université Aboubakr Belkaid–Tlemcen–Faculté de Technologie, 2016.
- 29- F. Poitiers. Etude et commande de génératrice asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, Ecole polytechnique de l'Université de Nantes, 2003.
- 30- N.Cherfia "Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens" mémoire Magister.Univ.Constantine. juin2007
- 31- Merour Aymen, Boudour Aymen. "Commande d'une GADA utilisée dans un aérogénérateur relié au réseau électrique." (2021).
- 32- AZZOUZ, S. Contrôle des puissances actives et réactives de la MADA par les réseaux de neurones artificiels (Doctoral dissertation, Université Mohamed Boudiaf-M'Sila . (2014).
- 33- ARISTIDE, BOUGNESSAN, et al. INTEGRATION DES ENERGIES RENOUVELABLES AUX RESEAUX ELECTRIQUES. EDITIONS UNIVERSITAIRES E, 2021.
- 34- TOUATI, Mustapha Kamel. "Etude d'une génératrice éolienne connectée au réseau électrique." Mémoire de Magister, Université de Batna 15.01 (2015).

# Référence

- 35- Merour Aymen, Boudour Aymen. "Commande d'une GADA utilisée dans un aérogénérateur relié au réseau électrique." (2021).
- 36- Sajid, Mr Rashid. "Load & Stress Analysis of Horizontal Axis Wind Turbine and Comparison between Fiberglass & Carbon Fiber Blades." (2011).
- 37- TOUNSI O , LASKRI Z " Etude et commande d'une turbine éolienne Utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation", UNIVERSITE BADJI MOKHTAR (ANNABA , Algérie)).2018.
- 38- F. BOUMARAF, "Commande D'un Aérogénérateur- Apport Des Techniques de L'intelligence Artificielle", thèse de doctorat, université de Batna. 24/06/2014
- 39- B. Meriem, Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation MADA, Mémoire De Magister En Génie Electrique Ecole Nationale Polytechnique d'Oran, 2013 / 2014.
- 40- Pao, Lucy Y., and Kathryn E. Johnson. "Control of wind turbines." IEEE Control systems magazine 31.2 (2011): 44-62.
- 41- P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI, "Éoliennes", Techniques de l'Ingénieur. 04/11/2008.
- 42- TURKIYA AMINA, BERRA ; NOURA, DJEDI. La Commande Directe du Couple d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation. PhD Thesis. UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAFM'SILA.
- 43- Abdelli, Abdenour. Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive. Diss. Institut National Polytechnique de Toulouse-INPT, 2007.
- 44- Thukaram, D. "Accurate modeling of doubly fed induction generator based wind farms in load flow analysis." Electric Power Systems Research 155 (2018): 363-371.
- 45- Boumediene, Tarfaoui. Commande par mode Flou Glissant de la Machine Asynchrone Double Alimentée utilisée en Aérogénérateur. Diss. Université Mohamed Boudiaf des Sciences et de la Technologie d'Oran, 2015.
- 46- El Aimani, Salma. Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. Diss. Ecole Centrale de Lille, 2004.
- 47- Gaillard, Arnaud. Système éolien basé sur une MADA: contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service. Diss. Université Henri Poincaré-Nancy 1, 2010.
- 48- Sun, Hongchang, Yaozhen Han, and Lvyuan Zhang. "Maximum Wind Power Tracking of Doubly Fed Wind Turbine System Based on Adaptive Gain Second-Order Sliding Mode." Journal of Control Science and Engineering 2018.1 (2018): 5342971.
- 49- Metatla, Samir. Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA. Diss. Alger, Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2009.
- 50- A. Bendaikha «Commande par MLI vectorielle d'onduleur multi-niveaux »Thèse de doctorat. Université badjimokhtar- Annaba, Algérie. Janvier 2018

