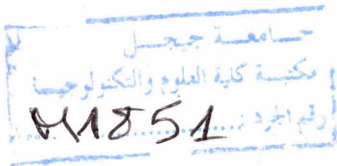


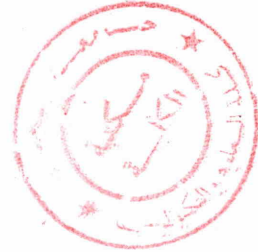
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Jijel
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'Automatique

Laboratoire d'Automatique de Jijel -LAJ-



Mémoire

de Projet de Fin d'Etudes pour l'obtention du diplôme de Master en
Automatique et informatique industrielle

Thème

Contribution à l'étude d'un système de conversion
d'énergie éolienne base sur MADA
"commande et optimisation"

Présenté par :

M . Khalil Boufas & M . Sami Labdai

Soutenu le 24/06/2014 devant le jury composé de

M . Toufik Bouden	Maitre de conference A	Président
M . Abdesselem Boulkroune	Maitre de conference A	Examineur
M . Naamane Bounar	Maitre-assistant A	Encadreur

Promotion 2014

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu Le tout puissant de nous avoir donné le courage, la volonté, la patience, et la santé durant toutes ces années et que grâce à lui ce modeste travail a pu être réalisé.

Nous tenons à formuler notre gratitude et nos profonds remerciements à notre encadreur Naamane BOUNAR, pour avoir assumé la responsabilité de nous encadrer, nous orienter et de nous conseiller tout au long de la réalisation de ce travail.

Nous remercions aussi aux membres du jury pour nous avoir honorés en acceptant de juger notre travail.

Nous tenons à remercier sincèrement l'ensemble de nos professeurs en général et ceux du département d'Automatique en particulier pour la formation qu'ils nous ont assuré tout au long de notre cursus universitaire.

À nous cher amis HAMZA et MERWAN un grand Merci et MR boubertakh.H pour être disponible et nous aide à réaliser ce travail

Des remerciements vont également à tous ceux qui, d'une quelconque façon, ont contribué à l'élaboration de ce travail.

A tous, un grand merci

Sami_Khalil

Dédicaces

À tous ceux qui nous sont chers ;

À tous notre collègue ;

*À tous les enseignants et les éducateurs qui ont
contribué à notre formation durant tout le
parcours de nos études jusqu'à ce jour ;*

... nous dédiant ce modeste travail.

Sami_Khalil



Tables des matières

Tables des matières

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale	1

Chapitre I : Généralités sur les Aérogénérateurs

I.1. Introduction.....	3
I.2. Energie électrique éolienne.....	3
<i>I.2.1. Energie éolienne dans le monde</i>	3
<i>I.2.2. Energie éolienne en Algérie</i>	4
I.3. Aérogénérateur	5
<i>I.3.1. Principe de fonctionnement d'une éolienne</i>	5
<i>I.3.2. Différents types d'éoliennes</i>	5
<i>I.3.2.1. Selon l'axe de rotation</i>	5
<i>I.3.2.2. Selon la puissance nominale</i>	6
<i>I.3.2.3. Selon la vitesse de rotation</i>	7
I.4. Composition des éoliennes à axe horizontal.....	8
<i>I.4.1. Le mat ou la tour</i>	9
<i>I.4.2. La nacelle</i>	9
<i>I.4.3. Le rotor</i>	10
I.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	10
<i>I.5.1. Avantages de l'éolien</i>	10
<i>I.5.2. Inconvénients de l'éolien</i>	10
I.6. Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne	10
<i>I.6.1. Machine synchrone (MS)</i>	11
<i>I.6.2. Machine asynchrone simple (MAS)</i>	11
<i>I.6.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)</i>	12
I.7. Conclusion	15

Chapitre II : Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

II.1. Introduction	16
II.2. Modélisation du convertisseur éolienne	16
<i>II.2.1. Modèle du vent</i>	16

II.2.2. Loi de Betz	17
II.2.3. Modèle de la turbine.....	19
II.2.3.1. Modèle des pales.....	19
II.2.3.2. Modèle du multiplicateur.....	20
II.2.3.3. Equation mécanique de l'arbre	20
II.3. Modélisation de la MADA.....	21
II.3.1. Présentation de la MADA.....	21
II.3.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.....	21
II.3.3. Modélisation de la machine à double alimentation (MADA).....	22
II.3.3.1. Hypothèses simplificatrices.....	22
II.3.3.2. Modèle effectif de la MADA.....	22
II.4. Simulation en Boucle Ouverte	26
II.4.1. Mode simple alimentation.....	26
II.4.2. Mode double alimentation (MADA)	28
II.5. Conclusion.....	29

Chapitre III : Commande linéaire de l'aérogénérateur

« Commande vectorielle à base de régulateurs PI »

III.1. Introduction.....	30
III.2. Stratégie de commande de la chaîne éolienne globale.....	30
III.2.1. Architecture du dispositif de commande	31
III.3. Maximal Point Power Tracking	31
III.4. Principe de la commande vectorielle	32
III.4.1 Choix du référentiel dq	33
III.4.2 Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique.....	33
III.5. Résultats de simulation	37
III.5.1. Test sous les conditions nominales.....	38
III.5.2. Test de robustesse.....	40
III.6. Conclusion	42

Chapitre IV : Commande non linéaire de l'aérogénérateur

IV.1. Introduction.....	44
IV.2. Stratégie de commande de l'aérogénérateur.....	44
IV.3. Principe de la commande par modes glissants	44
IV.3.1. Synthèse de la loi de commande.....	45

IV.3.1.1. Choix de la surface de glissement	45
IV.3.1.2. Condition d'existence du mode de glissement	45
IV.3.1.3. Calcul de la commande	46
IV.3.2. Application de la commande par modes glissants à la MADA	46
IV.3.3. Résultats de simulation.....	48
IV.4. Le broutement (chattering)	50
IV.5. Commande par modes glissants d'ordre supérieur (MGOS).....	51
IV.5.1. Théorie de la commande par modes glissants d'ordre supérieur	51
IV.5.2. Exemples de commandes par MGOS.....	52
IV.5.3. Algorithme du super-Twisting :	52
IV.5.4. : Application de la commande par MGOS à la MADA.....	52
IV.5.5. Résultats de simulation.....	54
IV.5.6. Inconvénients des commandes MGOS	55
IV.6. Commande par modes glissants floue.....	55
IV.6.1. Généralités sur la logique floue	55
IV.6.2. Variables linguistiques, fonctions d'appartenance	56
IV.6.3. Les Contrôleurs Flous	56
IV.6.3.1. Fuzzification.....	57
IV.6.3.2. Base des règles floues	57
IV.6.3.3. Modèle d'inférence flou	57
IV.6.3.4. Défuzzification	58
IV.6.4. Commande par modes glissants-floue de la MADA.....	58
IV.6.5. Résultats de simulation.....	60
IV.6.6. Etude comparative.....	62
IV.7. Conclusion	62

Chapitre V : Optimisation de la commande de l'aérogénérateur

V.1. Introduction.....	64
V.2. Généralité sur les méthodes d'optimisation	64
V.3. Formation de problème d'optimisation	64
V.3.1. Formulation mathématique.....	65
V.3.2. Fonction objectif.....	65
V.3.3. Domaine de recherche	65
V.3.4. Individu.....	65
V.3.5. Population.....	65

V.3.6. Génération.....	65
V.3.7. Contraintes.....	65
V.3.8. Critères d'arrêt.....	66
V.4. Paramètres à optimiser.....	66
V.5. Particle Swarm Optimization PSO.....	66
V.5.1. Principe de PSO.....	67
V.5.2. Algorithme de PSO.....	68
V.5.3. Résultats d'optimisation par PSO.....	68
V.6. Gravitational Search Algorithm GSA.....	69
V.6.1. Principe de GSA.....	69
V.6.2. Algorithme de GSA général.....	72
V.6.3. Résultats d'optimisation par GSA.....	72
V.7. Comparaison entre PSO et GSA.....	73
V.8. Algorithme hybride PSO-GSA.....	74
V.8.1. Principe PSO-GSA.....	74
V.8.2. Algorithme PSO-GSA.....	74
V.8.3. Résultats d'optimisation par PSO-GSA.....	75
V.9. Etude comparative.....	75
V.9.1. Avantage des algorithmes.....	76
V.9.2. Inconvénients des algorithmes.....	77
V.10. Conclusion.....	77
Conclusion général.....	78
Références bibliographiques	
Annexes	

Liste Des Figures

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Statistiques Mondiales de GWPC en 2013: (a) Capacité éolienne installée en MW entre 1993 et 2013, (b) Les leaders mondiaux de l'énergie éolienne.....	4
Figure I.2 : Carte préliminaire des vents en Algérie	4
Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent	5
Figure I.4 : Eoliennes à axe vertical.(a) De type Darrieus. (b) De type Savonius.....	5
Figure I.5 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes	6
Figure I.6 : Correspondance taille-puissance des éoliennes	7
Figure I.7 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.	8
Figure I.8 : Composants d'une éolienne.....	9
Figure I.9 : Vue éclatée de la nacelle.	9
Figure I.10 : Eolienne basé sur la machine synchrone.....	11
Figure.I.11 : Eolienne à base de la machine asynchrone	12
Figure I.12 : Eolienne utilisant la MADA.....	12
Figure I.13 : Différents modes de fonctionnement de la MADA	14

Chapitre II

Figure II.1 : Schéma global du convertisseur éolien.....	16
Figure II.2 : Profil de la vitesse du vent	17
Figure II.3 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.....	17
Figure II.4 : Evolution du coefficient de puissance C_p avec la variation de la vitesse spécifique λ	20
Figure II.5 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	21
Figure II.6 : Représentation spatial des enroulements de la MADA.....	22
Figure II.7 : différents systèmes axe utilisés.....	24
Figure II.8 : Réponses de la machine en mode simple alimentation (MAS) à vide	27
Figure II.9 : Réponses de la MADA avec tension de rotor 220 V et 50 Hz et $C_r=50$ N.m.....	28

Chapitre III

Figure III.1 : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable	30
Figure III.2 : Principe de commande d'une éolienne à vitesse variable	32
Figure III.3 : Schéma de régulation de vitesse.....	32
Figure III.4 : Orientation du repère dq	34
Figure III.5 : Alimentation parfait de GADA.....	36
Figure III.6 : Schéma de régulation des courants.....	36
Figure III.7 : Principe de la commande du système éolien	37
Figure III.8 : Equation du vent utilisé dans la simulation.....	37
Figure III.9 : Résultats de simulation de la commande vectorielle- test sous conditions nominales.	38
Figure III.10 : Puissance active du stator et du rotor en modes Hypo/Hyper-synchrone.....	40
Figure III.11 : Résultats de simulation de la commande vectorielle –test de robustesse.....	41

Chapitre IV

<i>Figure IV.1 : Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état</i>	44
<i>Figure IV.2 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant</i>	49
<i>Figure IV.3 : Avantage et inconvénient de la commande discontinu</i>	50
<i>Figure IV.4 : Décomposition des tensions en terme équivalent et discontinue</i>	51
<i>Figure IV.5 : Convergence de l'algorithme Super Twisting dans le plan S, \dot{S}</i>	53
<i>Figure IV.6 : Résultats de simulation de la commande par MGOS</i>	54
<i>Figure IV.7 : Structure générale d'un contrôleur flou</i>	56
<i>Figure IV.8 : fonction d'appartenance d'entrée et sortie du contrôleur</i>	59
<i>Figure IV.9 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant floue</i>	61

Chapitre V

<i>Figure V.1 : Entrée et sortie de modèle d'inférence</i>	66
<i>Figure V.2 : Mouvement d'une particule dans l'espace de recherche</i>	68
<i>Figure V.3 : Algorithme générale de PSO</i>	68
<i>Figure V.4 : Résultats d'optimisation avec l'algorithme de PSO</i>	69
<i>Figure V.5 : Forces appliquées sur un agent dans l'espace de recherche</i>	70
<i>Figure V.6 : Algorithme générale de GSA</i>	72
<i>Figure V.7 : Résultats d'optimisation avec GSA</i>	73
<i>Figure V.8 : Algorithme générale de PSO-GSA</i>	74
<i>Figure V.9 : Résultats d'optimisation avec PSO-GSA</i>	75
<i>Figure V.10 : Comparaison entre les méthodes d'optimisation</i>	76



Liste Des Tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I

<i>Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes selon la puissance</i>	6
<i>Tableau I.2 : Comparaison Vitesse fixe vs vitesse variable.....</i>	8
<i>Tableau I.3 : Avantages et inconvénients des générateurs synchrones.....</i>	11
<i>Tableau I.4 : Avantages et inconvénients des générateurs asynchrones.....</i>	12
<i>Tableau I.5 : Avantages et inconvénients de la génératrice asynchrone double alimentation</i>	13

Chapitre VI

<i>Tableau IV.1 : Etude comparative entre les quatre commandes présentées</i>	62
---	----

Chapitre V

<i>Tableau V.1 : Comparaison entre les méthodes d'optimisation utilisées.....</i>	76
---	----



Liste Des Notations Et Symboles

NOTATIONS ET SYMBOLES

Principaux indices et exposants

- $(\cdot)_{as}, (\cdot)_{bs}, (\cdot)_{cs}$: Composantes (a, b, c) dans un repère triphasé lié au stator.
- $(\cdot)_{ar}, (\cdot)_{br}, (\cdot)_{cr}$: Composantes (a, b, c) dans un repère triphasé lié au rotor.
- $(\cdot)_{\alpha}, (\cdot)_{\beta}$: Composantes (α, β) dans un repère diphasé.
- $(\cdot)_d, (\cdot)_q$: Composantes (d, q) dans un repère diphasé tournant.
- $(\cdot)_s, (\cdot)_r, (\cdot)_h$: Composantes statorique, rotorique et d'entrefer.
- $(\cdot)_{ref}$: Grandeur de référence.
- $(\cdot)_n$: Grandeur nominale.
- $(\cdot)^T$: Matrice transposée.

Principaux symboles

- $R_s, (R_r)$: Résistance par phase d'un enroulement au stator (respectivement rotor).
- $l_s, (l_r)$: Inductance propre d'un enroulement stator (respectivement rotor).
- $L_s, (L_r)$: Inductance cyclique du stator (respectivement rotor).
- M_{sr} : Mutuelle Inductance cyclique.
- σ : Coefficient de dispersion magnétique.
- p : Nombre de paire de pôles.
- f : Coefficient des frottements visqueux.
- f_r : Coefficient de frottement.
- J : Inertie du moteur chargé.
- V : Fonction de Lyapunov.
- η, ψ : Constantes strictement positives.
- α, β, γ : Des constantes.
- k_1, k_2 : Constantes positives.

K_p	: Le coefficient de proportionnalité.
K_i	: La constante de temps d'intégration.
S	: L'opérateur de Laplace.
$\Delta(s)$: Matrice modélisant les incertitudes.
μ	: Fonction d'appartenance.
ρ	: Densité de l'air
C_g	: Effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice
R	: Rayon des pales
C_p	: Coefficient de puissance
λ	: vitesse spécifique

Principales grandeurs

C_{em}	: Couple électromagnétique.
C_r	: Couple résistant.
C_G	: Couple aérodynamique.
ϕ	: Flux magnétique.
θ	: Angle entre un enroulement rotorique et son homologue statorique.
$\theta_s, (\theta_r)$: Angle entre la phase a du stator (respectivement rotor) et l'axe d .
ω	: Vitesse angulaire électrique.
$\omega_s, (\omega_r)$: Pulsation des grandeurs statoriques (respectivement rotoriques).
Ω	: Vitesse de rotation mécanique du rotor.
Ω_s	: Vitesse de rotation du champ statorique.
Ω_r	: Vitesse de rotation du champ rotorique.
P_s	: Puissance active statorique.
Q_s	: Puissance réactive statorique.

Abréviation

<i>WCES</i>	Wind Conversation Energie System
<i>GWEC</i>	Global Wind Energy Council.
<i>AC</i>	Alternative Current (courant alternatif).
<i>DC</i>	Direct Current (courant continu).
<i>MADA</i>	Machine Asynchrone Double Alimentation.
<i>GADA</i>	Générateur Asynchrone Double Alimentation.
<i>MAS</i>	Machine Asynchrone.
<i>MS</i>	Machine Synchrone.
<i>MPPT</i>	Maximum Power Point Tracking.
<i>PI</i>	proportional integral.
<i>CSV</i>	commande structure variable.
<i>MGOS</i>	Mode glissant d'ordre supérieur.
<i>PSO</i>	Particule swarm optimization.
<i>GSA</i>	Gravitational Search Algorithm.



Introduction

Générale

Introduction générale

L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médical, informatique... etc.) ont mené à des besoins planétaires immenses en énergie électrique. Aujourd'hui, plus de deux milliards d'êtres humains n'ont pas l'accès à l'électricité pour cause d'économie fragile, d'infrastructures lourdes et coûteuses, de zones difficiles d'accès et d'habitat dispersé. Face à la demande en électricité, toujours croissante de nos jours, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole et gaz), plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables. Elles sont de plus en plus utilisées et développées, car elles permettent de faire des économies d'énergie et participent au développement durable.

En effet, un véritable challenge mondial est pris au sérieux aujourd'hui, aussi bien sur la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, que sur celui de l'exploitation des ressources d'énergie renouvelable. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile et nucléaire puisque l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable. Ce type d'énergie procure l'avantage de ne pas être centralisé, mais d'être disponible là où a lieu la demande. En effet, l'éloignement engendre des pertes considérables à travers les câblages dont l'investissement se caractérise par des coûts très importants. Aujourd'hui, le transport classique de l'électricité est remis en question grâce à la disponibilité et la démocratisation des éoliennes et donc une décentralisation de la production [1].

A la lumière de ce constat, notre travail porte sur l'étude et la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne appelé *aérogénérateur* ou *éolienne*. De nos jours, une grande partie des éoliennes installées dans le monde sont équipées de machines asynchrones à double alimentation (MADA). En effet, cette génératrice permet une production d'électricité à vitesse variable, ce qui permet alors de mieux exploiter les ressources éoliennes pour différentes conditions de vent. L'ensemble de l'éolienne est contrôlé de manière à maximiser en permanence la puissance produite en recherchant le point de fonctionnement à puissance maximum communément appelé MPPT.

Ce manuscrit est organisé en cinq chapitres.

Dans le premier chapitre, nous allons présenter un état de l'art sur les aérogénérateurs. Les différents types d'éoliennes ainsi que le principe de conversion d'énergie éolienne en électricité seront présentés. Enfin, nous y verrons l'intérêt que présente la machine asynchrone à double alimentation par rapport aux autres machines utilisées.

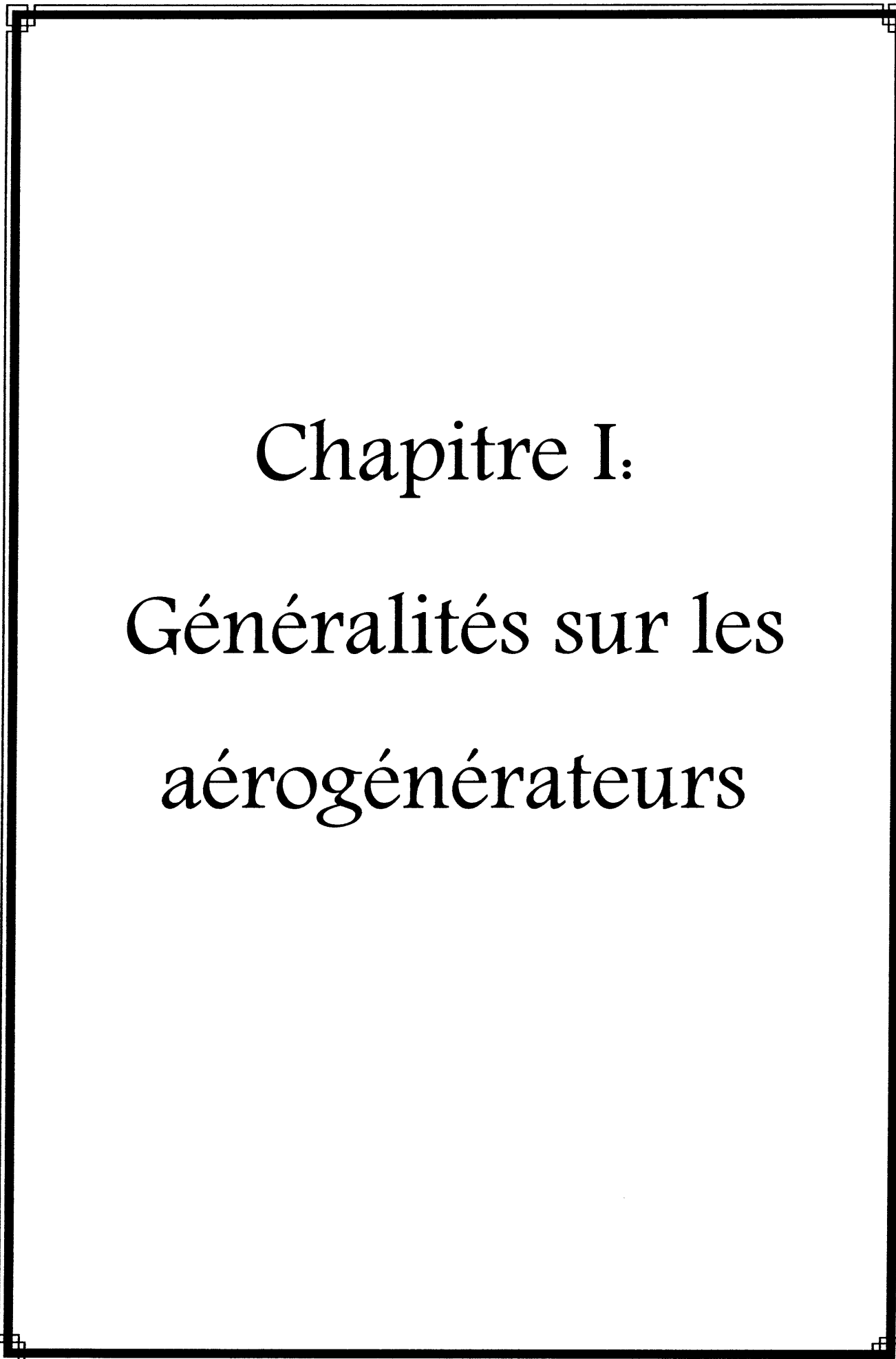

Dans le second chapitre, les différents constituants du système éolien à base de MADA seront modélisés. Par la suite, nous allons procéder à une validation en simulation du modèle de la MADA qui fait le cœur de notre système éolien, ceci afin de pouvoir l'insérer dans le système de conversion global.

Le troisième chapitre présentera une stratégie de commande adéquate de l'aérogénérateur permettant le captage du maximum de la puissance disponible dans le vent, cette stratégie est basé principalement sur la commande vectorielle à base des régulateurs PI de la MADA associe à un asservissement optimal de sa vitesse de rotation.

Le quatrième chapitre abordera le problème de robustification de la stratégie de commande adoptée dans le chapitre précédent. Le principe consiste à remplacer les régulateurs PI utilisés dans la commande vectorielle par des régulateurs plus élaborés, et bien adaptés aux conditions de fonctionnement extrême de l'aérogénérateur et plus particulièrement de la MADA dont le modèle peut être entaché d'incertitudes. Ainsi, trois types de commande non linéaires seront présentés, à savoir, la commande par modes glissants, la commande par modes glissants d'ordre supérieur et la commande par modes glissants floue. Enfin, Une étude comparative entre ces méthodes de commande sera réalisée.

Le dernier chapitre abordera le problème du bon choix des paramètres de synthèse des contrôleurs utilisés. Dans cette optique, trois algorithmes d'optimisation à base de population seront appliqués et comparés.

Nous terminerons ce travail par une conclusion générale qui résume l'ensemble des résultats obtenus, et les perspectives vers lesquelles nous pouvons orienter cette étude.



Chapitre I.

Généralités sur les
aérogénérateurs

Chapitre I

Généralités sur les Aérogénérateurs

I.1. Introduction

L'énergie éolienne a été exploitée depuis plus de 3000 ans, au début l'homme l'utilisait juste pour pomper l'eau, moudre les grains, et naviguer sur les mers. Au cours de l'évolution industrielle que l'Europe avait connue, l'utilisation de cette énergie était intensivement limitée, en revanche, la crise mondiale de pétrole survenue au début des années soixante-dix a ressuscité l'idée d'exploiter cette ressource gratuite, par conséquent le premier système éolien pour la génération d'électricité est apparu aux années quatre-vingt-dix.

I.2. Énergie électrique éolienne

L'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergie propre durables auxquels on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications des particuliers, des communautés et pour les applications nationales. L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable, elle est utilisée pour la production d'électricité depuis 100 ans. Les avantages que présente cette énergie la rendent très attractive vu les problèmes environnementaux qui peuvent être engendrés par d'autres sources d'énergie. De plus, elle rembourse sa dette énergétique, c'est-à-dire l'énergie nécessaire à sa fabrication, en neuf mois. Par contre, elle a un impact sur l'avifaune, le bruit et le paysage [1, 2].

I.2.1. Énergie éolienne dans le monde

Sur l'échelle mondiale, l'énergie éolienne maintient une croissance de plus de 10 % par ans, depuis une dizaine d'années. Le rapport annuel de l'année 2013 publié par le GWEC (Global Wind Energy Council) avoue l'énorme intérêt de l'énergie éolienne à travers le monde, en effet la puissance totale installée jusqu'à la fin de l'année 2013 était estimée à plus de 318 GW contre 293 GW pour l'année précédente, soit une croissance des investissements de 12.5 %. La production de l'énergie électrique était de 35.298 GW, la Chine est le leader avec 16 GW devant l'Allemagne et le Royaume-Uni. La figure I.1 montre la croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne à travers le monde.

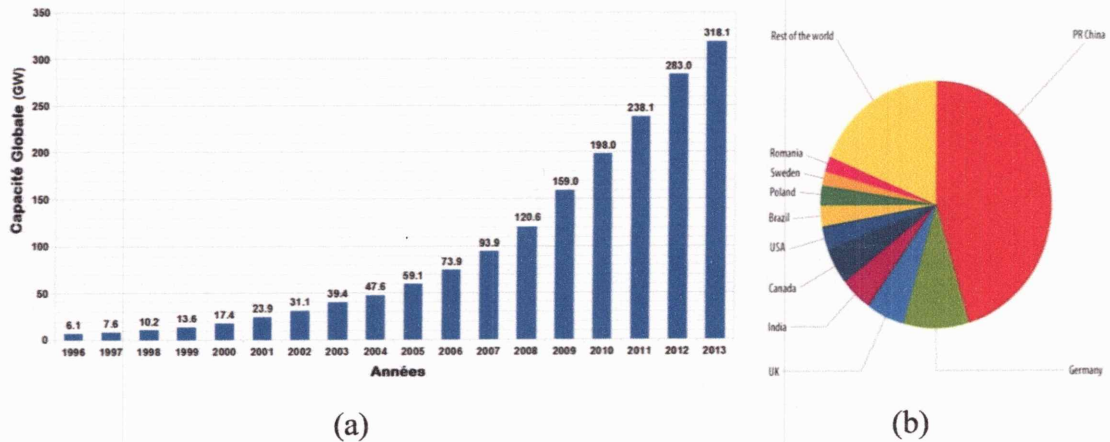


Figure I.1 : Statistiques Mondiales de GWPC en 2013 [3] : (a) Capacité éolienne installée en MW entre 1993 et 2013, (b) Les leaders mondiaux de l'énergie éolienne.

I.2.2. Énergie éolienne en Algérie

La carte du vent de l'Algérie est estimée à 10 m du sol [4]. Les vitesses moyennes annuelles varient de 2 à 6,5 m/s. La région centrale a des vitesses entre 3 et 4 m/s. La vitesse augmente en descendant vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu dans la région d'Adrar pour une valeur moyenne de 6,5 m/s. Cependant, il existe plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme à Tiaret, Tindouf et Oran. La figure I.2 montre ce potentiel en Algérie. Le programme d'énergie renouvelable Algérien était planifié comme suit :

- La période 2011-2013 : l'installation de la première ferme éolienne d'une puissance de 10 MW à Adrar, région choisie suite à l'observation par l'Office National de la Météorologie.
- Entre 2014 et 2015 : deux autres fermes de 20 MW chacune devraient être réalisées.
- La période entre 2016 et 2030 : des études seront menées pour détecter les emplacements favorables afin de réaliser d'autres projets pour une puissance d'environ 1 700 MW.

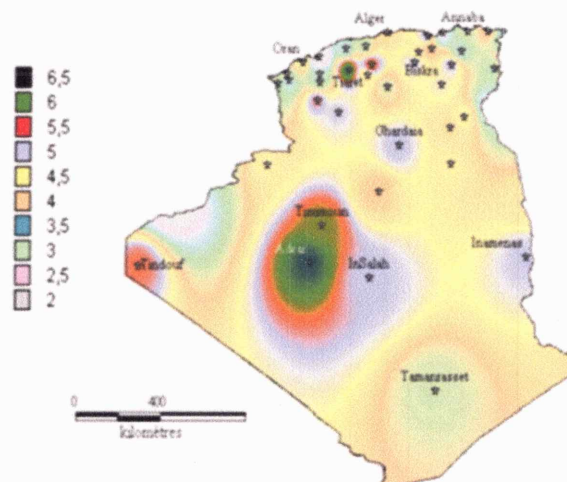


Figure I.2 : Carte préliminaire des vents en Algérie [4].

I.3. Aérogénérateur

Un aérogénérateur, couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [5]. La figure ci-dessous montre la conversion de l'énergie cinétique du vent en l'énergie électrique.

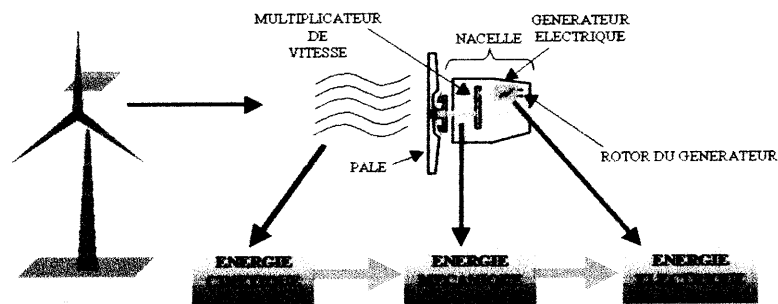


Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [5].

I.3.1. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor transformant l'énergie cinétique en celle mécanique. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée, soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par un générateur.

I.3.2. Différents types d'éoliennes

On peut classer les éoliennes selon plusieurs critères [6,7].

I.3.2.1. Selon l'axe de rotation

a. *Éoliennes à axe vertical* : les aérogénérateurs à axe vertical étaient les premières structures pour la production de l'énergie électrique. Selon leur caractéristique aérodynamique, on trouve ceux conçus sur la base de la portance (à rotor de Darrieus), et ceux basés sur la traînée (à rotor de Savonius).

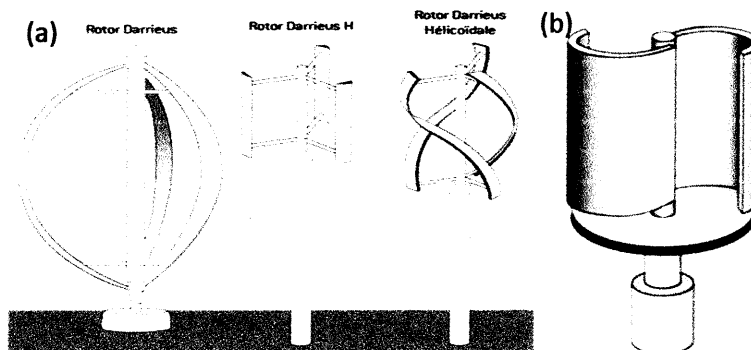


Figure I.4 : Éoliennes à axe vertical. (a) De type Darrieus. (b) De type Savonius.

b. *Éoliennes à axe horizontal* : Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées. Ils utilisent la force de portance du vent appliquée aux pales, de la même manière que les ailes d'un avion. Sur le plan aérodynamique à axe horizontal, on peut comparer les différents types de turbines selon leurs coefficients aérodynamiques de puissance en fonction de la vitesse normalisée.

- *Éoliennes à marche lente*

Les éoliennes à marche lente ont généralement entre 20 et 40 pales et elles ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre, leur rendement est faible, car leur vitesse en bout de pale est limitée.

- *Éoliennes à marche rapide*

Les éoliennes à marche rapide sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple, mais elle génère des vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faible, mais elle est plus compliquée et plus lourde.

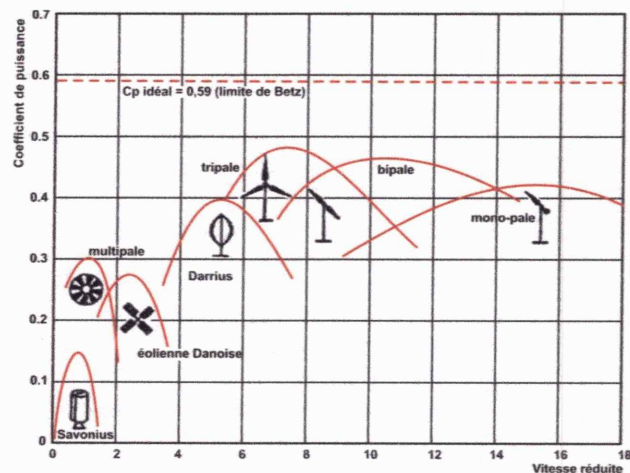


Figure I.5 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [7].

I.3.2.2. Selon la puissance nominale

À titre de comparaison, le tableau ci-dessous propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice [8].

Tableau I.1 : Classification des turbines éoliennes selon la puissance

Échelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1 MW
Grande	46 et plus	1 MW et plus

La figure I.6 illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes.

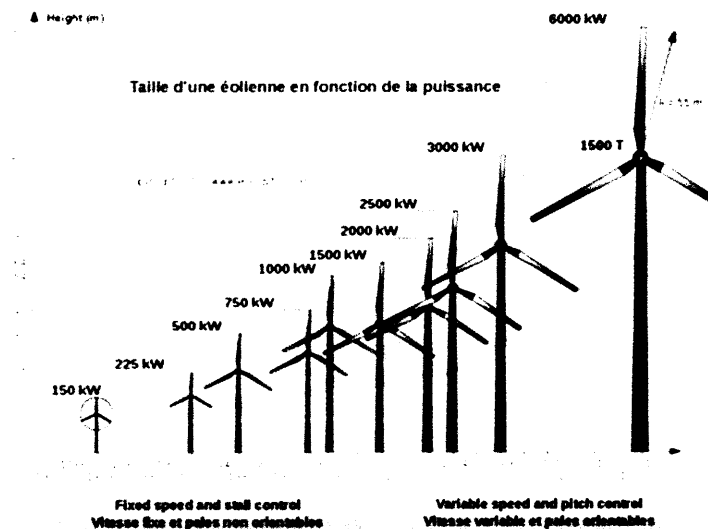


Figure I.6 : Correspondance taille-puissance des éoliennes [9].

I.3.2.3. Selon la vitesse de rotation

- Vitesse fixe

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

- Vitesse variable

Dans ce cas une interface de puissance adapte la fréquence des courants du générateur à celle réseau et permet ainsi de fonctionner à vitesse variable. Autrement dit, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine.

- Intérêt de la vitesse variable

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent est illustré sur la figure I.7. À partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si le générateur est entraîné à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de générateur en fonction de la vitesse du vent.

Le Tableau I.2 illustre un comparatif simple entre les différents fonctionnements.

Tableau I.2 : Comparatif Vitesse fixe vs vitesse variable.

Fonctionnement à vitesse fixe	Fonctionnement à vitesse variable
-Simplicité du système électrique	-Augmentation du rendement énergétique
-Plus grande fiabilité	-Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
-Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne.	-Réduction des efforts subis par le train de puissance.
-Moins cher.	-Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.
-Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse nominale)	

La courbe typique donnant la puissance aérodynamique d'un aérogénérateur, fonctionnant à vitesse variable, en fonction de la vitesse de vent est illustrée sur la figure (I.7).

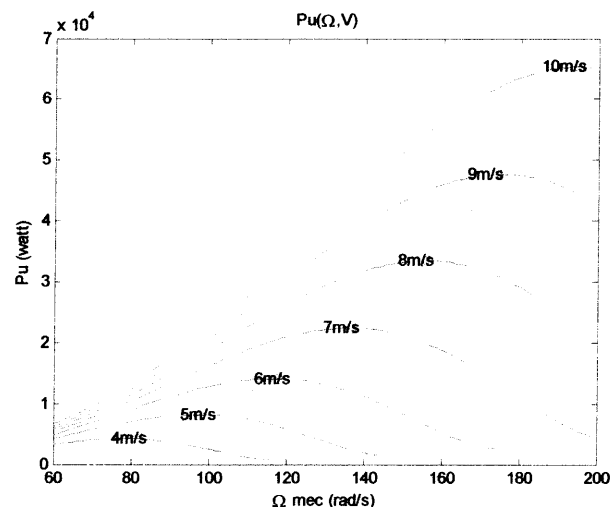


Figure I.7 : Puissance théorique disponible au niveau de la turbine éolienne.

I.4. Composition des éoliennes à axe horizontal

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : le mat, la nacelle et le rotor. Ces éléments peuvent être mécaniques et électriques, comme il est illustré dans la figure (I.8).

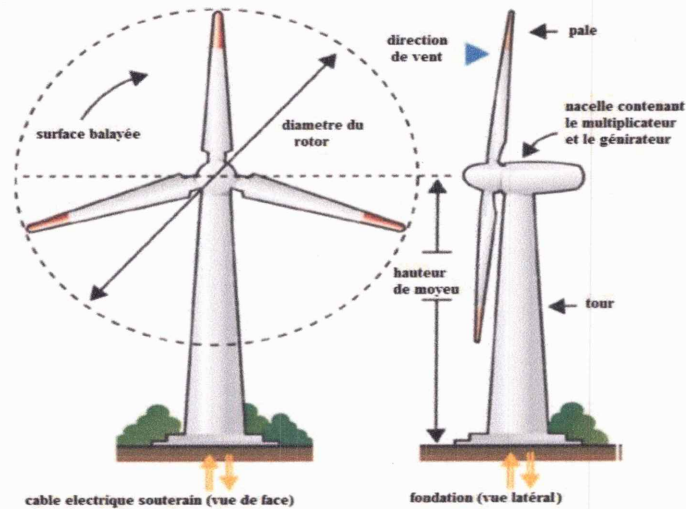


Figure 1.8 : Composants d'une éolienne.

I.4.1. Le mat ou la tour

C'est un tube d'acier ou de béton armé, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.

I.4.2. La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le générateur électrique à l'arbre de l'éolienne Figure (I.9).

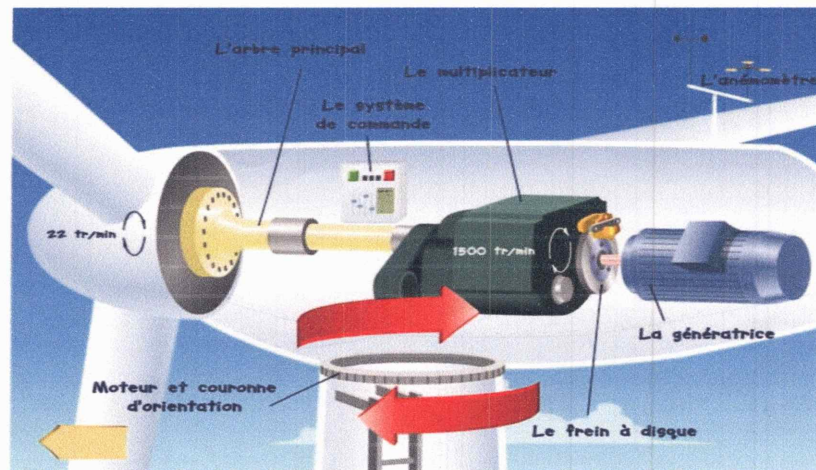


Figure 1.9 : Vue éclatée de la nacelle.

Elle comprend les éléments suivants :

- **Le multiplicateur** : sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de générateur électrique.
- **Le système de refroidissement** : se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir le générateur, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

- **La génératrice électrique** : c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné.
- **Le système de commande** : qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.
- **L'arbre** : qui relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Le système d'orientation des pâles** : qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique). En plus de ces éléments, la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

1.4.3. Le rotor

Le rotor transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est constitué des pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. [8]

1.5. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

1.5.1. Avantages de l'éolien

- C'est une énergie renouvelable, le vent est gratuit, à 100 % renouvelable.
- C'est une énergie dont l'utilisation ne pollue pas ni de gaz à effet de serre ni de production de déchets « déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire ».
- Les coûts d'installation ne sont pas très élevés.
- Les principes techniques sont simples, malgré que leur mise en application technologique est relativement complexe et perfectionnée.
- Utilisable dans tous les endroits fortement exposés aux vents.
- Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel moment les donnent l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires.

1.5.2. Inconvénients de l'éolien

- L'énergie change suivant la météo, la nature stochastique du vent a une influence sur la quantité de la puissance électrique produite.
- Le bruit : c'est le multiplicateur qui génère le bruit, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- Les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel.

1.6. Machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne

Nombreuses sont les machines électriques qui peuvent jouer le rôle de générateur dans un

système aérogénérateur. On décrit dans cette étude les principales caractéristiques technologiques liées aux aérogénérateurs. Les trois types des générateurs les plus utilisés dans l'industrie éolienne à vitesse variable sont les générateurs synchrones, les générateurs asynchrones et les GADA

I.6.1. Machine synchrone (MS)

Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien ont des puissances de 500 kW à 2 MW, et ils sont bien plus chers que les générateurs à induction de mêmes dimensions. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations de couple dans le train de puissance [10,11].

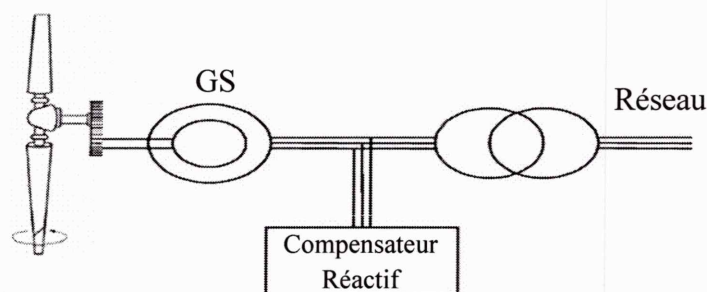


Figure I.10 : Éolienne basée sur la machine synchrone.

Le Tableau I.3 résume les principaux avantages et inconvénients des générateurs synchrones.

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients des générateurs synchrones.

Avantages	Inconvénients
-Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.	-Machine spécifique.
-Absence de boîte de vitesse.	-Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100 % de la puissance nominale.
-Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.	-Grand diamètre de la machine.

I.6.2. Machine asynchrone simple (MAS)

Le générateur asynchrone connecté au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de générateur ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne. La commande de l'onduleur permet de garder constante la tension du bus continu [6,10].

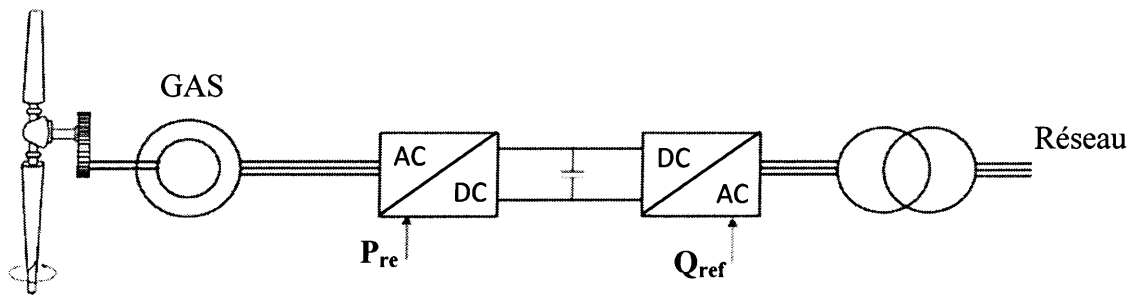


Figure I.11 : Éolienne à base de la machine asynchrone [10].

Le Tableau I.4 résume les principaux avantages et inconvénients des générateurs asynchrones.

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients des générateurs asynchrones.

Avantages	Inconvénients
- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.	-Électronique de puissance dimensionnée au moins à 100 % de la puissance nominale.

I.6.3. Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La MADA est une machine asynchrone à rotor bobiné dont le stator est directement connecté au réseau, le rotor, quant à lui, est connecté au réseau via deux convertisseurs, le premier permet la conversion des tensions du réseau en une tension continue (bus DC) avec une fréquence et une amplitude fixes. Le second permet la conversion de la tension continue en trois tensions alternatives variables en fréquence, en amplitude et en phase. Ces deux convertisseurs ont la particularité de pouvoir fonctionner dans les deux sens, c-à-d le transfert de puissance peut aussi bien se faire du rotor vers le réseau (Mode hyper-synchrone) ou du réseau vers le rotor (Mode hypo-synchrone) [12].

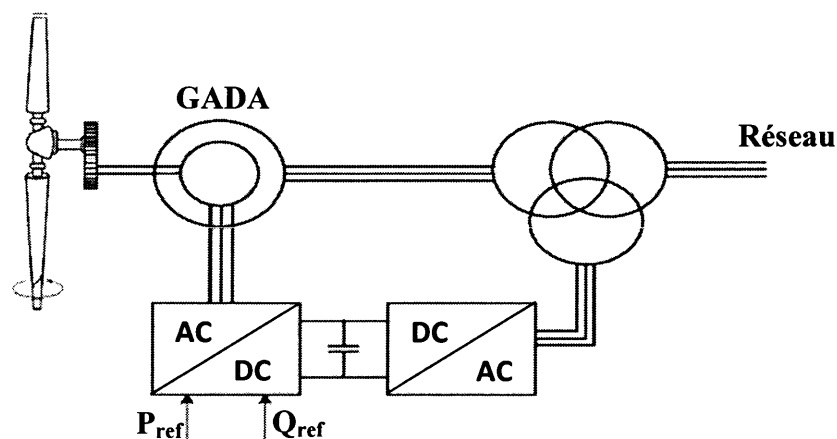


Figure I.12 : Éolienne utilisant la MADA.

Le Tableau I.5 résume les principaux avantages et inconvénients de l'utilisation de ce générateur.

Tableau I.5 : Avantages et inconvénients de la génératrice asynchrone double alimentation

Avantages	Inconvénients
-Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.	-Maintenance du multiplicateur.
-Électronique de puissance dimensionnée à 30 % de la puissance nominale.	-Commande complexe.
-Fonctionnement à vitesse variable (± 30 % de la vitesse nominale).	-Oscillations mécaniques.

- Mode de fonctionnement de MADA

Le système MADA permet de transférer la totalité de la puissance générée P_m par l'éolienne à travers le stator et le rotor. En sachant que la puissance transitée par le rotor est plus faible que celle transitée par le stator, il est évident que l'avantage de la MADA réside dans le fait qu'à puissance identique, le dimensionnement des convertisseurs de puissance sera moindre (environ 1/3 de la puissance de la machine) que dans un système direct (générateur synchrone-convertisseurs - réseau).

Étant donné que le champ rotorique d'une MADA peut tourner dans les deux sens grâce à la commande du convertisseur, la machine asynchrone peut produire de l'énergie dans deux modes de fonctionnements différents :

- Hypo-synchrone ($g > 0$)
- Hyper-synchrone ($g < 0$)

La Figure (I.13) montre les différentes configurations de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur, P_{res} est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_s la puissance transitant par le stator, P_r la puissance transitant par le rotor, et P_{mec} la puissance mécanique.

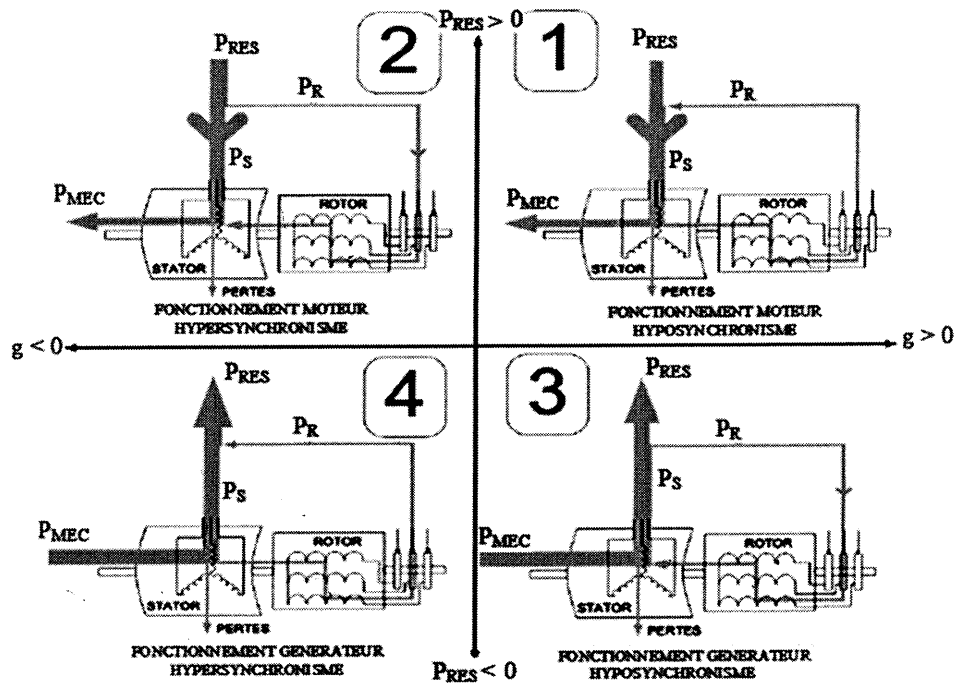


Figure I.13 : Différents modes de fonctionnement de la MADA.

- **Fonctionnement en mode moteur hypo synchrone**

La figure I.13 (1) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement transite par le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement moteur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique peut fonctionner ainsi, mais la puissance de glissement est alors dissipée en pertes Joule dans le rotor.

- **Fonctionnement en mode moteur hyper synchrone :**

La figure I.13 (2) montre que la puissance est fournie par le réseau au stator et la puissance de glissement est également fournie par le réseau au rotor. On a donc un fonctionnement moteur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce fonctionnement.

- **Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone**

La figure I.13. (3) montre que la puissance est fournie au réseau par le stator. La puissance de glissement est aussi fournie par le stator. On a donc un fonctionnement générateur en dessous de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.

- **Fonctionnement en mode générateur hyper synchrone**

La figure I.13. (4) montre que la puissance fournie au réseau par le stator et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau. On a donc un fonctionnement générateur au-dessus de la vitesse de synchronisme. La machine asynchrone à cage classique

peut avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

I.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne. Ainsi, différents types d'éoliennes avec leur mode de fonctionnement ont été montrés. Par la suite, les trois grandes familles de machines électriques utilisées dans la conversion électromécanique ont été présentées ; à savoir, la machine synchrone, la machine asynchrone et la machine asynchrone à double alimentation. Cette dernière constitue la troisième génération d'éoliennes.

Chapitre II.

Modélisation de la chaine de conversion d'énergie éolienne

Chapitre II

Modélisation de la chaîne de conversion d'énergie éolienne

II.1. Introduction

L'énergie éolienne utilise la turbine pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique [13], cette dernière est couplée avec une génératrice électrique pour convertir l'énergie mécanique produite par la turbine en énergie électrique, ce couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire, plusieurs machines sont disponibles sur le marché éolien à savoir : les génératrices à courant alternatif (synchrones et asynchrones), et les génératrices à courant continu.

II.2. Modélisation du convertisseur éolienne

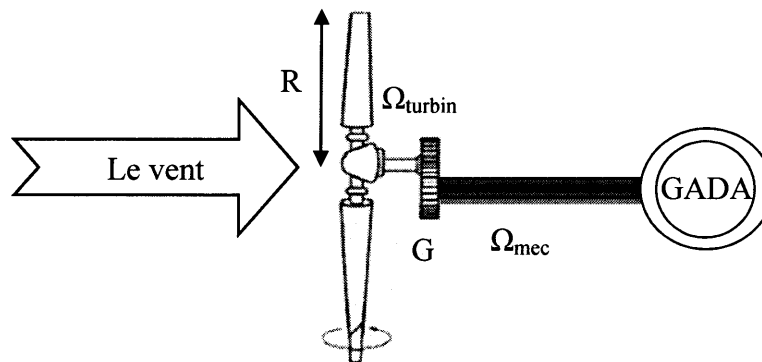


Figure II.1 : Schéma global du convertisseur éolien.