# Référence

- 51- Sebti, Belkacem. "Contribution à la commande directe du couple de la machine à induction." Docteur En Science Genie Electrique De L'université De Batna 17.03 (2011).
- 52- Laamayad, Tahar. Contribution à la Commande d'une Machine Asynchrone Double Etoile par Mode Glissant. Apport de la Logique floue. Diss. Université de Batna 2, 2014.
- 53- Vidal, Paul-Étienne. Commande non-linéaire d'une machine asynchrone à double alimentation. Diss. Institut National Polytechnique (Toulouse), 2004.
- 54- ARAMA, Mohamed Amin, and Fatima ARAMA. Commande non linéaires d'une éolienne basé sur la machine asynchrone double alimentation. Diss. UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR, 2021.
- 55- D . redha. A . Farouq « Commande par mode glissant et flou d'une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) « Application à l'énergie éolienne» Mémoire Master universite m'sila . ( 2017).
- 56- Hussain, Ayman. Contribution à la commande adaptative robuste par modes glissants. Diss. Reims, 2008.
- 57- L. Abderrahmane and B. Mohammed, "Commande d à €TM une éolienne basée sur une machine asynchrone à double alimentation ( MADA )," Université Ahmed Draïa Adrar, 2019.
- 58- F. POITIERS, « Etude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne : machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes. 12/2003.
- 59- B . Cherif « Simulation de la commande vectorielle par régulateurs à mode glissant d'une chaîne éolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation » MEMOIRE de Magister Université Mohamed Khider – Biskra ,2012
- 60- B . YACINE « Commande d'un convertisseur CA/CC et contrôle par différentes techniques » Mémoire master universite d'el-oued ,2015
- 61- MAZOUZ, F. Commande d'un système éolien à base d'un générateur synchrone à aimants permanents (Doctoral dissertation, Université de Batna 2). (2013).
- 62- S. Belkacem, «Contribution à la commande directe du couple de la machine à induction», Thèse de doctorat, Université Batna, 2011.
- 63- M. Pinard, «La commande électronique des machines», DUNOD, Paris, 2013.
- 64- F. Akel, « Etude et réalisation d'un émulateur de turbine éolienne », Mémoire De Magister En, Ecole Militaire Polytechnique, Algérie, 2009.
- 65- Mamdani, Ebrahim H., and Sedrak Assilian. "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller." International journal of man-machine studies 7.1 (1975): 1-13.

## Référence

- 66- F.Dehoum, « Commande vectorielle d'une génératrice asynchrone double alimentation «GADA» pour l'utilisation de l'énergie éolienne », Mémoire d'ingénieur d'état, université de m'sila , Algérie. 2011.
- 67- HAMANE Bekhada, « CONTROLE ROBUSTE 'AEROGENERATEUR » Thèse de magistère ENSET – ORAN,2012



# ANNEXE

Symboles	Valeur numérique
$P_n$	4 kw
$R_s$	1.2 $\Omega$
$R_r$	1.8 $\Omega$
$M$	0.15 H
$L_s$	0.1554 H
$L_r$	0.1568 H
$P$	2
$V$	220/380 V
$F$	50 Hz
$J$	0.2 Kg.mm <sup>2</sup>
$N$	1440 tr/min
$f$	0.001 N.m.s /rd

**Tableau 1:** Paramètres de la GADA.

# ANNEXE

## 2. Les paramètres de la turbine éolienne utilisée :

Symboles	Valeur numérique
$Bt$	2
$Rt$	60 m
$\rho$	1.225 Kg /m <sup>3</sup>
G	90
$Jt$	50 Kg.mm <sup>2</sup>
$fv$	0.0071 N.m. s <sup>2</sup>

**Tableau 2:** Paramètres de la turbine éolienne.



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



Ministère de L'enseignement Supérieur et de La recherche Scientifique

جامعة غرداية Université de Ghardaïa

Faculté des sciences et de la technologie

كلية العلوم و التكنولوجيا

قسم الآلية و الكهروميكانيك Département d'Automatique et électromécanik

17 أكتوبر 2024

## إذن بالطباعة ( مذكرة ماستر )

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسمائهم:

1. الطالب (ة) : نواصر محمد

2. الطالب (ة) : عائب محمد الامين

تخصص : طاقات متجددة في الكهرو تقني

نمنح نحن الأساتذة :

اللقب والاسم	الرتبة	مكان العمل	الصفة	الامضاء
حفصي زوليفة	أستاذ محاضر ب	جامعة غرداية	رئيس اللجنة	
منوكالي حمزة	أستاذ محاضر ا	جامعة غرداية	مصحح (1)	
بحري احمد	أستاذ محاضر ب	جامعة غرداية	مصحح (2)	
موسى أسامة	أستاذ محاضر ب	جامعة غرداية	مؤطر	
سعدوني رضوان	أستاذ محاضر ا	جامعة غرداية	مساعد مؤطر	

الإذن بالطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان :

"Commande non linéaire d'un système éolien à base de La GADA"

امضاء رئيس القسم

مساعد رئيس قسم الآلية و الكهروميكانيك  
مكلف بما بعد التدقيق في المذكرة العلمية  
حسن نواصر

جامعة غرداية  
قسم الآلية  
والكهروميكانيك-2  
كلية العلوم و التكنولوجيا