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du générateur électrique, du convertisseur de puissance et du système de commande

II.2.1. Modèle du vent

Source de vent : Le rayonnement solaire et la rotation de notre planète produisent des différences de températures et de pression sur la surface du globe qui se traduisent localement par la mise en mouvement de masses d'air, formant ainsi les vents.

Le vent est la variable d'entrée du système éolien. Sa mesure exacte à la hauteur du moyeu est assez complexe. Cependant, le vent peut être représenté par une grandeur stochastique définie par des paramètres statistiques. La modélisation du vent a déjà fait l'objet de nombreux travaux

et par conséquent, elle ne sera pas détaillée dans ce travail. La vitesse du vent est généralement représentée par une fonction scalaire qui évolue dans le temps.

La vitesse du vent peut être modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques [4] :

$$V(t) = A + \sum_{i=1}^n a_i \sin(b_i \omega_v t) \quad (\text{II.1})$$

Tel que :

A est la vitesse moyenne du vent est constante.

a_i et b_i, ω_v sont respectivement l'amplitude, la pulsation de l'échantillon du vent.

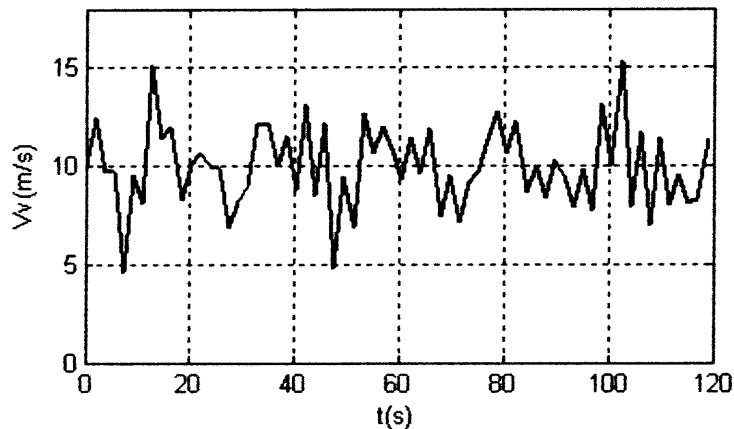


Figure II.2 : Profil de la vitesse du vent.

II.2.2. Loi de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par le physicien allemand Albert Betz en 1919. A. Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse V_1 et à l'infini en aval d'une vitesse V_2 .

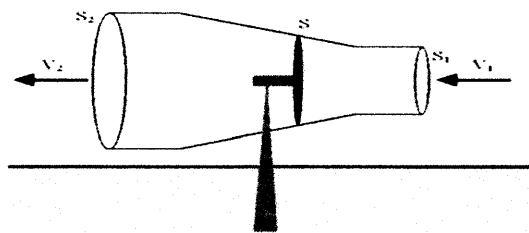


Figure II.3 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

En appliquant la conservation de masse au cas de la figure II.3 :

$$s_1 V_1 = sV = s_2 V_2 \quad (\text{II.2})$$

La force de portance au rotor de la turbine d'après le théorème d'EULER est donnée par :

$$F = \rho s_1 V_1 - \rho s_2 V_2 \quad (\text{II.3})$$

Telle que ρ est la densité de l'air (1.22 kg/m^3 à la pression atmosphérique à 15°C).

En tenant compte de l'équation (II.3), nous aurons

$$F = \rho s V (V_1 - V_2) \quad (\text{II.4})$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aéro} = FV = \rho s V^2 (V_1 - V_2) \quad (\text{II.5})$$

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit :

$$V = \frac{V_1 V_2}{2} \quad (\text{II.6})$$

On définit le facteur fractionnaire de diminution dans la vitesse du vent entre la position 1 et la position 0 par :

$$a = \frac{V_1 V}{V_1} \quad (\text{II.7})$$

En tenant compte de l'équation (II.6), l'équation (II.4) devient :

$$F = \frac{1}{2} \rho s V_1^2 4a(1 - a) \quad (\text{II.8})$$

La puissance extraite du vent par le rotor est le produit de la portance et la vitesse du vent au plan du rotor V .

$$P_{aéro} = FV = \frac{1}{2} \rho s V_1^3 4a(1 - a)^2 \quad (\text{II.9})$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P correspondante serait alors :

$$P = \frac{1}{2} \rho s V_1^3 \quad (\text{II.10})$$

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

$$C_p = \frac{P}{P_{aéro}} = 4a(1 - a)^2 \quad (\text{II.11})$$

La valeur théorique maximale de C_p est donnée par la limite de Betz, elle est obtenue en dérivant l'équation (II.11) par rapport à a :

$$\frac{dC_p}{da} = 3a^2 - 4a + 1 = 0 \Rightarrow a = \frac{1}{3} \quad (\text{II.12})$$

En remplaçant a dans l'équation (II.11) on trouve :

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \approx 0.593$$

C_p est appelé coefficient de puissance est sera détaillé par la suite de ce chapitre.

II.2.3. Modèle de la turbine

Considérons une turbine éolienne munie de pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G .

II.2.3.1. Modèle des pales

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par la relation suivante [13] :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S V^3 = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.13})$$

La puissance de la masse d'air qui traverse la surface équivalente à la surface active s de l'éolienne est donnée par la relation suivante [13] :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho S V^3 \quad (\text{II.14})$$

C_p : Le coefficient de puissance de la turbine éolienne, et sa valeur ne peut pas dépasser (16/27), la limite de Betz .

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent : [5,14].

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \quad (\text{II.15})$$

ou Ω_t est la vitesse de la turbine

Nous avons donc choisi de modéliser une éolienne de 7,5 kW pour notre étude. C'est un modèle tripale dont la longueur d'une pale est de 3 m et le gain de multiplicateur de 8. L'expression du coefficient de puissance a été approchée, pour ce type de turbine par une approximation gaussienne suivante [4]:

$$C_p(\lambda) = a * \exp(-((\lambda - b)/c)^2) \quad (\text{II.16})$$

avec : $a = 0.553$ (0.5483, 0.5577), $b = 6.224$ (6.198, 6.25), $c = 3.558$ (3.517, 3.599)

Ainsi, comme il est illustré dans la figure (II.3), le coefficient de puissance évolue en forme de cloche, le maximum de celle-ci ($C_p=0.553$) est atteint pour une valeur de la vitesse relative $\lambda = 6.2$. Avec cette valeur, la turbine fonctionne avec le rendement maximum théorique. Dans la suite de notre travail, une commande adaptée sera élaborée pour atteindre ce point de fonctionnement [1].

Connaissant la vitesse de la turbine, le couple aérodynamique est donc directement déterminé par [4]:

$$C_{aer} = \frac{P_t}{\Omega_{turbine}} = \frac{1}{2\Omega_{turbine}} C_p \rho S V^3 \quad (\text{II.17})$$

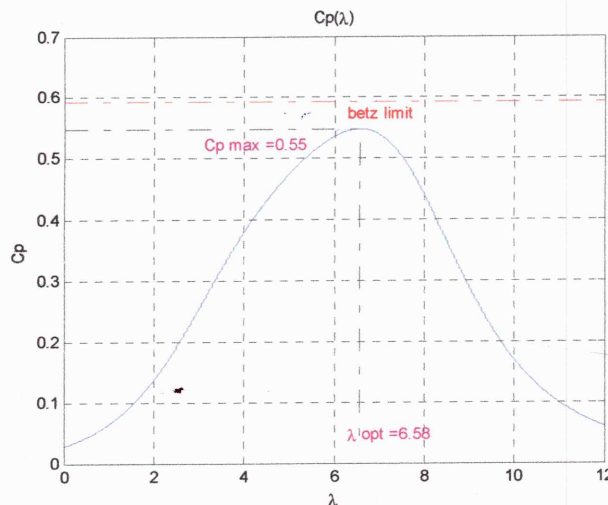


Figure II.4 : Evolution du coefficient de puissance C_p avec la variation de la vitesse spécifique λ .

II.2.3.2. Modèle du multiplicateur

Pour la modélisation du multiplicateur, nous avons supposé que l'élasticité et le frottement du multiplicateur ont été négligés ainsi que les pertes énergétiques [15].

Ce qui nous permet d'obtenir les relations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \tag{II.18}$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \tag{II.19}$$

Où

C_g : est l'effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice. G : est le gain du multiplicateur.

II.2.3.3. Équation mécanique de l'arbre

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprends la masse des pales et la masse du rotor de la turbine [14].

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_g \tag{II.20}$$

L'évolution de la vitesse mécanique Ω dépend du couple mécanique appliqué au rotor de la génératrice C_{mec} qui est la résultante d'un couple électromagnétique produit par la génératrice C_{em} d'un couple de frottement visqueux C_{vis} et d'un couple du multiplicateur de vitesse C_g .

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

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mec} \tag{II.21}$$

$$C_{mec} = C_g + C_{em} - C_{vis} \tag{II.22}$$

Le couple issu du frottement est modélisé par le coefficient de frottement visqueux f .

$$C_{vis} = f_r \Omega \quad (\text{II.23})$$

En remplaçant (II-10) et (II-12) dans (II-11), nous aurons

$$C_g + C_{em} = J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega \quad (\text{II.24})$$

II.3. Modélisation de la MADA

II.3.1. Présentation de la MADA

La première apparition de cette machine date de l'année 1899, il ne s'agit pas d'une nouvelle structure, mais d'un nouveau mode d'alimentation. La MADA est une machine asynchrone triphasée à rotor bobiné alimentée par ses deux armatures, elle présente un stator analogue à celui des machines triphasées classiques (asynchrone ou synchrone). Son rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne [16]. La figure (II.5) représente la structure de la machine asynchrone à double alimentation.

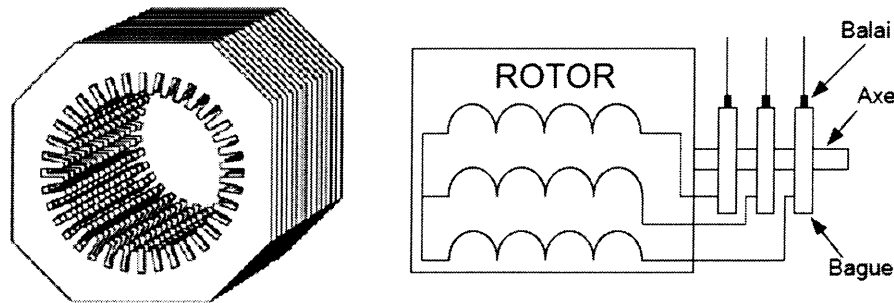


Figure II.5 : Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

Dans cette machine, les enroulements statoriques sont alimentés par le réseau et les enroulements rotoriques sont alimentés à travers un convertisseur de fréquence, ou bien les deux enroulements sont alimentés par deux onduleurs autonomes en général.

II.3.2. Principe de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation

Pour un fonctionnement normal de la machine asynchrone en régime établi, il faut que les vecteurs des forces magnétomotrices du stator et du rotor soient immobiles dans l'espace l'un par rapport à l'autre. Et du moment que le vecteur résultant de fmm des enroulements statoriques tourne dans l'espace avec une vitesse angulaire $\omega_s = 2\pi f$, et le rotor tourne avec la vitesse ω , alors pour que cette condition soit vérifiée, il faut que le vecteur des fmm des enroulements rotoriques tourne par rapport au rotor avec une vitesse $g\omega_s$ telle que :

$$\omega_s g = \omega_s - \omega \quad (\text{II.25})$$

où : g est le glissement.

Si la vitesse de la machine est inférieure à la vitesse de synchronisme ω_s , les sens de rotation des deux vecteurs sont identiques, dans le cas contraire, quand la vitesse est supérieure à la vitesse de synchronisme les sens seront opposés [16,17].

II.3.3. Modélisation de la machine à double alimentation (MADA)

II.3.3.1. Hypothèses simplificatrices

Pour l'étude de la génératrice asynchrone à double alimentation idéalisée, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [11, 18,19]:

- L'entrefer est d'épaisseur uniforme et l'effet d'encoche est négligeable.
- La force magnétomotrice est à une répartition spatiale sinusoïdale.
- La machine est à une construction symétrique.
- La saturation du circuit magnétique, l'hystérésis et les courants de Foucault sont négligeables.
- Les résistances des enroulements ne varient pas avec la température et on néglige l'effet de peau (effet pelliculaire).

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses, on peut citer :

- L'additivité des flux.
- La constance d'inductances propres.
- La loi de variation sinusoïdale des inductances mutuelles entre les enroulements du stator et du rotor en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.

II.3.3.2. Modèle effectif de la MADA

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

Les phases sont désignées par S_a, S_b, S_c pour le stator et R_a, R_b, R_c pour le rotor. L'angle électrique θ définit la position relative instantanée entre les axes magnétiques des phases statoriques et rotoriques. Elle peut être schématisée par la figure (II.6).

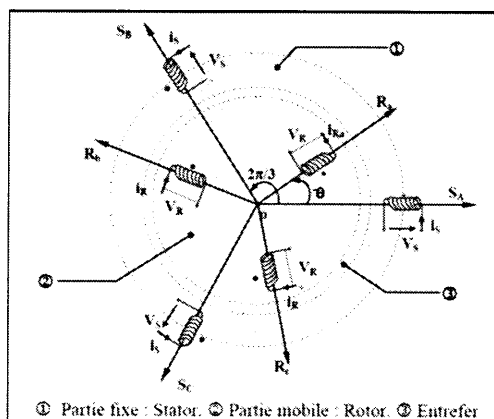


Figure II.6 : Représentation spatiale des enroulements de la MADA.

a. Équations électriques de la MADA

Les enroulements illustrés par la figure (II.6) obéissent aux équations électriques qui s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$\begin{cases} [V_{sabc}] = [R_{sabc}][I_{sabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{sabc}] \\ [V_{rabc}] = [R_{rabc}][I_{rabc}] + \frac{d}{dt} [\Phi_{rabc}] \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

Ou

R_s et R_r sont respectivement les résistances statoriques et rotoriques.

Les matrices suivantes représentent respectivement :

$[V_s] = [v_{as} v_{bs} v_{cs}]^T$: Le vecteur des tensions statoriques

$[I_s] = [i_{as} i_{bs} i_{cs}]^T$: Le vecteur des courants statoriques

On définit de même, par changement d'indices, les vecteurs rotoriques :

$[V_r] = [v_{ar} v_{br} v_{cr}]^T$: Le vecteur des tensions rotoriques

$[I_r] = [i_{ar} i_{br} i_{cr}]^T$: Le vecteur des courants rotoriques

Les équations des flux totalisés couplés avec les phases statoriques et rotoriques sont données par les expressions suivantes :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}][I_{sabc}] + [M_{sr}][I_{rabc}] \quad (\text{II.27})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][I_{rabc}] + [M_{rs}][I_{sabc}] \quad (\text{II.28})$$

L_{ss} est la matrice des inductances statoriques, elle est donnée par :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

L_{rr} est la matrice des inductances rotoriques, elle est donnée par :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

Et M_{sr} est la matrice des inductances mutuelles, entre le stator et le rotor, elle est donnée par [12]:

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

Avec : $[M_{sr}] = [M_{rs}]^T$

l_s (l_r) C'est l'inductance propre d'une phase statorique (rotorique).

M_s (M_r) C'est l'inductance mutuelle entre deux phases statoriques (rotorique).

M_{sr} C'est l'inductance mutuelle maximale entre une phase statorique et une phase rotorique.

En introduisant les équations (II.15) (II.16) dans l'équation (II.14) respectivement, on obtient :

$$\begin{cases} [V_s] = R_s [I_{sabc}] + L_{ss} \frac{d}{dt} (I_{sabc}) + \frac{d}{dt} (M_{sr} I_{rabc}) \\ [V_r] = R_r [I_{rabc}] + L_{rr} \frac{d}{dt} (I_{rabc}) + \frac{d}{dt} (M_{rs} I_{sabc}) \end{cases} \quad (\text{II.32})$$

b. Équations mathématiques de la MADA dans le repère (dq)

Pour passer du système triphasé abc , au système biphasé (dq) , (et réciproquement) il faut utiliser la transformation de Park. La transformation de Park constitue d'une transformation triphasée - biphasée, suivi d'une rotation. Elle permet de passer du repère (abc) vers le repère $(\alpha \beta)$ (transforme de Concordia), puis vers le repère (dq) . Le repère (ab) est fixe par rapport au repère (abc) , par contre le repère (dq) est mobile il forme avec le repère fixe (ab) un angle, appelé angle de la transformation de Park ou angle de Park. [18].

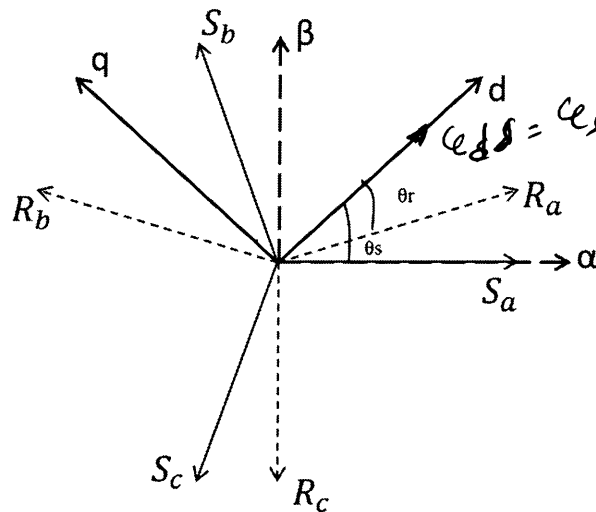


Figure II.7 : différents systèmes axe utilisés

L'angle θ donne la position du rotor par rapport au stator.

$$\begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} = [P_\theta] \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.33})$$

$$\begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix} = [P_\theta]^{-1} \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \\ x_h \end{bmatrix} \quad (\text{II.34})$$

Où

$x_a x_b x_c$ Sont les valeurs instantanées des grandeurs triphasées.

$x_d x_q$ Sont les valeurs instantanées des grandeurs biphasées.

x_h La composante homopolaire.

$[P_\theta]$ La matrice de la transformation de Park est définie comme suite :

$[P_\theta]^{-1}$ La matrice inverse de Park.

La matrice de Park est donnée par :

$$[P_\theta] = \sqrt{\frac{3}{2}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.35})$$

où : θ est l'angle entre l'axe d et l'axe de référence dans le système triphasé θ_s pour les grandeurs statoriques et θ_r pour les grandeurs rotoriques).

Les équations électriques de la MADA sont écrites dans le repère (dq).

- Tensions statoriques et rotoriques

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} - \omega_s \cdot \Phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

$$\begin{cases} v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - \omega_r \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{II.37})$$

avec : $\omega_s = \frac{d\theta_s}{dt}$ est la pulsation électrique statorique, $\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \omega_s - \omega$ est la pulsation électrique rotorique.

- Flux statorique et rotorique

$$\begin{cases} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \Phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.38})$$

- Équation mécanique

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - k_f \Omega \quad (\text{II.39})$$

avec l'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statoriques et courants rotoriques :

$$C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr}) \quad (\text{II.40})$$

À noter qu'en convention générateur le couple résistant C_r sera remplacé par le couple moteur C_g (issu du multiplicateur dans un système éolien) précédé d'un signe (+) dans l'équation (II.24) et le couple électromagnétique C_{em} sera précédé d'un signe (-).

Ainsi, le fonctionnement de la génératrice est régi par un système d'équations. La résolution analytique de ce système dans le repère (abc) est très difficile. Ce problème se simplifie en adaptant une transformation qui permet le passage d'un système triphasé à un système biphasé.

c. Modèle de la MADA sous forme d'état

Pour obtenir le modèle complet de la MADA, on remplace les expressions des flux dans les équations de tension. On obtient quatre équations électriques en fonction des composantes des

courants et/ou flux statoriques et rotoriques. L'association de l'équation mécanique aux quatre équations électriques donne le modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le repère de Park. En choisissant le vecteur d'état $X = (\Phi_{ds}, \Phi_{qs}, i_{dr}, i_{qr}, \Omega_r)^T$ et les grandeurs v_{dr} et v_{qr} comme entrées de commande, on obtient le modèle sous forme de représentation d'état :

$$\begin{cases} \frac{d\Phi_{ds}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{ds} + \omega_s \cdot \Phi_{qs} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{dr} + v_{ds} \\ \frac{d\Phi_{qs}}{dt} = -\alpha_s \cdot \Phi_{qs} - \omega_s \cdot \Phi_{ds} + \alpha_s \cdot M \cdot i_{qr} + v_{qs} \\ \frac{di_{dr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{ds} - \beta \cdot \omega \cdot \Phi_{qs} - \beta \cdot v_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot v_{dr} \\ \frac{di_{qr}}{dt} = -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \Phi_{qs} + \beta \cdot \omega \cdot \Phi_{ds} - \beta \cdot v_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot v_{qr} \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{C_{em}}{J} - \frac{1}{J} C_r - \frac{f_r}{J} \Omega \end{cases} \quad (II.41)$$

Par ailleurs, les puissances actives et réactives statoriques et rotoriques sont exprimées par [18] :

$$\text{Puissances statoriques : } \begin{cases} P_s = (v_{ds} i_{ds} + v_{qs} i_{qs}) \\ Q_s = (v_{qs} i_{ds} - v_{ds} i_{qs}) \end{cases} \quad (II.42)$$

$$\text{Puissances rotoriques : } \begin{cases} P_r = (v_{dr} i_{dr} + v_{qr} i_{qr}) \\ Q_r = (v_{qr} i_{dr} - v_{dr} i_{qr}) \end{cases} \quad (II.43)$$

$i_{ds} i_{qs}$ ($i_{dr} i_{qr}$) Les courants statoriques (rotoriques).

$v_{ds} v_{qs}$ ($v_{dr} v_{qr}$) Les tensions statoriques (rotoriques).

$\Phi_{ds} \Phi_{qr}$ Flux statoriques et rotoriques diphasés dans un repère tournant.

p Nombre de paires de pôles de la machine.

Ω Vitesse de rotation de la machine.

où $\omega = p\Omega$ est la vitesse angulaire électrique de rotation du rotor, et :

$$\alpha_s = \frac{R_s}{L_s}, \sigma_r = L_r \left(1 - \frac{M^2}{L_s L_r}\right), \beta = \frac{M}{\sigma_r L_s} \text{ et } \gamma_r = \left(\frac{R_r}{\sigma_r} + \frac{R_s M^2}{\sigma_r L_s^2}\right)$$

II.4. Simulation en boucle ouverte

Dans cette partie, nous présentons les résultats de simulation de la MADA en boucle ouverte, le stator étant directement connecté au réseau, tandis que, le rotor est alimenté par une source de tension à amplitude et fréquence variables.

II.4.1. Mode simple alimentation

Dans ce cas le rotor est court-circuité, donc la machine fonctionne en mode asynchrone simple (MAS).

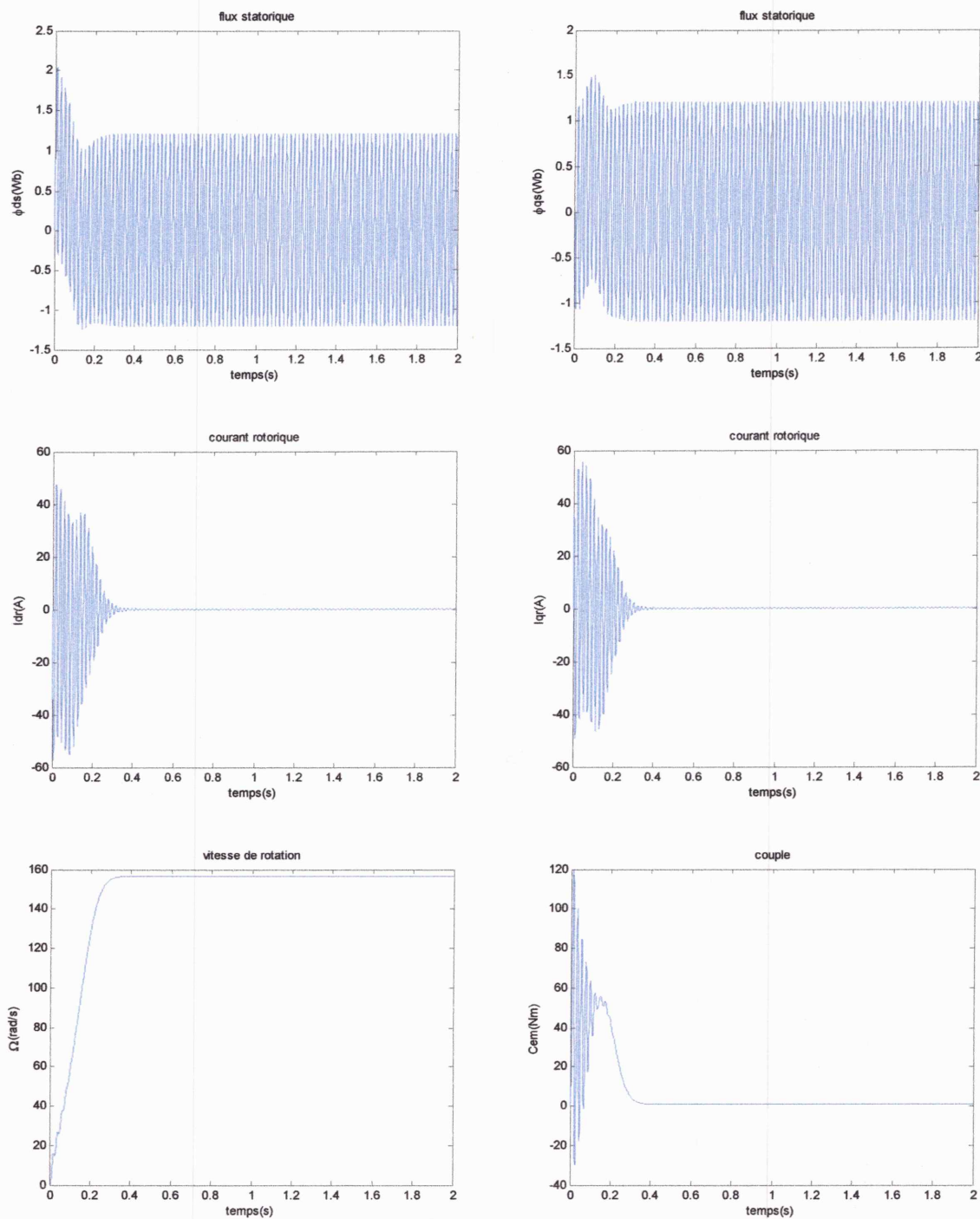


Figure II.8 : Réponses de la machine en mode simple alimentation (MAS) à vide.

Lors du démarrage à vide (Figure II.8), on constate un fort appel de courant qui peut atteindre cinq fois le courant nominal de la machine, en pratique, ce fait peut être la cause de destruction de la machine par un sur-échauffement en cas de répétitions excessives. Pendant le régime transitoire, le couple électromagnétique est fortement pulsatoire et peut atteindre 5 fois sa valeur nominale, c'est pourquoi en pratique, il faut toujours prévoir quelques mesures de démarrage. En régime établi, le courant prend sa valeur nominale, le couple électromagnétique tend vers une valeur qui compense les frottements. Quant à la vitesse de rotation, elle se stabilise à sa valeur

nominale qui est égale à 157 rad/s.

II.4.2. Mode double alimentation (MADA)

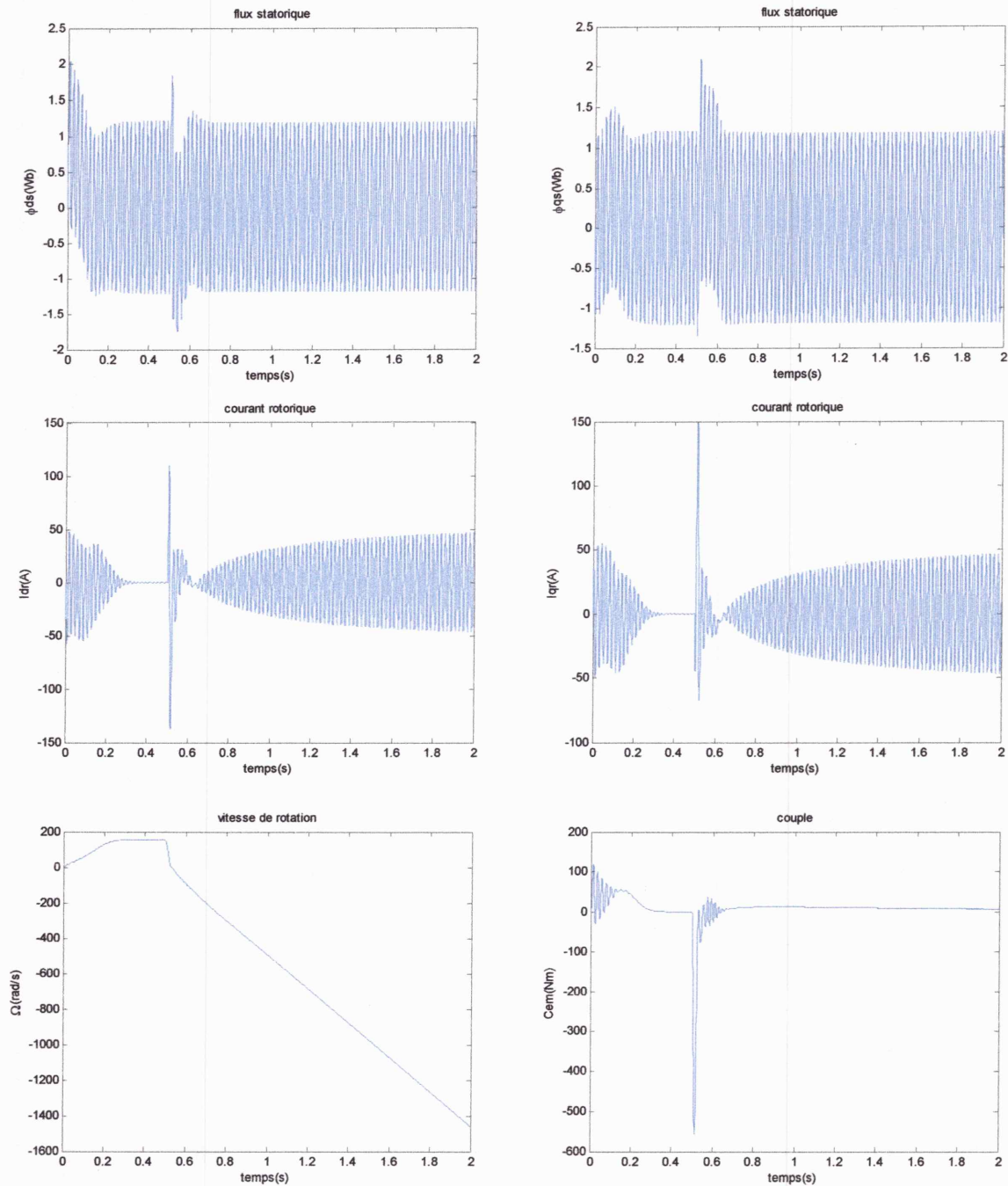


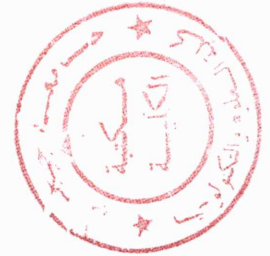
Figure II.9 : Réponses de la MADA avec tension de rotor 220 V et 50 Hz et $C_r=50$ N.m.

Dans ce cas, le rotor est alimenté avec une tension à amplitude et fréquence variables. Les résultats de simulation (Figure II.8) et (Figure II.9) montrent le caractère instable de la MADA en boucle ouverte.

II.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit les deux parties essentielles du système de conversion éolienne, à savoir, la partie mécanique qui contient la turbine, le multiplicateur et l'arbre de la MADA, et la partie électromécanique constituée de la MADA. En se basant sur quelques hypothèses simplificatrices, le modèle mathématique de la MADA a été établi. Nous avons constaté qu'il s'agit d'un système d'équations différentielles à coefficients variables, la transformation de Park nous a permis de simplifier ce modèle. Enfin, des résultats de simulation montrant le comportement instable de la MADA en boucle ouverte ont été présentés. D'où la nécessité à une commande en boucle fermée, ceci constitue l'objet du chapitre suivant.

Chapitre III.



Commande linéaire de
l'aérogénérateur

« Commande
vectorielle à base de
régulateurs PI »

Chapitre III

Commande linéaire de l'aérogénérateur

« Commande vectorielle à base de régulateurs PI »

III.1. Introduction

Une bonne commande des machines à courant alternatif à vitesse variable est assurée si nous garantissons un bon découplage entre ses grandeurs électromagnétiques. Ceci est réalisé par orientation de ces derniers dans un repère (d, q) tournant à la vitesse de rotation du champ tournant. Si cela est réalisé, nous pouvons rapprocher son comportement de celle d'un moteur à courant continu à excitation indépendante où nous retrouvons un découplage naturel entre le courant d'excitation qui crée le flux et le courant d'induit fournissant le couple électromagnétique nécessaire pour la faire tourner [20,21].

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

Dans cette optique, nous allons présenter une loi de commande pour la MADA basée sur l'orientation du flux statorique, utilisée pour la faire fonctionner en génératrice. Cette dernière met en évidence les relations entre les grandeurs statoriques et rotoriques. Ces relations vont permettre d'agir sur les signaux rotoriques en vue de contrôler l'échange de puissance active et réactive entre le stator de la machine et le réseau [22].

III.2. Stratégie de commande de la chaîne éolienne globale

La stratégie de commande des systèmes éoliens est généralement basée sur la courbe illustrée par la figure (III.1) qui est déduite des données aérodynamiques de l'éolienne [10]. Ainsi, on peut distinguer quatre zones :

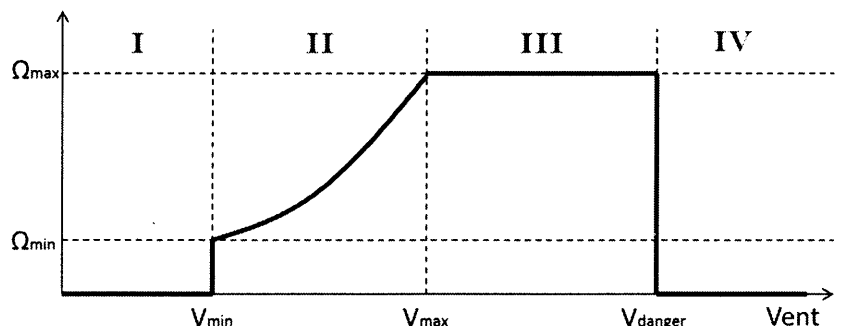


Figure III.1 : Loi de commande optimale d'une éolienne à vitesse variable.

Zone I : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.

Zone II : correspond aux vitesses moyennes dont le système de contrôle de l'aérogénérateur peut intervenir pour contrôler la puissance électrique à générer.

Zone III : la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance fournie reste égale à la puissance nominale.

Zone IV : la vitesse de vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux (90°).

III.2.1. Architecture du dispositif de commande

À noter que dans notre étude, on ne s'intéresse qu'au fonctionnement du système éolien dans la zone B. Le contrôle du système éolien est assuré par deux stratégies de régulation fortement liées [11] :

- **Boucle de régulation de vitesse (MPPT)** : L'objectif de commande étant de maximiser la production (la puissance active envoyée au réseau électrique), pour cela, la génératrice doit fonctionner à vitesse variable en suivant une caractéristique optimale, donc il faut établir une stratégie de commande permettant à la génératrice de tourner à une vitesse optimale (correspondant à un coefficient de puissance C_p maximal) donnant lieu à une production d'énergie optimale (maximum de puissance).

- **Boucle de régulation des puissances statorique (commande vectorielle)** : Cette boucle est elle-même constituée de deux boucles ; la première fournit la tension v_{qr} permettant de contrôler la puissance active P_S transmise au réseau électrique en contrôlant le courant i_{qr} . Quant à la deuxième boucle, elle calcule la tension v_{dr} permettant d'imposer une puissance réactive statorique Q_S nulle en régulant le courant i_{dr} à une référence i_{dr-ref} (correspondant à $Q_S = 0$)

III.3. Maximal Point Power Tracking

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maxima du coefficient de puissance comme montre la courbe de la figure (I.7). Ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une vitesse de rotation optimale Ω_{opt} pour que la valeur de λ donnée

$\lambda = \frac{R.v}{\Omega.G}$ soit égal à λ_{opt} . La résultante est alors donnée par :

$$\Omega_{opt} = \frac{\lambda_{opt}.v.G}{R} \quad (III.1)$$

λ_{opt} est considérée comme le maximum de la courbe $C_p(\lambda_{opt}) = C_{p_{max}}$ illustrée dans le chapitre précédent Dans la figure (III.2).

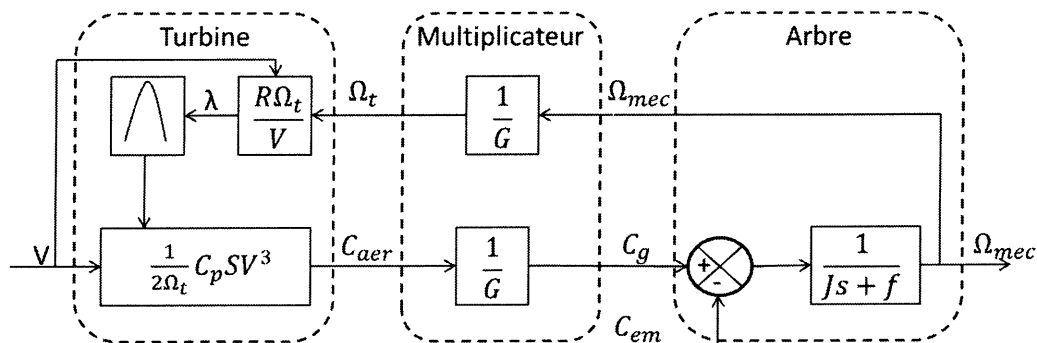


Figure III.2 : Principe de commande d'une éolienne à vitesse variable

Ce schéma fonctionnel obtenu en se servant des équations (II.15)-(II.24), décrit le fonctionnement de la turbine. La sortie qu'on veut commander dans ce système est la vitesse de rotation Ω_{mec} , voyant que les entrées de ce système sont le vent et le couple électromagnétique, mais le vent est une variable non-commandable (aléatoire), la seule entrée contrôlable étant le couple électromagnétique, ce qui pose un majeur problème dans la MADA, car son expression est non-linéaire $C_{em} = p \frac{M}{L_s} (\Phi_{qs} i_{dr} - \Phi_{ds} i_{qr})$. La solution de ce problème est résolue en appliquant la commande vectorielle.

- **Génération de couple de référence :**

D'après l'équation (II.24) peut écrire :

$$\frac{d\Omega_{mec}}{dt} = \frac{1}{j} (C_{em} - f\Omega_{mec} - e_v) \tag{III.2}$$

avec $e_v = c_g$

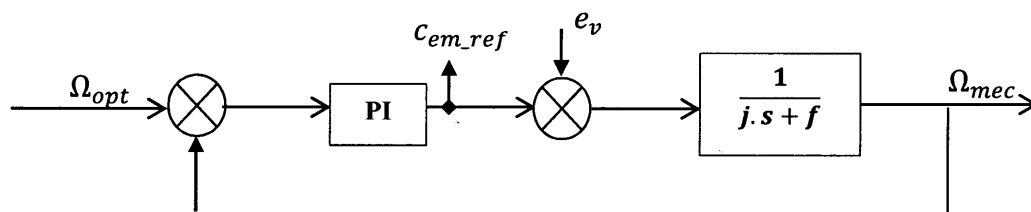


Figure III.3 : Schéma de régulation de vitesse.

III.4. Principe de la commande vectorielle

La commande par orientation de flux proposé par Blaschke, est une technique de commande classique pour l'entraînement des machines asynchrones [23]. L'idée fondamentale de cette méthode de commande est de ramener le comportement de la machine asynchrone à celui d'une machine à courant continu. Cette méthode se base sur la transformation des variables électriques

de la machine vers un référentiel qui tourne avec le vecteur du flux. Afin d'obtenir un contrôle analogue à celui de la machine à courant continu à excitation séparée, i_{dr} est analogue au courant d'excitation, tandis que le courant i_{qr} est analogue au courant d'induit. Par conséquent, les deux composantes i_{dr} et i_{qr} sont mutuellement découplées [21].

De nombreuses variétés de commandes ont été présentées dans la littérature, que l'on peut classer suivant la source d'énergie

- Commande en tension.
- Commande en courant.

Suivant l'orientation du repère.

- Le flux rotorique.
- Le flux statorique.
- Le flux d'entrefer.

Suivant la détermination de la position du flux

- Directe par mesure ou observation de vecteur flux (module, phase).
- Indirecte par contrôle de la fréquence du glissement.

Dans le cadre de ce mémoire, nous développons la commande vectorielle de la MADA avec orientation du repère (dq) suivant le flux statorique.

III.4.1. Choix du référentiel dq

Jusqu'ici, on a exprimé les équations et les grandeurs de la machine dans un repère d, q faisant un angle θ_s avec le stator et un angle θ_r avec le rotor, mais qui n'est pas défini par ailleurs, c'est-à-dire qu'il est libre.

Il existe trois choix importants : on peut fixer le référentiel (dq) :

- au stator ;
- au rotor ;
- au champ tournant.

III.4.2. Modèle de la MADA avec orientation du flux statorique

Dans ce cas les repaires (d, q) sur le stator

$$\theta_s = 0$$

$$\text{et } \theta_s = \theta + \theta_r \rightarrow \theta_r = -\theta$$

$$\frac{\theta_s}{dt} = 0, \frac{\theta_r}{dt} = -\frac{\theta}{dt} = -\omega_r \quad (\text{III.3})$$

On oriente le flux statorique selon l'axe d pour que la composante suivant l'axe q soit constamment nulle ($\phi_{qs} = 0, \phi_{ds} = \phi_s$).

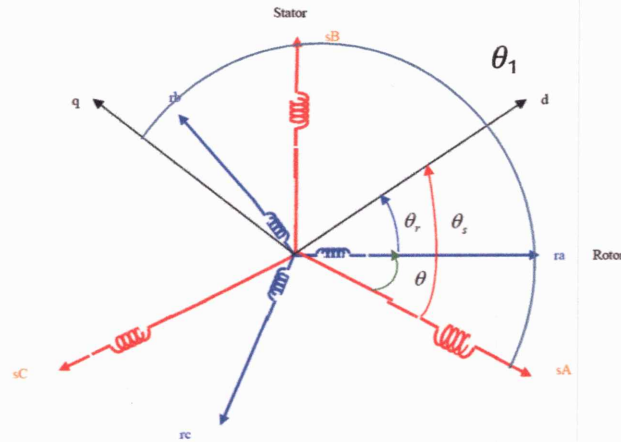


Figure III.4 : Orientation du repère dq.

Le stator est directement relié au réseau, alors l'angle électrique θ_s nécessaire aux transformations de PARK est calculé à partir de la mesure de la tension statorique :

$$\theta_s = \theta_1 - \frac{\pi}{2} \quad (\text{III.4})$$

Où $\theta_1 = \text{artg}\left(\frac{u_{s\beta}}{u_{s\alpha}}\right)$: est l'angle du vecteur tension statorique dans le repère stationnaire abc comme il est montré sur la figure (III.4).

Rappelons l'expression du couple électromagnétique :

$$C_{em} = \frac{PM}{L_s} (i_{dr}\Phi_{qs} - \Phi_{ds}i_{qr}) \Rightarrow C_{em} = -K(\Phi_s i_{qr}) \quad (\text{III.5})$$

où $K = \frac{PM}{L_s}$.

D'après l'équation (III.5) et pour Φ_s constant, le couple électromagnétique peut être contrôlé par le courant i_{qr} . Alors, la MADA peut prendre une forme similaire à celle de la machine à courant continu.

Pour faire l'orientation du flux statorique, on fait appel au modèle de la machine dans le repère de PARK selon les équations (II.36) et (II.37) [11,20] :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_s \cdot \Phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{qr} \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \cdot \Phi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.6})$$

On peut alors écrire (toujours dans l'hypothèse d'un flux statorique constant) :

$$v_{ds} = 0 \quad \text{et} \quad v_{qs} = v_s \quad (\text{III.7})$$

Nous pouvons simplifier les équations des tensions et des flux statoriques comme suit

$$\begin{cases} v_{ds} = 0 \\ v_{qs} = v_s = \omega_s \Phi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ 0 = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

À partir de l'équation (III.9), en écrire les équations liant les courants statoriques aux courants rotoriques :

$$\begin{cases} i_{ds} = -\frac{M}{L_s} i_{dr} + \frac{\phi_s}{L_s} \\ i_{qs} = -\frac{M}{L_s} i_{qr} \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

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

$$\phi_{dr} = \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \phi_{ds} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_s} \cdot \phi_{ds} \quad (\text{III.11})$$

$$\phi_{qr} = L_r \cdot i_{qr} - \frac{M^2}{L_s} \cdot i_{qr} = L_r \cdot \sigma \cdot i_{qr} \quad (\text{III.12})$$

σ : est le coefficient de dispersion entre les enroulements d et q :

$$\sigma = \left(1 - \frac{M^2}{L_s \cdot L_r} \right) \quad (\text{III.13})$$

En remplaçant les expressions des composantes directes et quadrature des courants statoriques (III.8) dans v_{ds}, v_{qs} (l'équation III.6), puis les expressions des composantes directes et quadratures des flux rotoriques (III.11) et (III.12) dans v_{dr}, v_{qr} (équations III.6), on obtient :

$$\begin{cases} v_{ds} = \frac{R_s}{L_s} \phi_{ds} - \frac{R_s}{L_s} M i_{dr} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} \\ v_{qs} = -\frac{R_s}{L_s} M i_{qr} + \omega_s \phi_{ds} \\ v_{dr} = R_r i_{dr} + L_r \sigma \frac{di_{dr}}{dt} + e_d \\ v_{qr} = R_r i_{qr} + L_r \sigma \frac{di_{qr}}{dt} + e_q \end{cases} \quad (\text{III.14})$$

Tel que :

$$e_d = -L_r \cdot (\omega_s - \omega) \cdot \sigma \cdot i_{qr} + \frac{M}{L_s} \frac{d\phi_{ds}}{dt} \quad (\text{III.15})$$

$$e_q = -L_r \cdot (\omega_s - \omega) \cdot \sigma \cdot i_{dr} + \frac{M}{L_r} (\omega_s - \omega) \cdot \phi_{ds} \quad (\text{III.16})$$

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

$$\begin{cases} \frac{di_{dr}}{dt} = \frac{1}{L_r \sigma} (v_{dr} - R_r i_{dr} - e_d) \\ \frac{di_{qr}}{dt} = \frac{1}{L_r \sigma} (v_{qr} - R_r i_{qr} - e_q) \end{cases} \quad (\text{III.17})$$

- Génération des courants rotoriques de référence :

Le couple électromagnétique étant proportionnel au courant rotorique d'axe q (d'après l'équation (III.16), nous pouvons donc établir une relation entre le courant i_{qr_ref} et le couple électromagnétique C_{em_ref} issu du bloc de contrôle MPPT, par :

$$i_{qr_ref} = - \frac{L_s}{pM\phi_{ds_ref}} C_{em_ref} \quad (III.18)$$

Dans un repère diphasé quelconque, les puissances active et réactive statoriques d'une machine asynchrone sont données par l'équation (II.43). Avec $v_{ds} = 0$, et en remplaçant i_{ds} et par i_{qs} leurs expressions, on obtient :

$$P_s = - v_{qs} \frac{M}{L_s} i_{qr} \quad (III.19)$$

$$Q_s = \left(\frac{v_{qs} \cdot \phi_{ds}}{L_s} - \frac{M}{L_s} v_{qs} i_{dr} \right) \quad (III.20)$$

Dans le cadre de cette étude, on veut la machine fonctionne avec un facteur de puissance unitaire du côté du stator, participant ainsi à la production totale de la puissance active P_s (puissance réactive Q_s nulle). Ce qui va permettre à partir de l'équation (III.8) et (III.20) de déduire la relation suivante :

$$0 = \frac{v_{qs} \cdot \phi_{ds}}{L_s} - \frac{M \cdot v_{qs} i_{dr}}{L_s} \quad (III.21)$$

$$i_{dr_ref} = \frac{\phi_{ds}}{M} \quad (III.22)$$

- **Génération des tensions rotoriques de référence :**

En supposant que le convertisseur est parfait ($v_{dr_ref} = v_{dr}$ et $v_{qr_ref} = v_{qr}$)

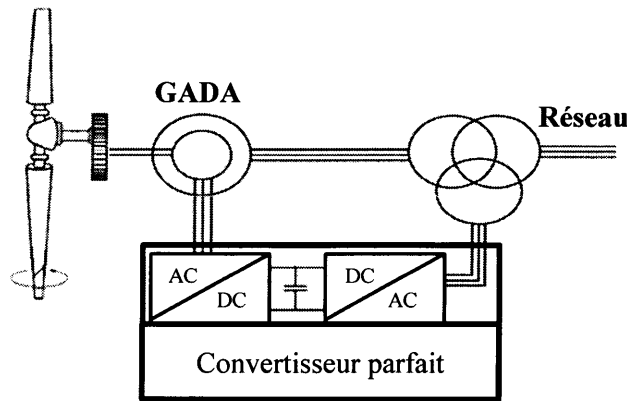


Figure III.5 : Alimentation parfaite de la GADA

D'après les équations (III.15, III.16, III.17), on peut représenter par ce schéma :

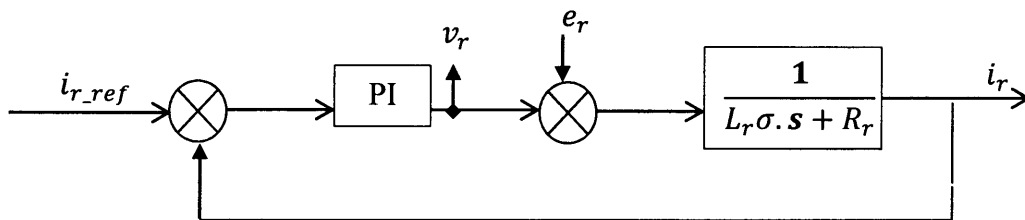


Figure III.6 : Schéma de régulation des courants

Avec : $i_{r_ref} = i_{qr_ref}$ ou i_{dr_ref} ; $i_r = i_{qr}$ ou i_{dr} ; $v_r = v_{qr}$ ou v_{dr} ; $e_r = e_q$ ou e_d .

Les tensions rotoriques sont les sorties des deux régulateurs PI.

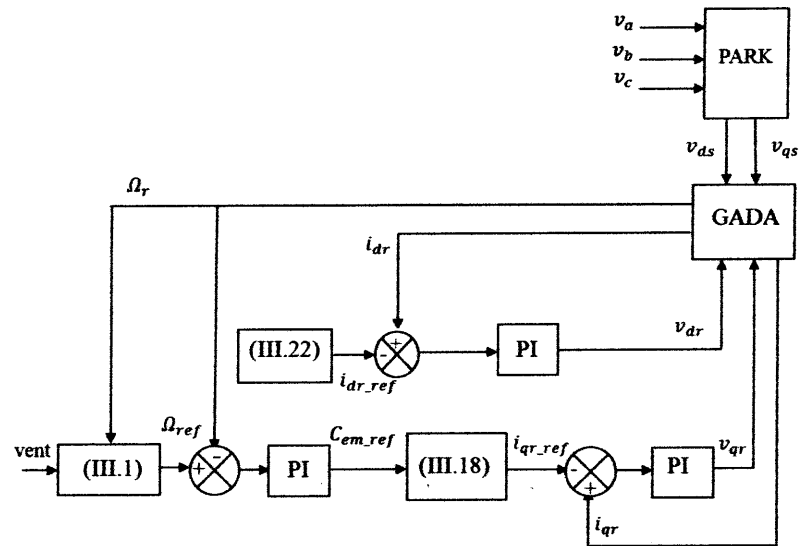


Figure III.7 : Principe de la commande du système éolien

La figure (III.7) montre le principe de la commande vectorielle et MPPT appliquée à l'aérogénérateur.

III.5. Résultats de simulation

L'ensemble du système éolien et sa commande ont été simulés en utilisant Matlab Simulink, en considérant une MADA de 7.5 KW ont les paramètres sont donnés en annexe A [24].

Nous présenterons dans cette section les résultats de commande du système éolienne avec la stratégie MPPT et la commande vectorielle.

Le modèle du vent est illustré sur la figure (III.8) le maximum du coefficient de puissance $C_{p_max}(\lambda) = 0.5479$ ce maximum est atteint pour une valeur optimale de $\lambda = 6.581$. Considérons la variation de vitesse de vent et gérée par l'équation suivante :

$$v(t) = 1.8(5 + 0.4 \sin(1.7t + 1) + 0.8\sin(0.5t + 1.5)) \tag{III.23}$$

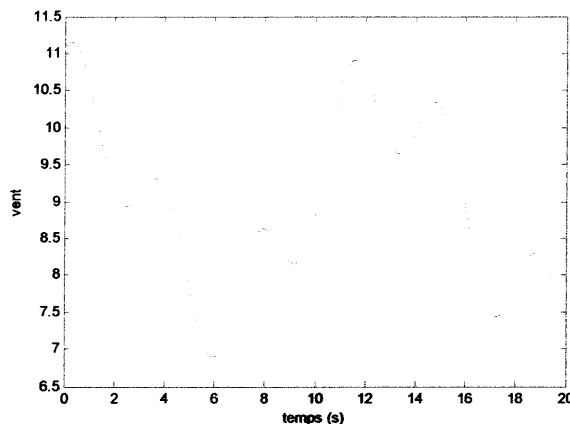


Figure III.8: Équation du vent utilisé dans la simulation

III.5.1. Test sous les conditions nominales

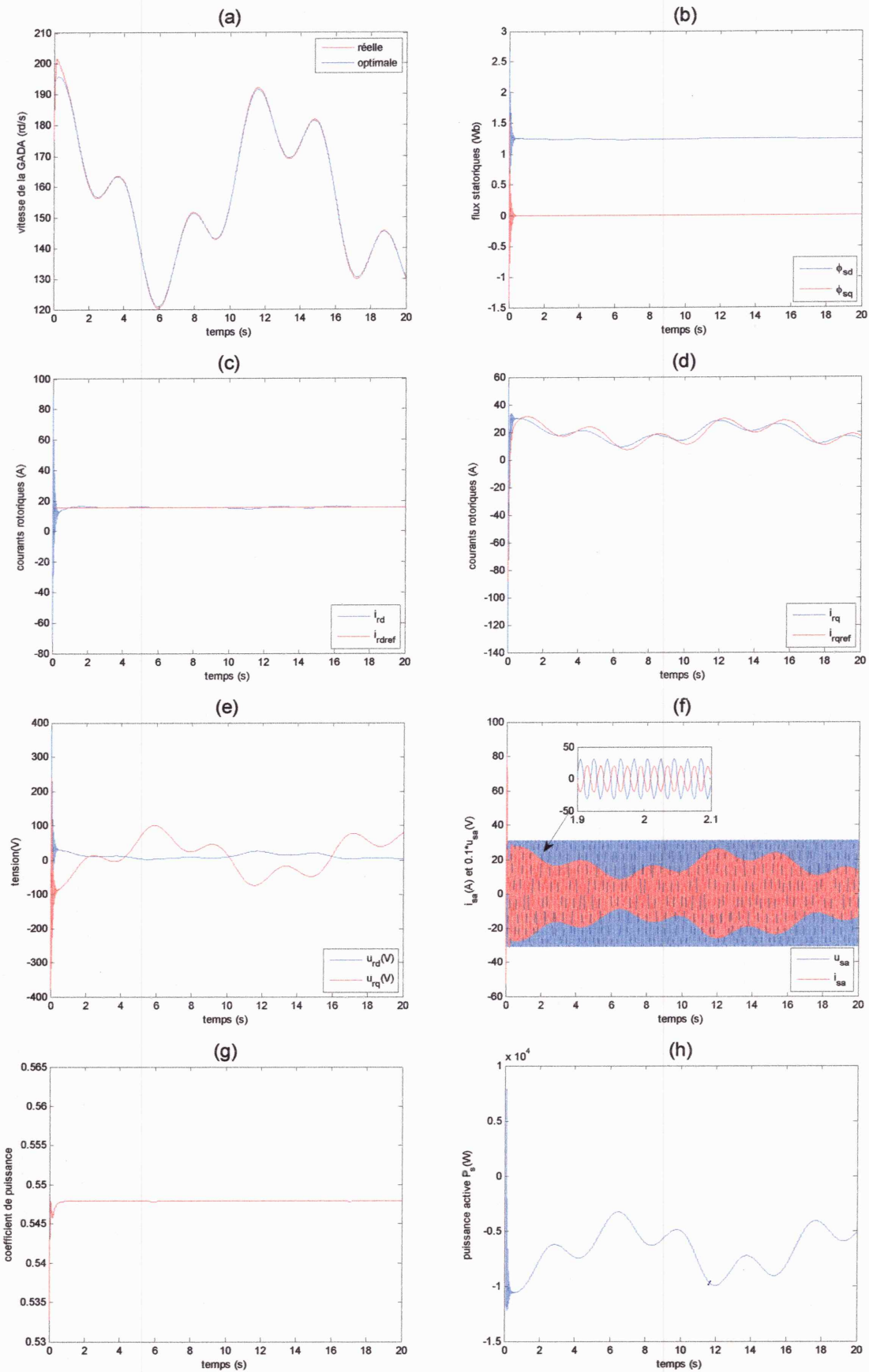


Figure III.9: Résultats de simulation de la commande vectorielle- test sous conditions nominales.

L'analyse des résultats obtenus se fait en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande, à savoir :

- Découplage (Orientation du flux statorique) ;
- Production de puissance maximale (MPPT);
- Production avec un facteur de puissance statorique unitaire ;
- Qualité des signaux de commande.

a/ Découplage

La figure (III.9.b) montre une bonne orientation du flux garantissant ainsi un bon découplage entre le flux et le couple de la MADA. Ceci rend le couple électromagnétique variable par action sur une seule variable, à savoir, le courant i_{qr} .

b/ Production de puissance maximale(MPPT)

La réalisation de cet objectif peut être vérifiée en regardant les réponses de la vitesse de rotation de la MADA figure (III.9.a) et la puissance active figure (III.9.h) ou bien l'évolution du coefficient de puissance C_p figure (III.9.c). On remarque que la vitesse de la génératrice suit parfaitement son profil optimal donnant lieu à une extraction maximale de la puissance (puissance active), ceci peut être également confirmé en regardant l'allure du coefficient de puissance C_p qui ne change pas beaucoup de valeur, il reste pratiquement égal à sa valeur de référence optimale 0.5483; Ceci confirme que le système éolien extrait le maximum de puissance.

c/ Production avec un facteur de puissance statorique unitaire

Le courant (statorique) délivré par le système éolien est en opposition de phase ($\varphi = 180$) par rapport à la tension réseau figure (III.9.f) Ceci confirme que le système éolien n'injecte que de la puissance active ($P_s = u_s i_s \cos\varphi = u_s i_s$) dans le réseau, donc une puissance réactive nulle ($Q_s = u_s i_s \sin\varphi = 0$).

d/ Qualité des signaux de commande

La figure (III.9.e) montre l'évolution des tensions rotorique (tension de commande de l'aérogénérateur) où on constate que ces tensions restent dans les limites tolérées par la MADA (ne dépassant pas leur valeur nominale).

e/ Fonctionnement en régime hyper-synchrone

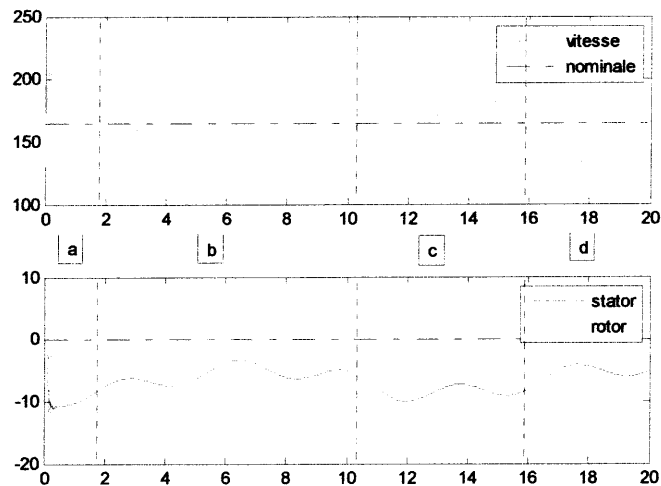


Figure III.10 : Puissance active du stator et du rotor en modes hypo/hyper-synchrone

La figure III.10 montre la possibilité du fonctionnement de l'aérogénérateur en mode hyper-synchrone (fonctionnement au-dessus de la vitesse du synchronisme 157rd/s). On remarque que :

- **En mode hypo-synchrone** : la puissance est fournie au réseau par le stator (puissance statorique P_s toujours de signe négatif). La puissance de glissement est aussi fournie par le stator (puissance rotorique P_r toujours de signe positif, donc le rotor consomme). À noter qu'avec une MAS, on ne peut pas avoir ce mode de fonctionnement.
- **En mode hyper-synchrone** la puissance est fournie au réseau par le stator (P_s négatif) et la puissance de glissement est récupérée via le rotor pour être réinjectée au réseau (P_r négatif, donc le rotor fournit aussi de la puissance au réseau). À noter qu'avec une MAS, on peut également avoir ce mode de fonctionnement, mais dans ce cas la puissance de glissement (P_r) est dissipée en pertes Joule dans le rotor.

III.5.2. Test de robustesse

Afin de tester la robustesse de la stratégie de commande adoptée dans ce chapitre, des changements paramétriques affectant la MADA vont être introduits au cours du processus de production.

- Paramètres électriques : variation de -30% de l'inductance mutuelle (M), variation de 30% des inductances propres (L_r et L_s), et variation de 50% des résistances (R_s et R_r) à $t = 2s$ jusqu'à $t = 4s$.
- Paramètres mécaniques : à l'instant $t = 7s$ jusqu'à $t = 10s$ une variation de 500% de coefficient de frottement (f_r) une variation de 300% de l'inertie (J).

- Paramètres du réseau : variation de 10% de la fréquence (f) introduite à $t=13s$ jusqu'à $t=15s$.

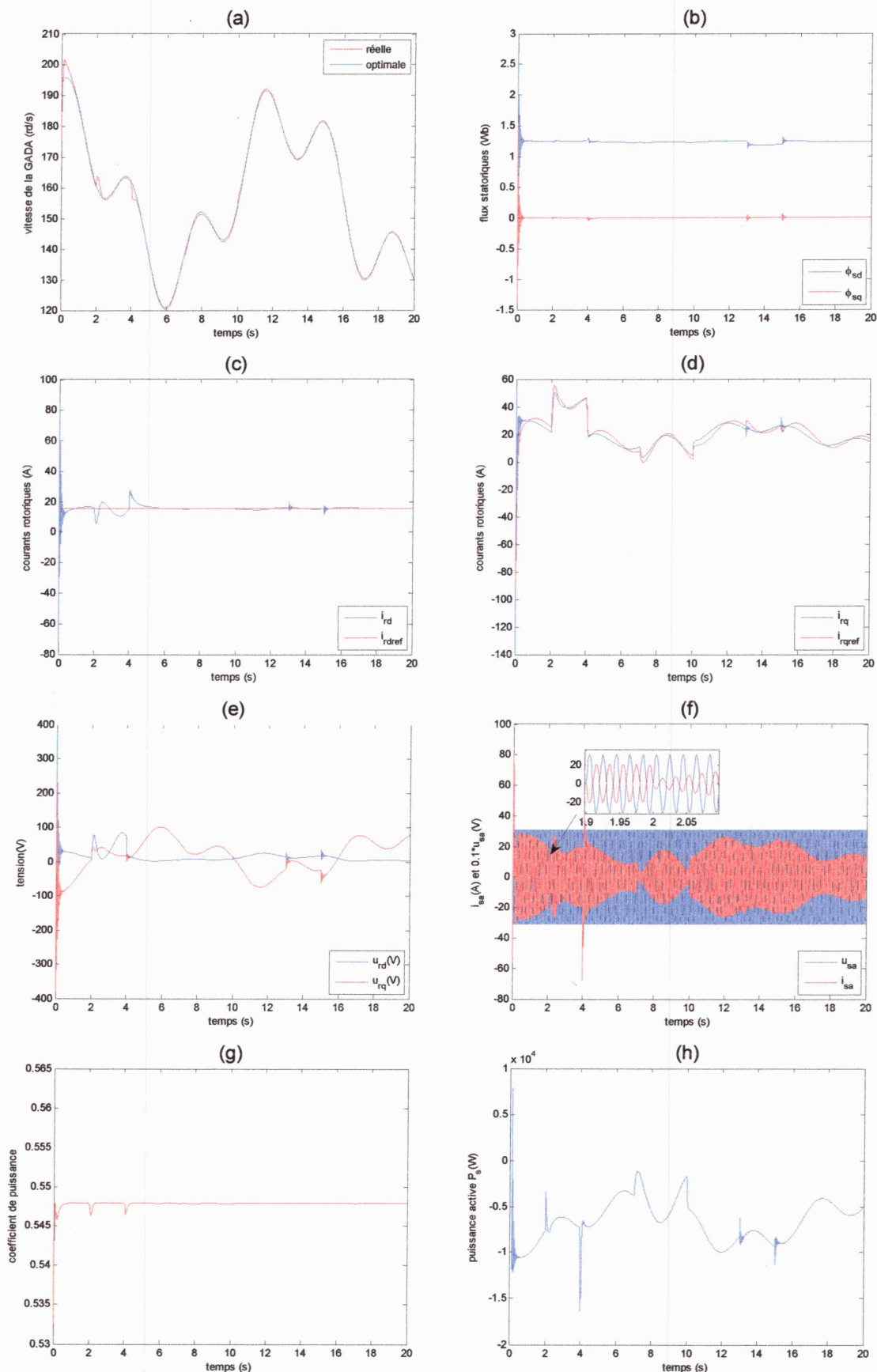


Figure III.11 : Résultat de simulation de la commande vectorielle –test de robustesse.

L'analyse des résultats obtenus se fait toujours en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande.

a/ Découplage

La figure (III.11.b) montrée que le découplage est affecté, toutefois on peut aller jusqu'à la perte complète du découplage si les variations paramétriques seront plus franches.

b/ Production de puissance maximale(MPPT)

La figure (III.11.a) montre une dégradation des performances en termes de poursuite de vitesse optimale, ceci aura une conséquence directe sur la puissance (active) injectée au réseau qui ne suit plus son profil optimal figure (III.11.h). La chute du coefficient de puissance figure (III.11.g) confirme également que durant la phase de perturbation, l'aérogénérateur ne fonctionne plus d'une façon optimale.

c/ Production avec un facteur de puissance statorique unitaire

En introduisant les perturbations paramétriques, on remarque que le courant (statorique) délivré par le système éolien ne reste plus en opposition de phase (donc $\varphi < 180$) par rapport à la tension réseau figure (III.11.f) Ceci confirme que le système éolien ne fonctionne plus avec un facteur de puissance unitaire, et par conséquent la puissance réactive (pertes) n'est plus égale à zéro.

d/ Qualité des signaux de commande

Sur la figure (III.11.e), on constate une augmentation de l'effort de commande (tensions rotoriques). Ceci est tout à fait normal, le contrôleur répond en essayant de compenser les perturbations. Toutefois, cette augmentation peut atteindre des taux non tolérables par la machine si les perturbations deviennent plus grandes.

III.6. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande linéaire d'un aérogénérateur à base de MADA. Dans un premier temps, le principe de la commande vectorielle de la MADA a été présenté, cette commande permet de contrôler la MADA d'une façon analogue à celle d'une machine à courant continu où le découplage est naturel. Ensuite, nous avons appliqué une stratégie de commande permettant à l'aérogénérateur d'extraire le maximum de puissance disponible dans le vent en réalisant un asservissement de vitesse de la MADA, il s'agit de la stratégie MPPT. L'étude réalisée en simulation a montré l'intérêt de la stratégie de commande linéaire adoptée, qui consiste en un asservissement de vitesse en utilisant la technique MPPT

associée à la commande vectorielle à base de régulateurs PI de la MADA.

Toutefois, en raison des conditions de fonctionnement stochastiques, et d'inévitables perturbations pouvant affecter l'aérogénérateur et en particulier la MADA, une telle stratégie se paye au prix d'un système aux performances appauvries, ceci a été clairement montré en simulation lors de l'application de différents types de perturbations. D'où le besoin à des stratégies de commande robuste et bien élaborée. Ce problème constitue l'objet du reste de ce cette étude.

Chapitre IV:
Commande non
linéaire de
l'aérogénérateur

Chapitre IV

Commande non linéaire de l'aérogénérateur

IV.1. Introduction

Dans la commande des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, les lois de commande classique peuvent être insuffisantes, car elles sont non robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques des systèmes sont strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non-linéarités. Dans ce cadre, plusieurs techniques de commande ont été élaborées dans la littérature et ont abouti à des résultats intéressants dont on cite la commande par mode glissant et la commande par logique floue.

IV.2. Stratégie de commande de l'aérogénérateur

La commande non linéaire de l'aérogénérateur a le même objectif que la commande linéaire, on cherche à extraire le maximum de puissance délivrée par le vent en respectant l'algorithme de MPPT et le principe de la commande vectorielle, mais cette fois-ci on remplace les régulateurs PI par des contrôleurs non-linéaires robustes dans le but de surmonter l'inconvénient des régulateurs PI en terme de sensibilité aux différents types de perturbations pouvant affectés l'aérogénérateur.

IV.3. Principe de la commande par modes glissants

La commande par modes glissants est une commande à structure variable pouvant changer de structure et commutant entre deux valeurs suivant une logique de commutation bien spécifique $S(x)$. Le principe de la commande par modes glissants est de contraindre le système à atteindre une surface donnée appelée surface de glissement et d'y demeurer jusqu'à l'équilibre. Cette commande se fait en deux étapes : la convergence vers la surface et ensuite le glissement le long de celle-ci.

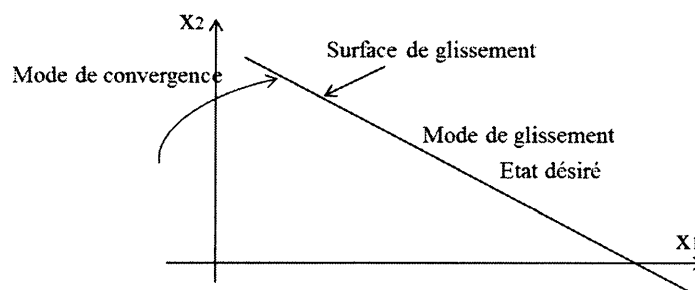


Figure IV.1 : Différents modes de convergence pour la trajectoire d'état.

IV.3.1. Synthèse de la loi de commande

- Choix de la surface de glissement
- Établir la condition de convergence.
- Déterminer la loi de commande qui permet d'atteindre la surface et d'y demeurer.

IV.3.1.1. Choix de la surface de glissement

Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante:

$$\begin{cases} \dot{x}^{(r)} = f(x, t) + g(x, t)u \\ y = S(x, t) \end{cases} \quad (\text{IV.1})$$

où f et g sont des fonctions non linéaires. r est le degré relatif du système, il présente le nombre de fois dont il faut dériver la surface pour faire apparaître la commande. u est l'entrée du système et x représente l'état du système.

Soit x_d la consigne désirée et e l'erreur de poursuite définie par : $e = x - x_d$ La formule générale de la surface de glissement est définie en fonction de l'ordre du système comme suit [28] :

$$S(x) = \left(\frac{d}{dt} + \lambda \right)^{n-1} e(x) \quad (\text{IV.2})$$

Où n est l'ordre du system [11,29], λ : est une constante positive.

IV.3.1.2. Condition d'existence du mode de glissement

Le choix de la fonction de glissement étant fait, la deuxième étape consiste à concevoir une loi de commande qui puisse amener le vecteur d'état à converger vers la surface et y demeurer ($S = 0$). Pour cela, il faut que la loi de commande soit conçue de telle manière à ce que S soit attractive. Pour déterminer la condition d'attractivité, considérons la fonction de Lyapounov suivante [30] :

$$v(S) = \frac{1}{2} S^2 \quad (\text{IV.3})$$

Une condition nécessaire et suffisante, appelée condition d'attractivité, pour qu'une variable de glissement $S(x, t)$ tende vers 0 est que la dérivée temporelle de v soit définie négative [30] :

$$S \cdot \dot{S} \leq 0 \quad (\text{IV.4})$$

Cette équation montre que le carré de la distance vers la surface, mesuré par S^2 ; diminue tout le temps, contraignant la trajectoire du système à se diriger vers la surface des deux côtés. Cette condition suppose un régime glissant idéal.

IV.3.1.3. Calcul de la commande

L'objectif de la loi de commande est de contraindre les trajectoires d'état du système à atteindre et ensuite à rester sur la surface de glissement malgré la présence d'incertitudes sur le système. En d'autres termes, la loi de commande doit rendre la surface de glissement localement attractive (c.à.d. au voisinage de la surface de glissement, toutes les trajectoires du système doivent être dirigées vers elle). Ainsi, la loi de commande doit être calculée en vérifiant une condition assurant la stabilité de $S(x, t) = 0$. Une telle condition est appelée condition d'attractivité.

L'algorithme de commande est défini par la relation

$$u = u_{eq} + u_n \quad (IV.5)$$

ou
$$u_n = -K \text{sign}(S(X))$$

avec : u est grandeur de commande, u_{eq} est la grandeur de commande équivalente, u_n est le terme discontinu de la commande, sign est la fonction $\text{sign}(\cdot)$, K constante positive. [11]

$$\text{sign}(S) = \begin{cases} 1 & \text{si } S > 0 \\ 0 & \text{si } S = 0 \\ -1 & \text{si } S < 0 \end{cases} \quad (IV.6)$$

IV.3.2. Application de la commande par modes glissants à la MADA

Dans notre cas, le stator de la MADA est connecté directement à un réseau stable. Alors, considérons le modèle réduit d'ordre 2 de la MADA constitué par les équations rotoriques auxquelles nous ajoutons un terme représentant les incertitudes du modèle :

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x) + G(x)u + \Delta(x) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (IV.7)$$

$$F(x) = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot \omega \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot \widehat{v}_{ds} \\ -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} + \beta \cdot \omega \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot \widehat{v}_{qs} \end{pmatrix} \quad (IV.8)$$

avec : $x = [i_{dr} \ i_{qr}]^T$, $G(x) = \text{diag}[g_1(x), g_2(x)] = \text{diag}\left[\frac{1}{\sigma_r}, \frac{1}{\sigma_r}\right]$, $u = \begin{bmatrix} v_{dr} \\ v_{qr} \end{bmatrix}$

$\Delta(x) = [\Delta_1(x) \ \Delta_2(x)]^T$ incertitudes sur le système supposées bornées ($|\Delta(x)| \leq \bar{\Delta}$).

Les variables à contrôler sont les courants i_{dr} , i_{qr} donc :

$$y(x) = \begin{pmatrix} h_1(x) \\ h_2(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix} \quad (IV.9)$$

D'après l'étude théorique, le choix des surfaces est comme suite :

$$S_1 = e_1, \quad S_2 = e_2 \quad (IV.10)$$

où : $e_1 = i_{dr} - i_{dr_{ref}}$, $e_2 = i_{qr} - i_{qr_{ref}}$

Les dérivées des deux surfaces sont données par :

$$\dot{S}_1 = \left(\frac{di_{dr}}{dt} - \frac{di_{dr_{ref}}}{dt} \right) \quad (IV.11)$$

$$\dot{S}_2 = \left(\frac{di_{qr}}{dt} - \frac{di_{qr_{ref}}}{dt} \right) \quad (IV.12)$$

On garde les objectifs de commande montrés dans le chapitre précédent relatif à la commande vectorielle, c-à-d que :

$$i_{dr_{ref}} = \frac{\phi_{ds_{ref}}}{M} = \text{constante} \quad (IV.13)$$

$$i_{qr_{ref}} = - \frac{L_s}{pM\phi_{ds_{ref}}} C_{em_{ref}} \quad (IV.14)$$

En remplaçant les expressions de $\left(\frac{di_{dr}}{dt}\right)$ et $\left(\frac{di_{qr}}{dt}\right)$ dans (IV.12) et (IV.13), on aura :

$$\begin{cases} \dot{S}_1 = \left(-\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot \omega \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot V_{ds} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot v_{dr} - V_1 \right) + \Delta_3 \\ \dot{S}_2 = \left(-\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} + \beta \cdot \omega \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot V_{qs} + \frac{1}{\sigma_r} \cdot v_{qr} - V_2 \right) + \Delta_4 \end{cases} \quad (IV.15)$$

Les incertitudes sont supposées bornées comme suit :

$$|\Delta_1| < \bar{\Delta}_1 \text{ et } |\Delta_2| < \bar{\Delta}_2$$

$$\text{Prenons : } V = \begin{pmatrix} V_1 \\ V_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ \frac{di_{qr_{ref}}}{dt} \end{pmatrix}$$

Les surfaces peuvent s'écrire sous la forme matricielle suivante :

$$\dot{S} = F(x) + \Delta(x) + V + G(x)u \quad (IV.16)$$

$$\text{avec : } S = (S_1 \ S_2)^T, u = (v_{dr} \ v_{qr})^T, F(x) = (f_1(x) \ f_2(x))^T, G(x) = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sigma_r} & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sigma_r} \end{pmatrix}$$

Comme il a été vu précédemment, la surface de glissement se détermine en fonction du système et des performances désirées, indépendamment de la commande, et l'obtention du régime glissant supposerait la commande discontinue. De ce fait, si cette commande est indispensable, elle l'empêche nullement, au contraire, qu'une partie continue lui soit adjointe pour diminuer l'amplitude de la discontinuité. Par conséquent, la structure d'un contrôleur comporte deux parties *matrice inverse des conditions de commande*

$$\begin{cases} u_{eq} = -g^{-1}(x)(f(x) + V(x)) \\ u_n = -g^{-1}(x)(K_0 S(x) + K_1 \text{sign}(s(x))) \end{cases} \quad (IV.17)$$

La condition nécessaire pour l'existence de la commande équivalente est donnée par :

$$\frac{dS}{dx} g(x, t) \neq 0 \quad (IV.18)$$

Maintenant, il faut trouver les conditions pour garantir l'attractivité des surfaces et leur convergence vers zéro. Pour cela, on définit la fonction de Lyapunov suivante :

$$V = \frac{1}{2} S^T S \quad (IV.19)$$

avec :

$$\dot{V} = S^T \dot{S} \quad (\text{IV.20})$$

En remplaçant (IV.17) dans (IV.20), on trouve :

$$\dot{V} = S^T (F(x) + \Delta(x) + V + G(x)u) \quad (\text{IV.21})$$

Ou encore :

$$\dot{V} = S^T (F(x) + V + G(x)u) + S_1 \Delta_1 + S_2 \Delta_2 \quad (\text{IV.22})$$

alors :

$$\dot{V} \leq S^T (F(x) + G(x)u) + |S_1| |\Delta_1| + |S_2| |\Delta_2| \quad (\text{IV.23})$$

$$\dot{V} \leq S^T (F(x) + G(x)u) + |S_1| \bar{\Delta}_1 + |S_2| \bar{\Delta}_2 \quad (\text{IV.24})$$

La loi de commande de la forme suivante :

$$u = -G(x)^{-1} (F(x) + V + k_0 S + k_1 \text{sign}(S)) \quad (\text{IV.25})$$

avec : $k_0 = \text{diag}[k_{01} \ k_{02}]$, $k_1 = \text{diag}[k_{11} \ k_{12}]$, $\text{sing}(S) = [\text{sign}(S_1) \ \text{sign}(S_2)]^T$

Pour assurer que S converge asymptotiquement vers zéro et se maintient dans son voisinage, les gains k_{11} , k_{12} , k_{01} , k_{02} doivent satisfaire les inégalités suivantes :

$$k_{11} \geq \gamma_1 + \bar{\Delta}_1, \quad k_{12} \geq \gamma_2 + \bar{\Delta}_2 \quad \text{et} \quad k_{01} > 0, \quad k_{02} > 0 \quad \text{avec} \quad \gamma_1, \gamma_2 > 0.$$

IV.3.3. Résultat de simulation

Pour tester la robustesse de la commande par modes glissants et pouvoir comparer les résultats avec celles obtenues en appliquant la commande vectorielle à base de PI classiques, on considère le même profil de vent utilisé dans le chapitre précédent, tout en gardant les mêmes conditions de fonctionnement (perturbations).

- Paramètres électriques : variation de -30 % de l'inductance mutuelle (M), variation de 30 % des inductances propres (L_r et L_s), et variation de 50 % des résistances (R_s et R_r) à $t=2s$ jusqu'à $t=4s$.
- Paramètres mécaniques : à l'instant $t=7s$ jusqu'à $t=10s$ une variation de 500 % de coefficient de frottement (f_r) une variation de 300 % de l'inertie (J).
- Paramètres du réseau : variation de 10% de la fréquence (f) introduite à $t=13s$ jusqu'à $t=15s$.

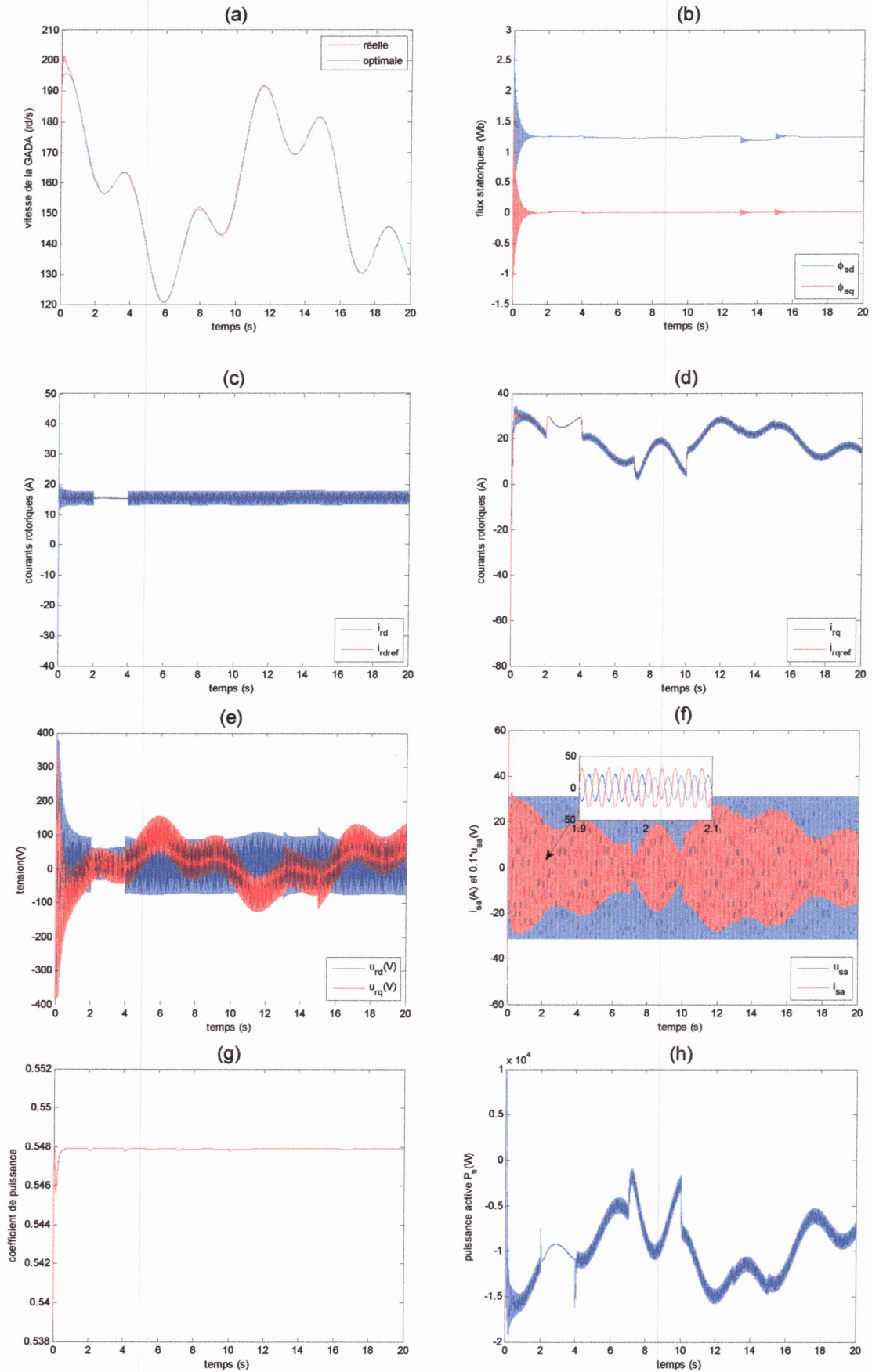


Figure IV.2 : Résultats de simulation de la commande par mode glissant.

L'analyse des résultats obtenus se fait en vérifiant la réalisation de nos objectifs de commande.

a/ Découplage

La figure (IV.2.b) montre que le découplage n'est pratiquement pas affecté par les variations des paramètres électriques. Toutefois, une variation plus franche de la fréquence du réseau peut affecter ce découplage.

b/ Production de puissance maximale (MPPT)

La figure (IV.2.a) ne montre aucune dégradation des performances en termes de poursuite de vitesse optimale. Le coefficient de puissance figure (IV.2.g) confirme également que durant la phase de perturbation, l'aérogénérateur injecte au réseau une la puissance (active) maximale. L'allure de cette puissance est représentée sur la figure (IV.2.h).

c/ Production avec un facteur de puissance statorique unitaire

En introduisant les perturbations paramétriques, on remarque que le courant (statorique) délivré par le système éolien et la tension du réseau reste en opposition de phase (donc $\varphi = 180$) figure (IV.2.f), et par conséquent la puissance réactive (pertes) égale à zéro.

d/ Qualité des signaux de commande

La figure (IV.2.e) montre que les performances de robustesse de la commande par modes glissants se paye au prix de la dégradation de la qualité des signaux de commande, c-à-d apparition du phénomène indésirable de *chattering* limitant l'application réelle de cette commande.

IV.4. Le broutement (chattering)

Un régime glissant idéal requiert une commande pouvant commuter à une fréquence infinie. Ainsi, durant le régime glissant, les discontinuités appliquées à la commande peuvent entraîner le chattering. Celui-ci se caractérise par de fortes oscillations des trajectoires du système autour de la surface de glissement.



Figure IV.3 : Avantage et inconvénient de la commande discontinue.

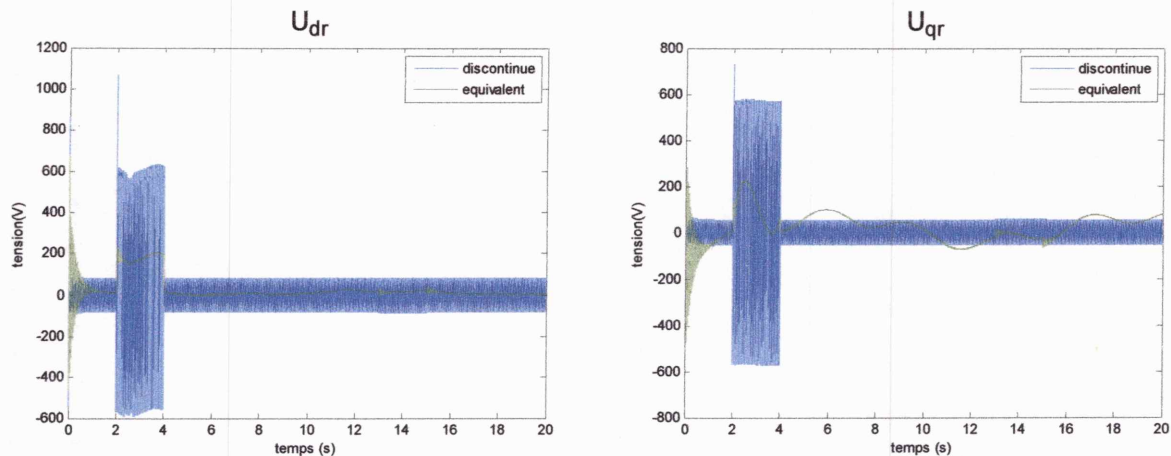


Figure IV.4 : Décomposition des tensions en terme équivalent et discontinu.

Les principales raisons à l'origine de ce phénomène sont dues au terme de la commande discontinue comme il est indiqué dans la figure (IV.4), les limitations des actionneurs ou les retards de commutation au niveau de la commande. Ces commutations détériorent la précision de la commande et peuvent s'avérer néfastes pour l'organe de commande en provoquant une détérioration prématurée des systèmes mécaniques et une élévation de température dans les systèmes électriques (perte d'énergie non négligeable).

- **Solutions pour diminuer le phénomène de chattering :**

Dans le but de réduire ou d'éliminer ce phénomène, de nombreuses solutions ont été proposées, comme la solution de couche limite, modes glissants flous, modes glissants d'ordre supérieur, approach law, etc.

IV.5. Commande par modes glissants d'ordre supérieur (MGOS)

Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduits pour pallier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques. Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans l'expression de la commande synthétisée, mais dans une de ses dérivées supérieures ce qui a le mérite de réduire le chattering.

IV.5.1. Théorie de la commande par modes glissants d'ordre supérieur

La théorie de la commande par modes glissants d'ordre supérieur [29] est une alternative au problème des modes glissants classiques. Dans cette approche, le terme discontinu n'apparaît plus directement dans la commande synthétisée, mais dans une de ses dérivées supérieures ce qui a le mérite de réduire le chattering. Les modes glissants d'ordre supérieur ont été introduits pour pallier au problème du chattering tout en gardant les propriétés de convergence en temps fini et de robustesse des commandes par modes glissants classiques.

Ils permettent aussi d'améliorer la précision. La plupart des commandes utilisant ce concept se basent sur la notion d'homogénéité, avec un jeu de coefficients (poids) particulier.

IV.5.2. Exemples de commandes par MGOS

Dans la littérature, plusieurs algorithmes modes glissants d'ordre 2 ont été introduits [25,29]. Parmi ces algorithmes, on cite :

- Algorithme du Twisting.
- Algorithme du Super Twisting.
- Algorithme du prescribed convergence law (Algorithme avec une loi de convergence prédéfinie).

IV.5.3. Algorithme du super-Twisting

Cet algorithme a été développé pour l'asservissement de systèmes à degré relatif égal à 1 par rapport à la surface de glissement. Cette loi de commande a été proposée par Emelyanov en 1990. Elle a été étudiée par Levant dans [30]. soit le système défini par

$$\dot{S} = a(x, t) + b(x, t)u \quad (IV.26)$$

Avec $S = x - x_d$ et x_d est l'état désiré.

supposant des constants positive K_m, K_M, Ψ vérifiant l'inégalité suivante

$$\begin{cases} 0 < K_m < b(x, t) < K_M \\ a(x, t) < \Psi \end{cases} \quad (IV.27)$$

Le Super-twisting n'utilise pas d'informations sur \dot{S} ceci peut être vu comme un avantage. Il est composé de deux parties, une partie discontinue u_1 et une partie continue u_2 .

$$\dot{u}_1(t) = \begin{cases} -u & \text{si } |u| > u_m \\ -\Lambda \text{ sign}(S) & \text{si } |u| \leq u_m \end{cases} \quad (IV.28)$$

$$u_2(t) = -\gamma |S|^p \text{ sign}(S) \quad (IV.29)$$

$$u(t) = \int \dot{u}_1(t) dt + u_2(t) \quad (IV.30)$$

Avec γ, Λ, p vérifiant les inégalités suivantes

$$\begin{cases} \Lambda > \frac{\Psi}{K_m}, \gamma^2 \geq 4\Psi \frac{K_M \Lambda + \Psi}{K_m^2 \Lambda - \Psi} \\ 0 < p \leq 0.5 \end{cases}$$

Cette commande se décompose en un terme algébrique (non dynamique) et en un terme intégral. On peut donc considérer cet algorithme comme une généralisation non linéaire d'un PI. Pour les systèmes affines l'algorithme de super-twisting prend la forme suivant :

$$\begin{cases} \dot{u}_1(t) = -\Lambda \text{ sign}(S) \\ u_2(t) = -\gamma |S|^{\frac{1}{2}} \text{ sign}(S) \end{cases} \quad (IV.31)$$

IV.5.5. Résultats de simulation

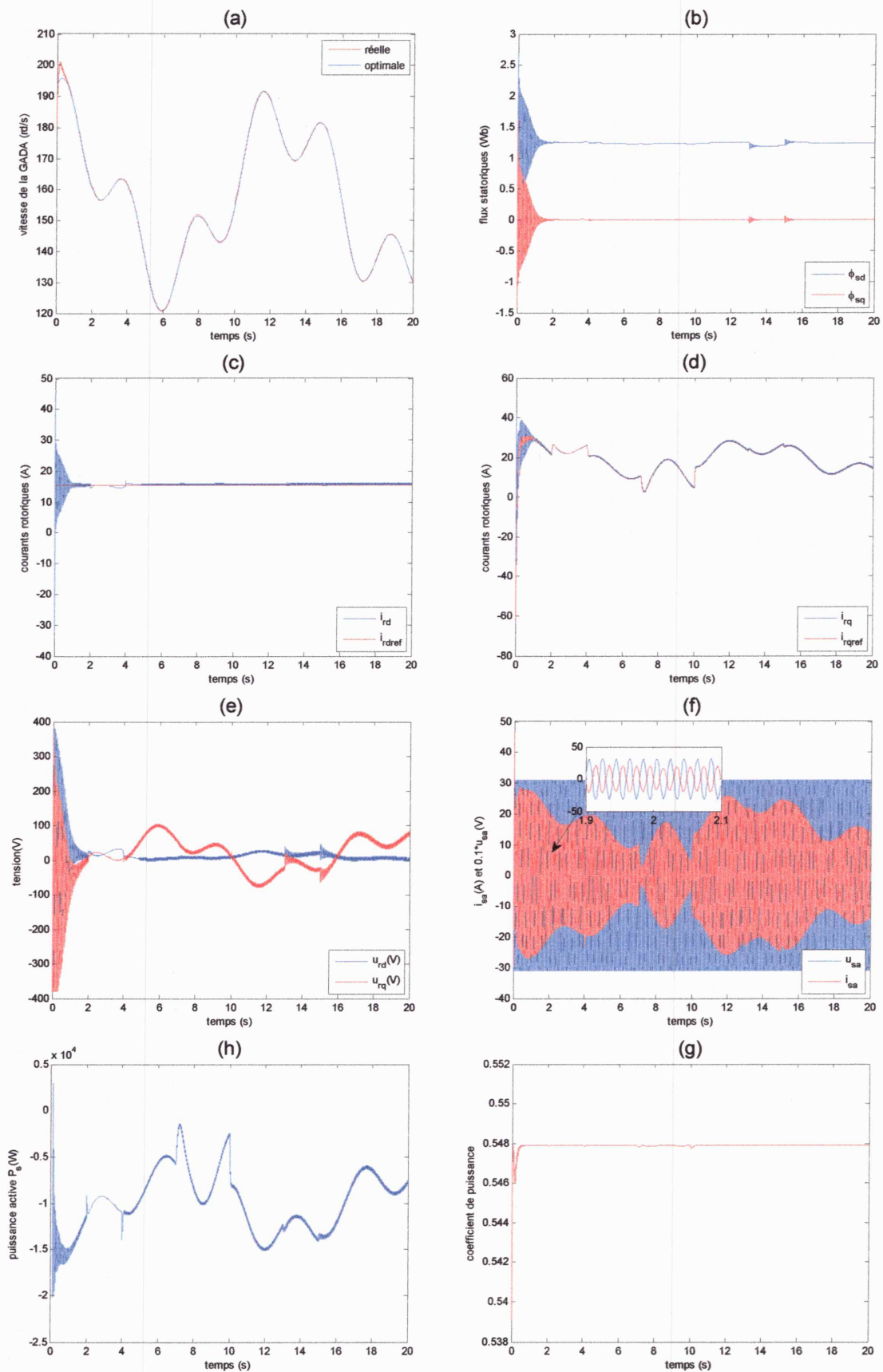


Figure IV.6: Résultats de simulation de la commande par MGOS.

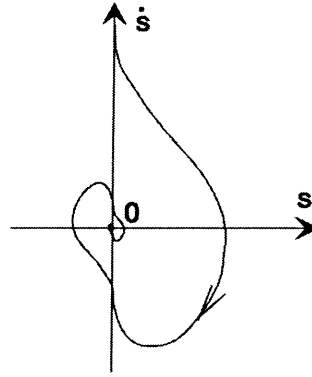


Figure IV.5 : Convergence de l'algorithme Super Twisting dans le plan (S, \dot{S}) [31].

La trajectoire de l'algorithme dans le plan de phase (S, \dot{S}) est donnée dans la figure (IV.4), et on montre que les intersections consécutives de celle-ci avec les axes du plan (S, \dot{S}) évoluent tout en se rapprochant de l'origine qui est atteinte en temps fini (voir annexe B).

IV.5.4. Application de la commande par MGOS à la MADA

Considérons le modèle réduit d'ordre 2 de la MADA constitué par les vues précédemment :

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x) + G(x)u + \Delta(x) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (\text{IV.32})$$

$$F(x) = \begin{pmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -\gamma_r \cdot i_{dr} + (\omega_s - \omega) \cdot i_{qr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot \omega \cdot \phi_{qs} - \beta \cdot V_{ds} \\ -\gamma_r \cdot i_{qr} - (\omega_s - \omega) \cdot i_{dr} + \alpha_s \cdot \beta \cdot \phi_{qs} + \beta \cdot \omega \cdot \phi_{ds} - \beta \cdot V_{qs} \end{pmatrix} \quad (\text{IV.33})$$

avec : $x = [i_{dr} \ i_{qr}]^T$, $G(x) = \text{diag} \left[\frac{1}{\sigma_r}, \frac{1}{\sigma_r} \right]$, $u = \begin{bmatrix} V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix}$ $y(x) = \begin{pmatrix} i_{dr} \\ i_{qr} \end{pmatrix}$

D'après l'étude théorique, le choix des surfaces est comme suite :

$$S_1 = e_1, \quad S_2 = e_2 \quad (\text{IV.34})$$

où : $e_1 = i_{dr} - i_{dr_{ref}}$, $e_2 = i_{qr} - i_{qr_{ref}}$

La commande par MGOS de la MADA est de la forme :

$$u_j = u_{j,eq} + u_{j,st} \quad j = 1, 2$$

où $u_{j,eq}$: correspond à la commande équivalente et $u_{j,st}$ est le terme du super-twisting.

$$\begin{cases} u_{1,eq} = u_{rd,eq} = -\sigma_r (f_1(x) + v_1 + k_{01} S_1) \\ u_{1,eq} = u_{rq,eq} = -\sigma_r (f_2(x) + v_2 + k_{02} S_2) \\ u_{1,st} = u_{rd,st} = -\sigma_r \left(\int \dot{u}_{1,1}(t) dt + u_{1,1}(t) \right) \\ u_{1,st} = u_{rq,eq} = -\sigma_r \left(\int \dot{u}_{2,1}(t) dt + u_{2,1}(t) \right) \end{cases} \quad (\text{IV.35})$$

$$\text{ou } \begin{cases} \dot{u}_{1,1}(t) = -\Lambda_1 \text{sign}(S_1) \\ u_{1,2}(t) = -\gamma_1 |S_1|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_1) \end{cases} \quad \text{et} \quad \begin{cases} \dot{u}_{2,1}(t) = -\Lambda_2 \text{sign}(S_2) \\ u_{2,2}(t) = -\gamma_2 |S_2|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S_2) \end{cases}$$

Les résultats de simulation (figure IV.5) montrent l'efficacité de la stratégie de commande par MGOS de l'aérogénérateur en termes de la réalisation des objectifs de commande à savoir :

- Orientation du flux statorique (découplage).
- Extraction maximale de puissance.
- Production sous un facteur de puissance statorique unitaire.
- Qualité des signaux de commande.

Les résultats obtenus montrent également la robustesse de cette commande face aux différentes perturbations pouvant affecter le système éolien et particulièrement la GADA. Comparativement à la commande par modes glissants, on constate la réduction du phénomène du *chattering*, ceci est clairement montré sur les figures illustrant l'évolution des flux et des tensions de commande. D'où l'intérêt de cette stratégie qui réduit considérablement le *chattering* tout en gardant la puissance de la commande par modes glissants en terme de robustesse.

IV.5.6. Inconvénients des commandes MGOS

Plus r (degré relative) est grand, meilleure est la précision de convergence dans un glissement réel vers la surface. Néanmoins, il est nécessaire d'avoir à chaque commutation, des informations sur les $r - 1$ dérivées de S . Bien que l'on puisse réduire ces informations, dans certains cas, aux $r - 2$ dérivées de S , cette condition freine l'utilisation de la commande d'ordre supérieur à 3. En effet, plus on dérive y , plus on risque d'amplifier le bruit dans $y^{(r-1)}$ ce qui rend la commande instable [31].

Pour une commande à régime glissant d'ordre r , la commande discontinue est appliquée sur $S^{(r)}$ ce qui a l'avantage d'obtenir en sortie de la chaîne d'intégrateurs une commande continue. Ces intégrateurs réduisent les composantes hautes fréquences de la commande, nécessaires pour compenser les incertitudes du modèle standard. Cette chaîne d'intégrateur a aussi comme inconvénient de ralentir la commande, ce qui se traduit par une réduction des performances des commandes à régimes glissants d'ordre supérieur pour l'asservissement du système, particulièrement en suivi d'une consigne dont les variations sont rapides.

IV.6. Commande par modes glissants floue

IV.6.1. Généralités sur la logique floue

Depuis les années 80, les systèmes basés sur la logique floue sont devenus l'un des domaines de recherche les plus fructueux en automatique. Les travaux contemporains se sont inspirés des recherches de Mamdani sur le contrôle flou et ont été motivés par les articles de Zadeh en 1965 sur l'approche linguistique dans le réglage des systèmes. Elle permet de représenter l'imprécis et l'incertain et peut être vue comme une extension de la logique booléenne. L'un de ses atouts

Situation 4 : seule la règle 3 est activée ($S_j \leq -\alpha_j$, $\mu_{j,1} = \mu_{j,2} = 0$, $\mu_{j,3} = 1$)

$$u_{j,h} = -\lambda_j \quad (IV.43)$$

D'après l'analyse précédente, on peut facilement vérifier que [36] :

$$S_j(\mu_{j,1} - \mu_{j,3}) = |S_j| |(\mu_{j,1} - \mu_{j,3})| \geq 0 \quad (IV.44)$$

Alors, la commande discontinue peut être exprimé par :

$$u_{j,h} = \lambda_j(\mu_{j,1} - \mu_{j,3}) \quad (IV.45)$$

et la loi de commande par modes glissants flous est représentée par :

$$\begin{aligned} u_j &= u_{j,eq} - \sigma_r u_{1,h} \quad j = 1,2 \\ &= u_{j,eq} - \sigma_r \lambda_j (\mu_{j,1} - \mu_{j,3}) \end{aligned} \quad (IV.46)$$

D'où :

$$u_j = -\sigma_r (f_j(x) + v_j + k_{0j} S_j + \lambda_j (\mu_{j,1} - \mu_{j,3})) \quad (IV.47)$$

- Analyse de la stabilité

Choisissons une fonction candidate de Lyapunov:

$$V = \sum_{j=1}^2 \frac{1}{2} S_j^2 \quad (IV.48)$$

La dérivée temporelle de cette fonction de Lyapunov est donnée par :

$$\dot{V} = \sum_{j=1}^2 S_j \dot{S}_j \quad (IV.49)$$

$$= \sum_{j=1}^2 S_j (\Delta_j - \lambda_j (\mu_{j,1} - \mu_{j,3})) - \sum_{j=1}^2 k_{0,j} S_j^2 \quad (IV.50)$$

$$\leq \sum_{j=1}^2 |S_j| (|\Delta_j| - \lambda_j |(\mu_{j,1} - \mu_{j,3})|) - \sum_{j=1}^2 k_{0,j} S_j^2 \quad (IV.51)$$

si l'inégalité suivante est vérifiée :

$$\lambda_j > \frac{|\Delta_j|}{|(\mu_{j,1} - \mu_{j,3})|} \quad (IV.52)$$

alors $\dot{V} \leq 0$, on peut conclure que le contrôleur par modes glissants flous donné par (IV.46) garantit la convergence asymptotique de S_1 , S_2 à zéro.

IV.6.5. Résultats de simulation

Les résultats de simulation (Figure IV.8) montrent l'efficacité de la stratégie de commande par modes glissants flous de l'aérogénérateur en termes de la réalisation des objectifs de commande à savoir :

- Orientation du flux statorique (découplage).
- Extraction maximale de puissance.
- Production sous un facteur de puissance statorique unitaire.
- Qualité des signaux de commande.

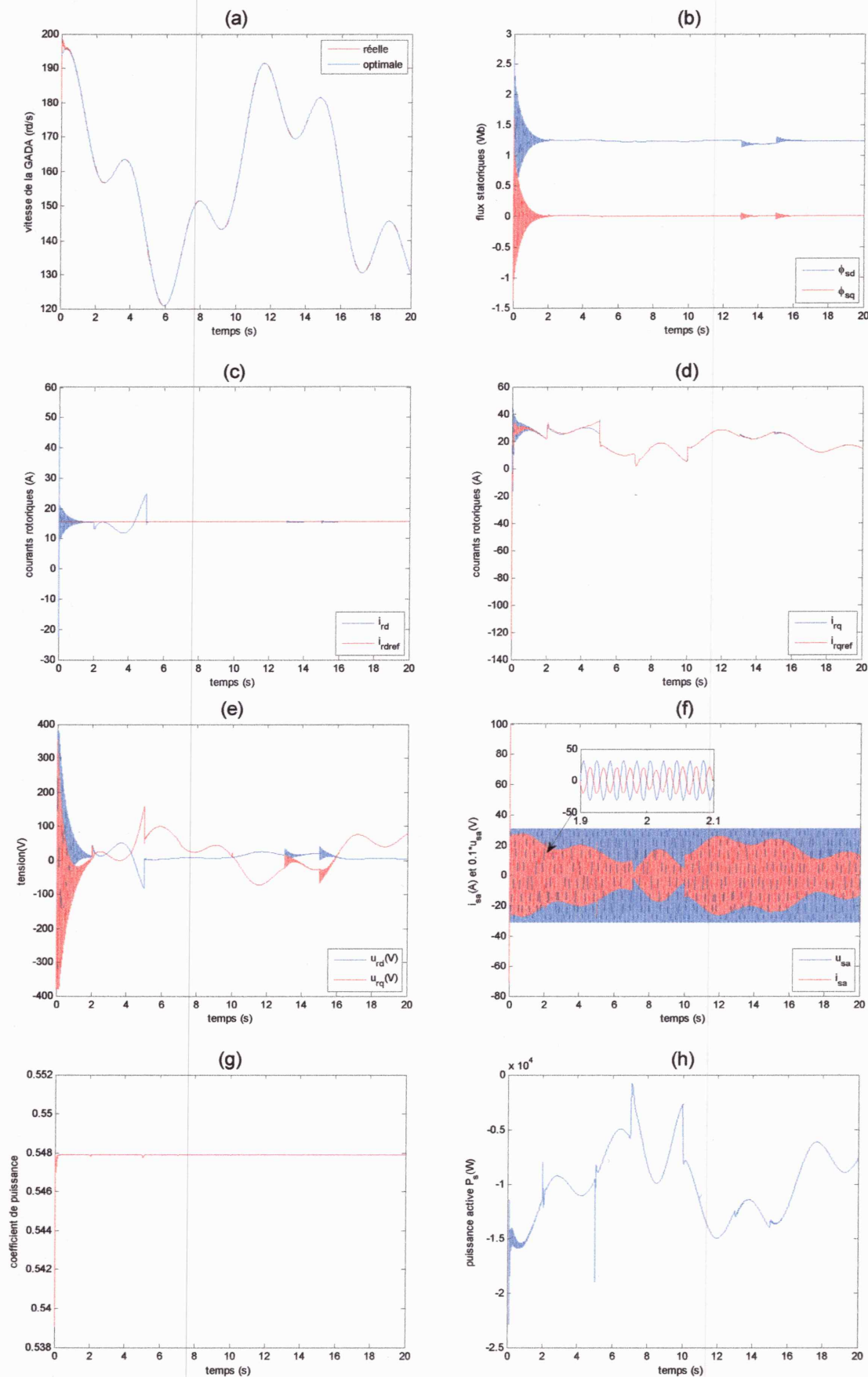


Figure IV.9 : Résultats de simulation de la commande par modes glissants floue.

Les résultats obtenus montrent l'efficacité et la robustesse de cette technique de commande face aux différentes perturbations pouvant affecter le système éolien et particulièrement la MADA. Les résultats obtenus montrent la supériorité de cette technique de commande par rapport aux autres techniques présentées, à savoir, la commande par modes glissants et la commande par modes glissants d'ordre supérieur. En effet, on constate une réduction conséquente du phénomène du *chattering*, l'effort de commande est moindre, ceci peut être vérifié en regardant les réponses montrant l'évolution du couple et les tensions de commande.

IV.6.6. Étude comparative

Le tableau donné ci-dessous montre une comparaison entre les quatre lois de commande présentées dans ce travail.

Tableau IV.1 : Étude comparative entre les quatre commandes présentées.

Commande	Type	Complexité	Robustesse	Problème
Vectorielle (PI)	linéaire	Simple	Non	-Choix des paramètres
Modes glissants	Non linéaire	Moyenne	Oui	-Chattering -Choix des paramètres
Modes glissants d'ordre supérieur	Non linéaire	Moyenne	Oui	-Peu de chattering -Choix des paramètres
Modes glissants floue	Non linéaire	Moyenne	Oui	-Choix des paramètres

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes intéressés à la commande non linéaire d'un aérogénérateur à base de MADA. Pour cela, nous avons présenté trois types de commande, à savoir la commande par modes glissants, la commande par modes glissants d'ordre supérieur et enfin la commande par modes glissants floue. Les performances obtenues avec la commande par modes glissants sont satisfaisantes, les objectifs de commande sont atteints en terme de maximisation de la puissance produite, toutefois, il faut noter la dégradation de la qualité des signaux de commande (phénomène indésirable du *chattering* dû à la présence de la fonction « *sign(.)* » dans la commande).

Dans le but de résoudre ce problème tout en gardant les performances de la commande par modes glissant concernant la robustesse, la commande par modes glissants d'ordre supérieur a

été introduite, les résultats obtenus ont montré que cette technique apporte une amélioration conséquente en termes de réduction du chattering. Ensuite, dans le but d'améliorer d'avantages les performances de notre système du point de vue adoucissement de la commande ou élimination du chattering, nous avons opté pour la commande par modes glissants floue, cette dernière combine les avantages des deux commandes ; commande par modes glissants (robustesse) et commande par logique floue (utilisation d'une expertise, donc traduction du langage humain). Les résultats de simulation ont montré clairement la supériorité de cette technique par rapport aux deux autres méthodes présentées précédemment.

Toutefois, il faut noter que l'inconvénient de cette technique ainsi que les deux autres méthodes réside dans l'absence d'une méthode systématique facilitant le bon choix des paramètres de synthèse, tels que les gains et les fonctions d'appartenance. Ce point constitue l'objectif de la dernière partie de ce travail, il s'agit du problème d'optimisation des paramètres des lois de commande.

Chapitre V:
Optimisation de la
commande non-
linéaire de
l'aérogénérateur

Chapitre V

Optimisation de la commande de l'aérogénérateur

V.1. Introduction

L'un des principes les plus fondamentaux de notre monde, qui occupe aussi une place importante dans le monde informatique, industriel, etc., est la recherche d'un état optimal. En effet, de nombreux problèmes scientifiques, sociaux, économiques et techniques ont des paramètres qui peuvent être ajustés pour produire un résultat plus souhaitable. Ceux-ci peuvent être considérés comme des problèmes d'optimisation et leur résolution est un sujet central en recherche opérationnelle. Des techniques ont été conçues pour résoudre ces problèmes, notamment les problèmes difficiles, par exemple ceux qui présentent de nombreux extrema locaux pauvres, en déterminant des solutions qui ne sont pas rigoureusement optimales, mais qui s'en approchent. Ces méthodes, appelées heuristiques et méta-heuristiques, se basent généralement sur des phénomènes physiques, biologiques, socio-psychologiques, et peuvent faire appel au hasard.

V.2. Généralité sur les méthodes d'optimisation

On peut définir deux aspects communs dans les algorithmes d'optimisation basés sur la population: exploration et exploitation. L'exploration est la capacité d'élargir l'espace de recherche, alors que l'exploitation est la capacité de trouver l'optimum autour d'une bonne solution. Dans ses premières itérations, un algorithme de recherche heuristique explore l'espace de recherche pour trouver de nouvelles solutions tout en évitant le piègeage dans un optimum local. Pour faire une recherche de haute performance, il faut faire un compromis approprié entre exploration et exploitation [37].

Lorsque l'évolution de la méthode de résolution est prévisible et ne laisse aucune place au hasard, celle-ci est qualifiée d'une méthode déterministe. On peut citer les méthodes d'interpolation, Les méthodes de type gradients et l'algorithme de Newton [38, 39 40 41]. On s'intéressera plus particulièrement aux méta-heuristiques qui sont des Méthodes stochastiques [42, 43, 44]. Le mot méta-heuristique vient de la composition de deux mots grecs :

- Heuristique qui vient du verbe heuriskein (euriskein) et qui signifie trouver ;
- Méta qui est un suffixe signifiant au-delà, dans un niveau supérieur.

V.3. Formation de problème d'optimisation [37,45]

On peut décomposer les problèmes d'optimisation en :

V.3.1. Formulation mathématique

On s'intéresse ici au problème de l'optimisation globale d'une fonction soit une maximisation ou minimisation $j: \Omega \rightarrow \mathfrak{R}$ dont le calcul peut éventuellement être complexe et coûteux.

V.3.2. Fonction objective

Dans toutes les méthodes d'optimisation on doit faire évoluer une population, il est toujours indispensable d'avoir une fonction d'évaluation « fitness » permettant d'évaluer la qualité de solution. Une fonction fitness doit prendre les valeurs de la particule dans l'espace de recherche comme entrée et retourner comme sortie une valeur permettant la comparaison avec les autres particules, il n'existe pas une méthode définie pour le choix de cette fonction, mais elle dépend du problème physique qu'on veut optimiser.

V.3.3. Domaine de recherche

Domaine de recherche ou espace d'état est un ensemble d'états de même dimension que les paramètres à optimiser. Si on cherche à optimiser $f(x_1, x_2, x_3)$ à trois paramètres, alors $U = R^3$, le domaine de recherche peut être continu ou discret selon le problème à optimiser.

V.3.4. Individu

Un individu défini $X = (x_1, x_2 \dots x_d \dots x_n) \in \mathfrak{R}^n$ a un nombre d'éléments égal au nombre des paramètres qu'on s'intéresse à régler, chaque individu a sa valeur de fonction objective et présente un candidat de la solution optimale.

V.3.5. Population

Une population est un ensemble d'individu X appartient au domaine de recherche U pour laquelle chaque individu contient n éléments qui sont les paramètres à optimiser. La taille de population influe sur l'exploitation du domaine de recherche, et plus la population est organisée plus l'exploration du domaine de recherche est meilleure.

V.3.6. Génération

La génération veut l'avancement de l'algorithme, c'est l'ensemble des populations au cours du développement d'algorithme. Plus le nombre de générations est grand plus les chances de trouver les minimums de la fonction objective.

V.3.7. Contraintes

Ensemble d'égalités et/ou d'inégalités qui doivent être respectées par les individus, ces contraintes sont dues aux limites physiques du système. À cause de ces contraintes, le domaine de recherche est limité.

V.3.8. Critères d'arrêt

À travers les itérations, la recherche converge vers l'optimum. Ainsi ce cycle se répète jusqu'à atteindre un critère d'arrêt spécifique. Il est généralement défini par nombre maximum d'itérations ou une valeur de fitness

V.4. Paramètres à optimiser dans notre étude

Comme nous l'avons montré dans la partie précédent, le modèle réduit de la MADA est donné par :

$$\begin{cases} \dot{x} = F(x) + G(x)u + \Delta(x) \\ y = h(x) \end{cases} \quad (V.1)$$

La commande par modes glissants floue de la MADA est de la forme :

$$u = -G(x)^{-1} \left(F(x) + v + k_0 S + \lambda_j (\mu_{j,1} - \mu_{j,3}) \right) \quad (V.2)$$

Sous forme compacte, cette loi de commande peut s'écrire comme :

$$u_j = u_{j,eq} + u_{j,n} \quad j = 1,2 \quad (V.3)$$

où $u_{j,eq}$: correspond à la commande équivalente et $u_{j,n}$ est le terme discontinu.

Où : $0 \leq \mu_{j,1} \leq 1$, $0 \leq \mu_{j,2} \leq 1$ et $0 \leq \mu_{j,3} \leq 1$ sont les degrés d'appartenance de l'entrée s_j aux trois règles 1.2 et 3 respectivement ; $\lambda_{j,1} = \lambda_j$, $\lambda_{j,2} = 0$ et $\lambda_{j,3} = -\lambda_j$ Sont les centres des fonctions d'appartenance de la sortie (EZ, EN et EP).

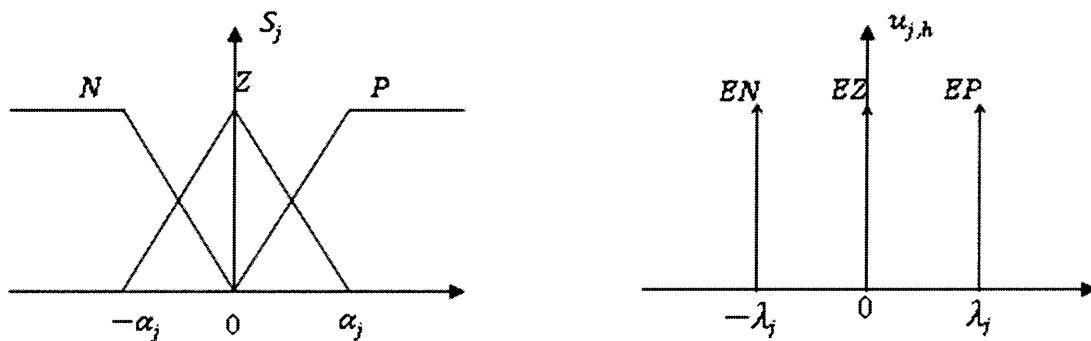


Figure V.1 : Entrée et sortie de modèle d'inférence.

Les paramètres à optimiser sont (α_j, λ_j) , la fonction objective choisie $J = (\sum e_v^2 + \sum e_a^2 + \sum e_q^2)$

Ou e_v erreur de poursuite de vitesse, e_a erreur de poursuite de courant i_{dr} , e_q erreur de poursuite de courant i_{qr} .

V.5. Particle Swarm Optimization PSO

L'optimisation par essaim particulaire (OEP), ou Particle Swarm Optimization (PSO) en anglais est un algorithme évolutionnaire qui utilise une population candidate pour développer

une solution optimale au problème [30, 37, 46]. Cet algorithme a été proposé par Russel Eberhart (ingénieur en électricité) et James Kennedy (socio-psychologue) en 1995 [47]. Il s'inspire à l'origine du monde des vivants, plus précisément du comportement social des animaux évoluant en essaim, tel que les bancs de poissons et les vols groupés d'oiseaux. L'information et la mémoire de chaque individu est utilisée pour décider de son déplacement. Des règles simples, telles que « rester proche des autres individus », « aller dans une même direction » ou « aller à la même vitesse », suffisent pour maintenir la cohésion de l'essaim, et permettent la mise en œuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs.

V.5.1. Principe de PSO

L'essaim de particules correspond à une population d'agents simples, appelés particules. Chaque particule est considérée comme une solution du problème, où elle possède une position (vecteur solution) et une vitesse. De plus, chaque particule possède une mémoire lui permettant de se souvenir de sa meilleure performance (en position et en valeur) et de la meilleure performance atteinte par les particules « voisines ». Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée à l'instant t par son vecteur position x_i^t et par son vecteur vitesse v_i^t . La qualité de sa position est déterminée par la valeur de la fonction objective en ce point. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $pbest_i$. La meilleure position atteinte par les particules de l'essaim est notée $gbest$. Nous nous référons à la version globale de PSO, où toutes les particules de l'essaim sont considérées comme voisines de la particule i , d'où la notation:

$$\begin{cases} v_i^{t+1} = w v_i^t + c_1 \times rand \times (pbest_i - x_i^t) + c_2 \times rand \times (gbest - x_i^t) \\ x_i^{t+1} = x_i^t + v_i^{t+1} \end{cases} \quad (V.4)$$

où $V_i(t)$ est la vitesse de particule i à l'instant t , $x_i(t)$ est la position de particule i à l'instant t . w , c_1 , c_2 sont des facteurs de poids, $rand$ est un nombre aléatoire entre $[0, 1]$, $pbest_i$ est la meilleure solution obtenue par la particule i , $gbest$ est la meilleure solution obtenue par toutes les particules.

Dans PSO, le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes :

- Une composante d'inertie v_i^t : la particule tend à suivre sa direction courante de déplacement.
- Une composante cognitive $c_1 r_1 (pbest_i - x_i^t)$: la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ;
- Une composante sociale $c_2 r_2 (gbest - x_i^t)$: la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

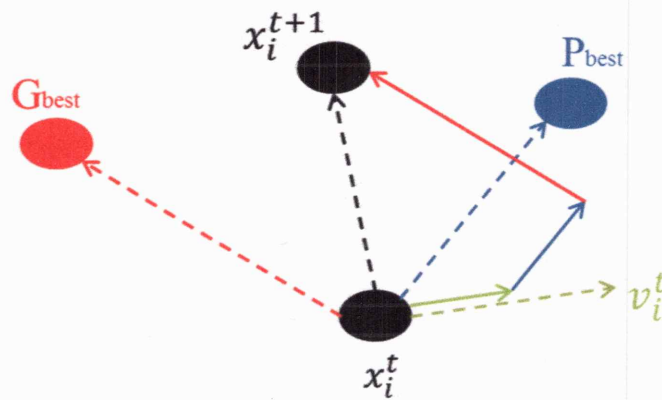


Figure V.2 : Mouvement d'une particule dans l'espace de recherche.

La stratégie de déplacement d'une particule est illustrée dans la figure 1.5.

V.5.2. Algorithme de PSO

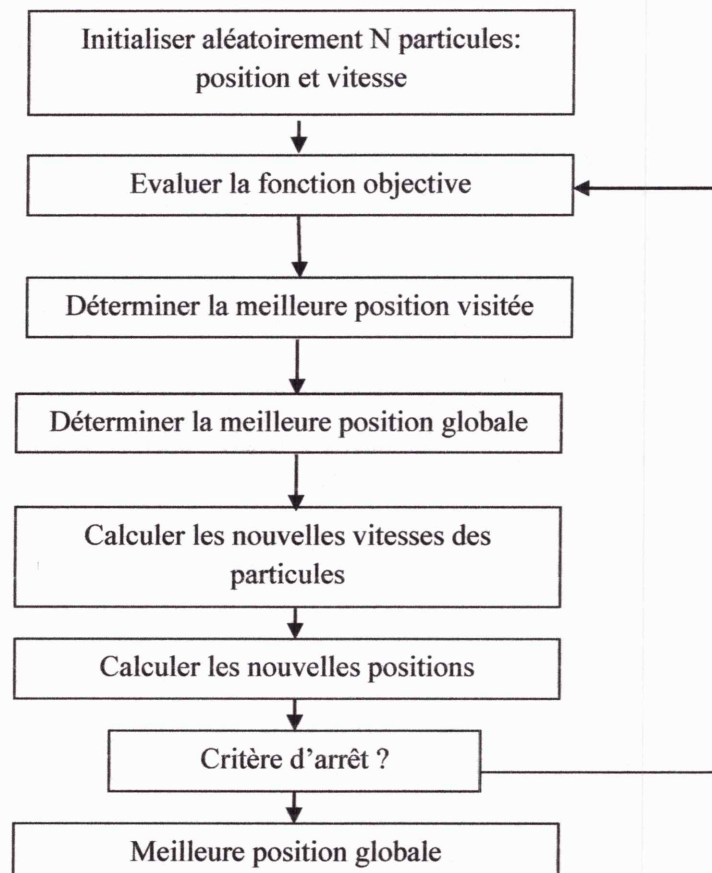


Figure V.3 : Algorithme général de PSO.

V.5.3. Résultats d'optimisation par PSO

Prenons une population de 20 particules et de 100 itérations maximales. La position et la vitesse initiale sont choisies aléatoirement. Les paramètres d'algorithme sont :

$$W = 0.7; C1 = 2; C2 = 2;$$

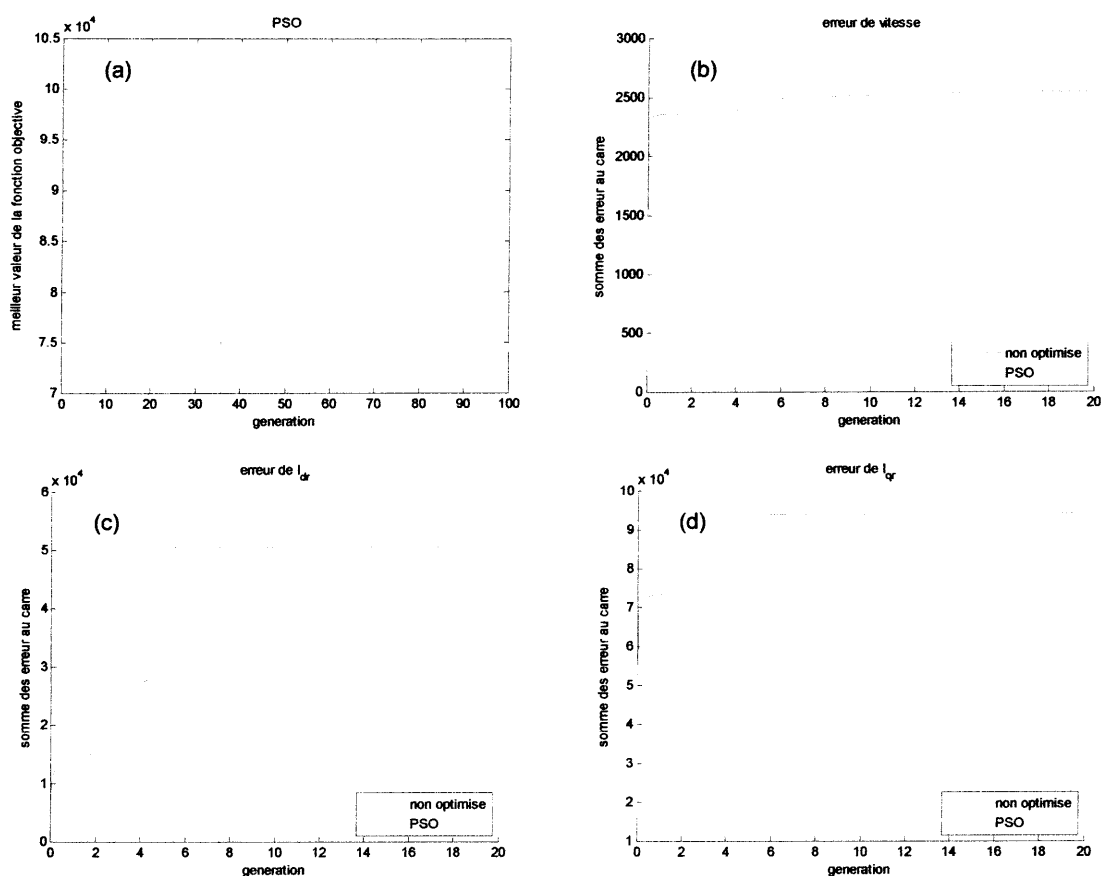


Figure V.4 : Résultats d'optimisation avec l'algorithme de PSO.

La figure (V.4.a) montre la décroissance de la fonction objective en fonction d'itérations. Les figures (V.4.b-d) montrent l'évolution de la somme des erreurs de vitesse et des courants dans les deux cas ; non optimisée et optimisée.

V.6. Gravitational Search Algorithm GSA

GSA est une nouvelle méthode d'optimisation heuristique qui a été proposée par E. Rashedi et al en 2009 [49]. La base théorique de cette méthode a été inspirée de la théorie de Newton qui stipule: Chaque particule dans l'univers attire l'autre particule avec une force qui est directement proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle au carré de la distance entre les deux [50]. GSA peut être considéré comme un ensemble d'agents (solutions ou candidats) dont les masses sont inversement proportionnelles à leur valeur de la fonction objective. Tout le temps, toutes les masses s'attirent mutuellement par les forces de gravité entre eux. Une masse plus lourde à la force d'attraction plus grande. Par conséquent, les masses lourdes qui sont probablement proches de la solution optimale attirent les autres.

V.6.1. Principe de GSA

Supposons un système à N agents. L'algorithme commence en plaçant au hasard tous les agents dans l'espace de recherche. La force gravitationnelle de l'agent j sur l'agent i à un temps spécifique t est définie de la façon suivante [51,52]:

$$F = \frac{G * M1 * M2}{R^2} \quad (V.5)$$

où F est l'amplitude de force, G constant de gravité, $M1$, $M2$ les poids des particules 1, 2 respectivement, R est la distance euclidienne entre les deux positions des particules. D'après la deuxième loi de Newton, l'accélération d'une masse M dépend de la force appliquée sur cette masse [51].

$$A = \frac{F}{M} \quad (V.6)$$

Toute masse dans l'espace influe sur ses masses voisines. Les forces d'attraction entre deux particules diminuent par l'effet de décroissance de gravité avec l'âge de l'univers. La valeur de la constante de gravité est donnée par la formule [53] :

$$G(t) = G(t_0) * \left(\frac{t_0}{t}\right)^b, \text{ avec } b < 1 \quad (V.7)$$

Dans la théorie de la physique, trois types de masses sont considérées [53]:

La masse active M_a : est la force appliquée par la particule sur les autres particules de l'univers.

La masse passive M_p : est la force appliquée par l'univers sur la particule.

La masse d'inertie M_i : est la résistance de particule à changer sa direction de mouvement.

Tenant compte de ces lois, on peut reformuler les équations (V.5) et (V.6) par :

$$F_{ij}(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij}(t)} \quad (V.8)$$

$$ac_i = \frac{F_i(t)}{M_{ii}(t)} \quad (V.9)$$

Bien que la masse active, la masse passive et la masse d'inertie sont différentes, aucune étude n'a démontré cette différence.

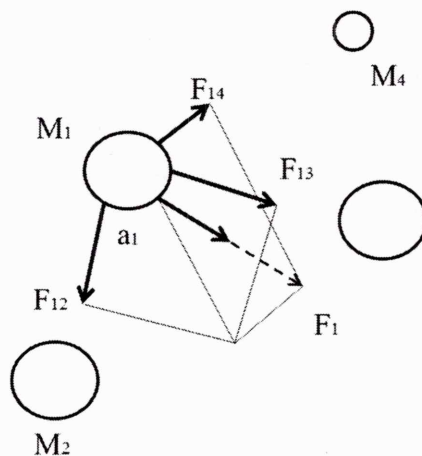


Figure V.5 : Forces appliquées sur un agent dans l'espace de recherche.

Comme il est illustré dans la figure (V.5) le GSA peut être considéré comme un système de masse obéissant aux lois suivantes :

- *Loi de gravité* : chaque particule attire toutes les particules, dans la force de gravité est directement proportionnelle au produit de leurs masses et inversement proportionnelle à la distance entre les deux.
- *Loi de mouvement* : la vitesse de chaque particule est la somme de sa vitesse et sa variation de vitesse (accélération). L'accélération est obtenue par la division des forces de l'univers agissant sur la masse d'inertie de la particule.

Maintenant, considérons une population de n agents $X_i = (x_1, x_2 \dots x_d \dots x_n)$, la force appliquée par l'agent i sur l'agent j est définie par :

$$F_{ij}^d(t) = G(t) \frac{M_{pi}(t) \times M_{aj}(t)}{R_{ij} + \varepsilon} (x_j^d(t) - x_i^d(t)) \quad (V.10)$$

$$R_{ij} = \|x_j^d(t), x_i^d(t)\| \quad (V.11)$$

où R est la distance euclidienne, ε un petit constant pour éviter la division sur zéro

La force totale appliquée sur l'agent i est donnée par :

$$F_i^d(t) = \sum_{j=1, j \neq i}^N rand_j F_{ij}^d(t) \quad (V.12)$$

où $rand$ est une valeur aléatoire entre $[0, 1]$ (caractère stochastique de l'algorithme)

La loi de mouvement sera écrite alors :

$$ac_i^d = \frac{F_i^d(t)}{M_{ii}(t)} \quad (V.13)$$

Par conséquent, les expressions de vitesse et position sont données par :

$$vel_i^d(t) = rand_i \times vel_i^d(t) + ac_i^d(t) \quad (V.14)$$

$$x_i^d(t+1) = x_i^d(t) + vel_i^d(t+1) \quad (V.15)$$

La constante de gravité G est initialisée au début par une valeur G_0 et doit être diminué avec le temps pour contrôler la convergence de l'algorithme.

$$G(t) = G_0 \times \exp(-\alpha \times \frac{iter}{maxiter}) \quad (V.16)$$

Les valeurs des masses actives, passives et d'inertie sont identiques donc :

$$M_i = M_{pi} = M_{aj} = M_{ii} \quad (V.17)$$

La masse M_i de la particule i est une fonction relative de sa valeur de fonction objective est calculée par :

$$m_i(t) = \frac{fit_i(t) - worst(t)}{best(t) - worst(t)} \quad (V.18)$$

$$M_i(t) = \frac{m_i(t)}{\sum_{j=1}^N m_j(t)} \quad (V.19)$$

avec $fit_i(t)$ c'est la fonction objective de particule, $best(t)$ c'est le minimum des fonctions

objective des N particules, $worst(t)$ est le maximum des fonctions objectives des N particules.

V.6.2. Algorithme de GSA général

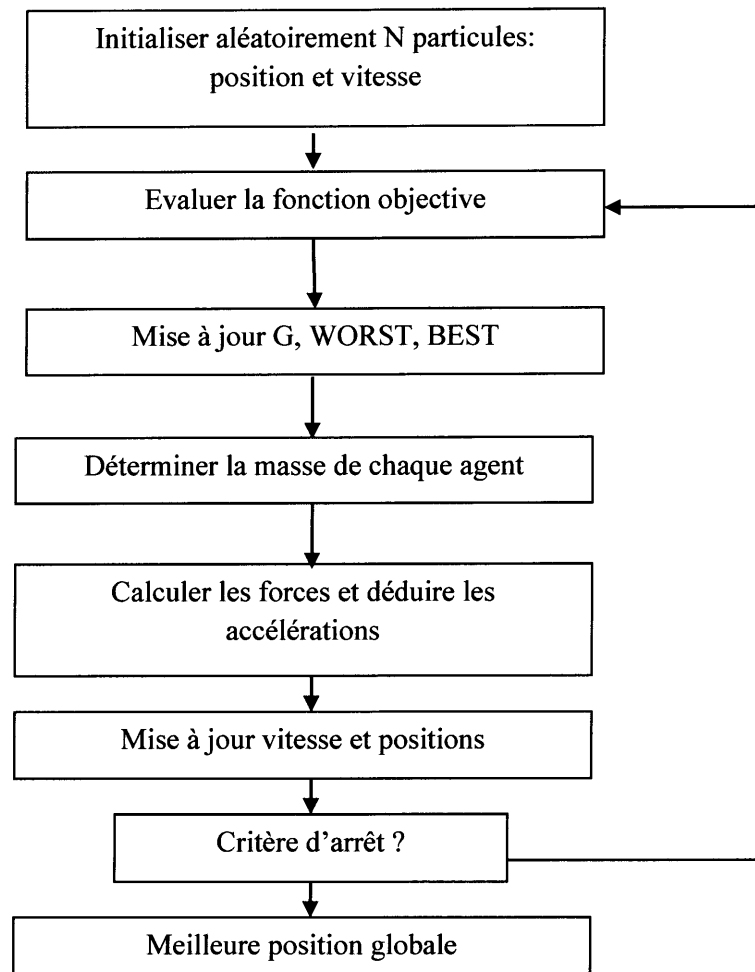


Figure V.6 : Algorithme général de GSA.

V.6.3. Résultats d'optimisation par GSA

Pour une population de 20 agents et de 100 itérations maximales. La position, vitesse et l'accélération initiale sont choisis aléatoirement. Les paramètres d'algorithme sont :

$$G_0 = 100, \quad \alpha = 1.$$

La figure (V.7.a) montre la décroissance de la fonction objective en fonction d'itérations, où on constate que le minimum de cette fonction est atteint en un nombre d'itérations moins par rapport au PSO. Cependant, le résultat d'optimisation (valeur finale de la fonction objective) est meilleur avec PSO. Les figures (V.7.b-d) montrent l'évolution de la somme des erreurs de vitesse et des courants dans les deux cas ; non optimisée et optimisée.

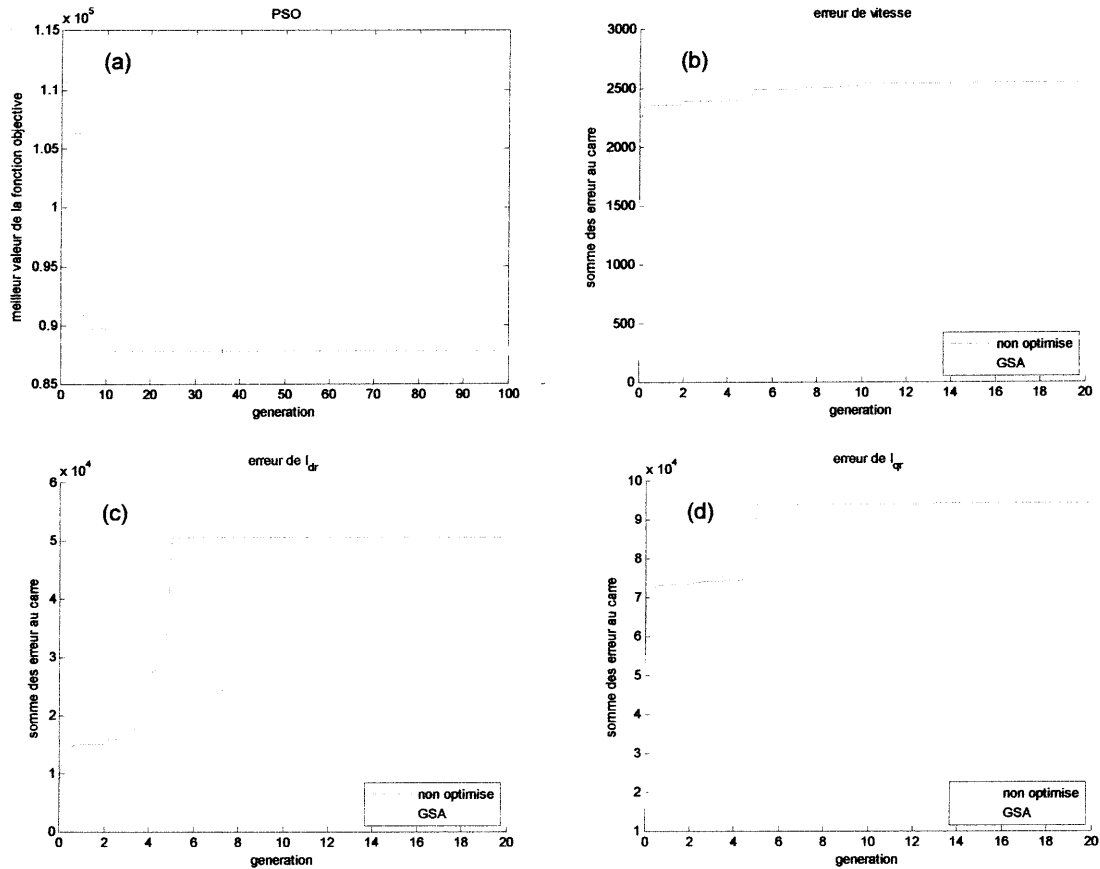


Figure V.7 : Résultats d'optimisation avec GSA.

V.7. Comparaison entre PSO et GSA

Dans les deux méthodes, l'optimisation est garantie grâce au mouvement des particules (agents) dans l'espace de recherche. Cependant, les deux méthodes se distinguent par :

- Dans PSO la direction d'une particule est influencée par deux positions P_{best} et G_{best} , mais dans GSA la direction de mouvement est obtenue après le calcul de la force résultante de tous les agents.
- La nouvelle génération dans PSO est calculée sans considération de la qualité de la fonction objective des particules ou la distance entre eux, mais dans GSA la force est proportionnelle aux valeurs des fonctions objectives et inversement proportionnelle à la distance entre eux.
- PSO utilise une sorte de mise à jour de mémoire pour le calcul de vitesse (à cause de P_{best} et G_{best}), GSA n'a aucune information sur ces positions précédentes et utilise seulement sa position actuelle.
- Finalement l'idée de base de PSO est inspirée des comportements biologiques des essaims et GSA tire son idée des phénomènes physiques agissant sur les planètes.

V.8. Algorithme hybride PSO-GSA

Tous les algorithmes de recherche ont un cadre commun utilisant l'exploration et les aspects de l'exploitation, mais ils utilisent des approches différentes.

V.8.1. Principe PSO-GSA

Plusieurs articles qui ont étudié GSA [54, 55, 56] ont montré sa capacité dans l'exploration. Toutefois, il y a d'autres articles [45, 57, 58] qui ont mentionné PSO pour à ses performances dans la phase d'exploitation. Dans ce qui suit, on va présenter une autre méthode d'optimisation faisant appel à l'hybridation entre PSO et GSA [48], l'idée de base de cette méthode est de combiner le comportement social de PSO ($Gbest$) avec la recherche locale donnée par GSA, la position des particules i à chaque instant t est gérée par les équations :

$$\begin{cases} V_i(t+1) = w \times V_i(t) + c'_1 \times rand \times ac_i(t) + c'_2 \times rand \times (gbest - X_i(t)) \\ x_i(t+1) = x_i(t) + v_i(t+1) \end{cases} \quad (V.20)$$

où $V_i(t)$ est la vitesse de particule i à l'instant t . $x_i(t)$ est la position de particule i à l'instant t . c_1 , c_2 sont des facteurs de poids, w fonctions de poids, $rand$ est un nombre aléatoire entre $[0,1]$, $ac_i(t)$ est l'accélération de particule i à l'instant t , $gbest$ est la meilleure solution obtenue.

V.8.2. Algorithme PSO-GSA

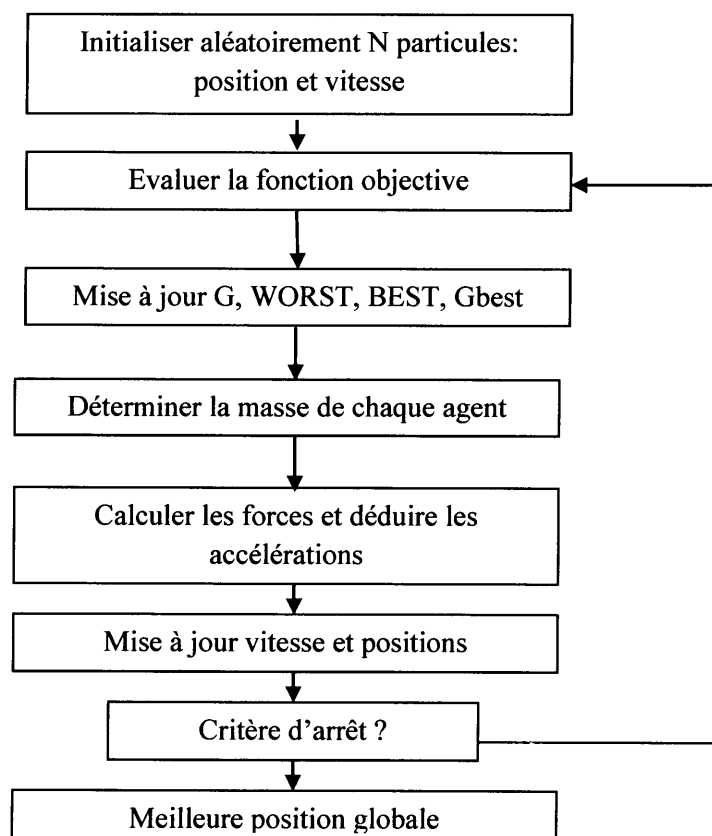


Figure V.8 : Algorithme général de PSO-GSA

V.8.3. Résultats d'optimisation par PSO-GSA

Pour une population de 20 particules et de 100 itérations maximales. La position, la vitesse et l'accélération initiales sont choisies aléatoirement. Les paramètres d'algorithme sont :

$$G_0 = 100, \alpha = 1, W = 0.7, C1 = 2, C2 = 2.$$

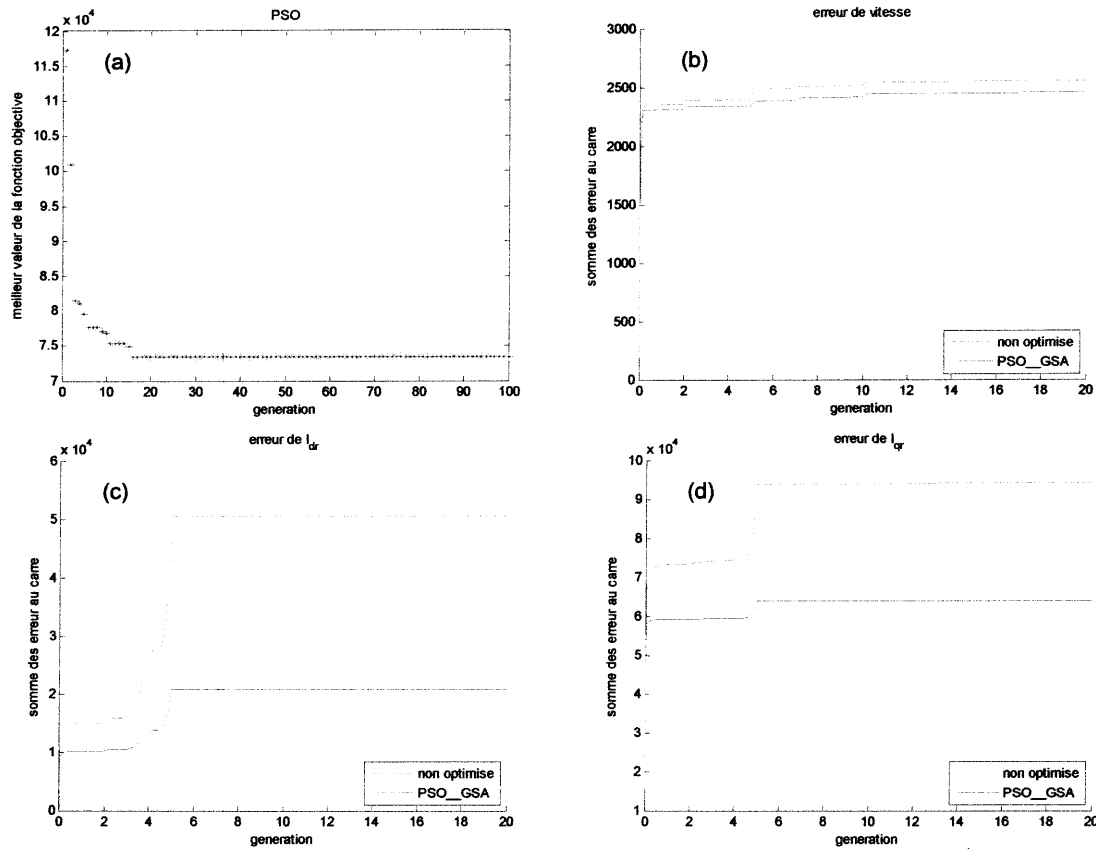
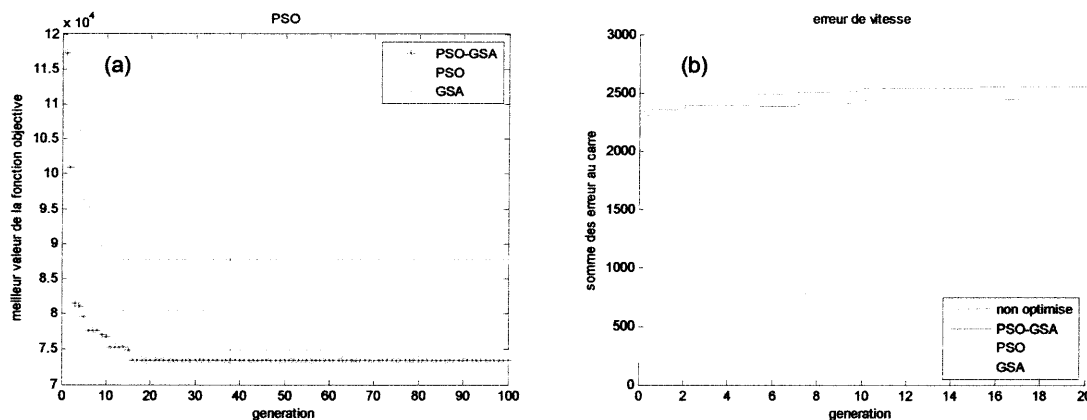


Figure V.9 : Résultats d'optimisation avec PSO-GSA

La figure (V.9.a) montre la décroissance de la fonction objective en fonction d'itérations. Les figures (V.9.b-d) montrent l'évolution de la somme des erreurs de vitesse et des courants dans les deux cas ; non optimisée et optimisée.

V.9. Étude comparative



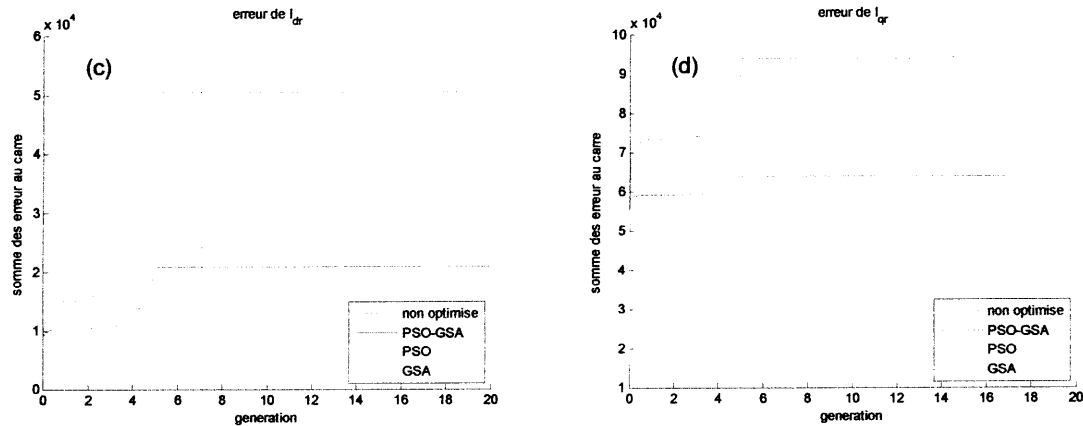


Figure V.10 : Comparaison entre les trois méthodes d'optimisation.

D'après ces figures et les résultats obtenus lors de la simulation, la différence entre ces algorithmes sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau V.1 : Comparaison entre les méthodes d'optimisation utilisées.

Type	MSE (vitesse)	MSE (Iqr)	MSE (Idr)	Min(J)	Temps de convergence
Non optimiser	0.1191	2.5253	4.0023	132940	-
PSO	0.1193	1.06491	3.8417	100532	35
GSA	0.1171	1.2066	3.0619	87718	10
PSO-GSA	0.1141	1.0372	2.5176	73385	16

Regardons le temps de réponse de cette hybridation et sa valeur minimale de fonction objective on peut dire qu'elle a réussi à établir un bon compromis entre les deux autres méthodes. Les avantages et les inconvénients communs de ces algorithmes peut être résumé dans :

V.9.1. Avantage des algorithmes

- Grâce à leur caractère stochastique, il s'agit de méthodes d'optimisation globale.
- Grâce à l'utilisation d'une population, il s'agit de méthodes facilement parallélisables.
- Toutes ces méthodes permettent de gérer les contraintes de manière relativement simple et efficace.
- Ces méthodes sont également très stables par rapport aux erreurs numériques commises sur la fonction J .

V.9.2. Inconvénients des algorithmes

- Leur coût de calcul important lié au grand nombre d'évaluations de la fonction J à effectuer.
- La vitesse de convergence est très lente en comparant à une méthode déterministe.
- Le choix des paramètres est très influent sur la qualité des résultats obtenus.
- ils ne respectent pas les bornes de domaine de recherche.

V.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons traité le problème d'optimisation des paramètres de la commande de notre aérogénérateur à base de MADA. Notre choix s'est porté sur les algorithmes d'optimisation à base de population à savoir PSO, GSA vu qu'ils ont eu un grand succès pour pas mal de problèmes d'optimisation. Comme application, nous avons choisi la commande par modes glissants floue qui possède un nombre important de paramètres de synthèse à déterminer. Les résultats obtenus ont montré leur efficacité. Par la suite, dans le but de surmonter les inconvénients de ces deux dernières méthodes d'optimisation et par conséquent améliorer d'avantage les performances de notre système, nous avons proposé une troisième technique d'optimisation qui consiste en une hybridation entre les deux algorithmes PSO-GSA, l'algorithme ainsi obtenu exploite les avantages de ces deux algorithmes, ceci a été clairement vérifié par les résultats de simulation.

Conclusion

Générale

Conclusion générale

La consommation intensive de l'énergie électrique, l'augmentation des prix des hydrocarbures et le souci de préserver l'environnement ont conduit plusieurs pays à initier des programmes nationaux et internationaux destinés à produire de l'énergie électrique à partir des ressources renouvelables, notamment de type éolienne. Cette dernière se distingue par son caractère aléatoire et intermittent, qui est souvent à l'origine de sérieux problèmes liés à la stabilité du réseau électrique.

Le travail présenté dans ce mémoire avait deux objectifs principaux :

Le premier porte sur la modélisation et la commande du système éolien à base de machine asynchrone à double alimentation. Notre choix s'est porté sur cette machine vue les avantages qu'elle offre par rapport aux autres types de génératrices. Ces avantages sont exprimés en termes de production de puissance élevée, fonctionnement à vitesse variable tout en réduisant le dimensionnement des convertisseurs statiques au tiers de la puissance nominale de la machine. Le modèle de la chaîne de conversion globale constituée par la turbine, multiplicateur de vitesse et la MADA a été établi en vue de l'élaboration d'une stratégie de commande permettant l'extraction du maximum de la puissance du vent.

Ainsi quatre techniques de commande ont été appliquées. La première méthode est de type linéaire, il s'agit de la commande vectorielle à base de PI classiques, les résultats de simulation ont montré que cette technique s'adapte à un certain degré, c.-à-d., en absence de perturbations. Cependant, en présence d'incertitudes et de perturbations pouvant affecter le système, les performances se dégradent considérablement. D'où le besoin à une méthode de commande robuste telle que la commande par modes glissants. La stabilité du système sous cette loi de commande est théoriquement prouvée par la méthode de Lyapunov. Les résultats de simulation ont montré l'efficacité de la cette méthode en termes de robustesse et la réalisation des objectifs de commande. Toutefois, cette commande souffre du problème de chattering pouvant limiter son application sur un site réel.

Afin de surmonter cet inconvénient de la commande par modes glissants classique, la commande par modes glissants d'ordre supérieur a été introduite comme étant une solution au phénomène du chattering. Les résultats obtenus ont montré que cette technique apporte une amélioration conséquente en termes de réduction du chattering. Cependant, visant

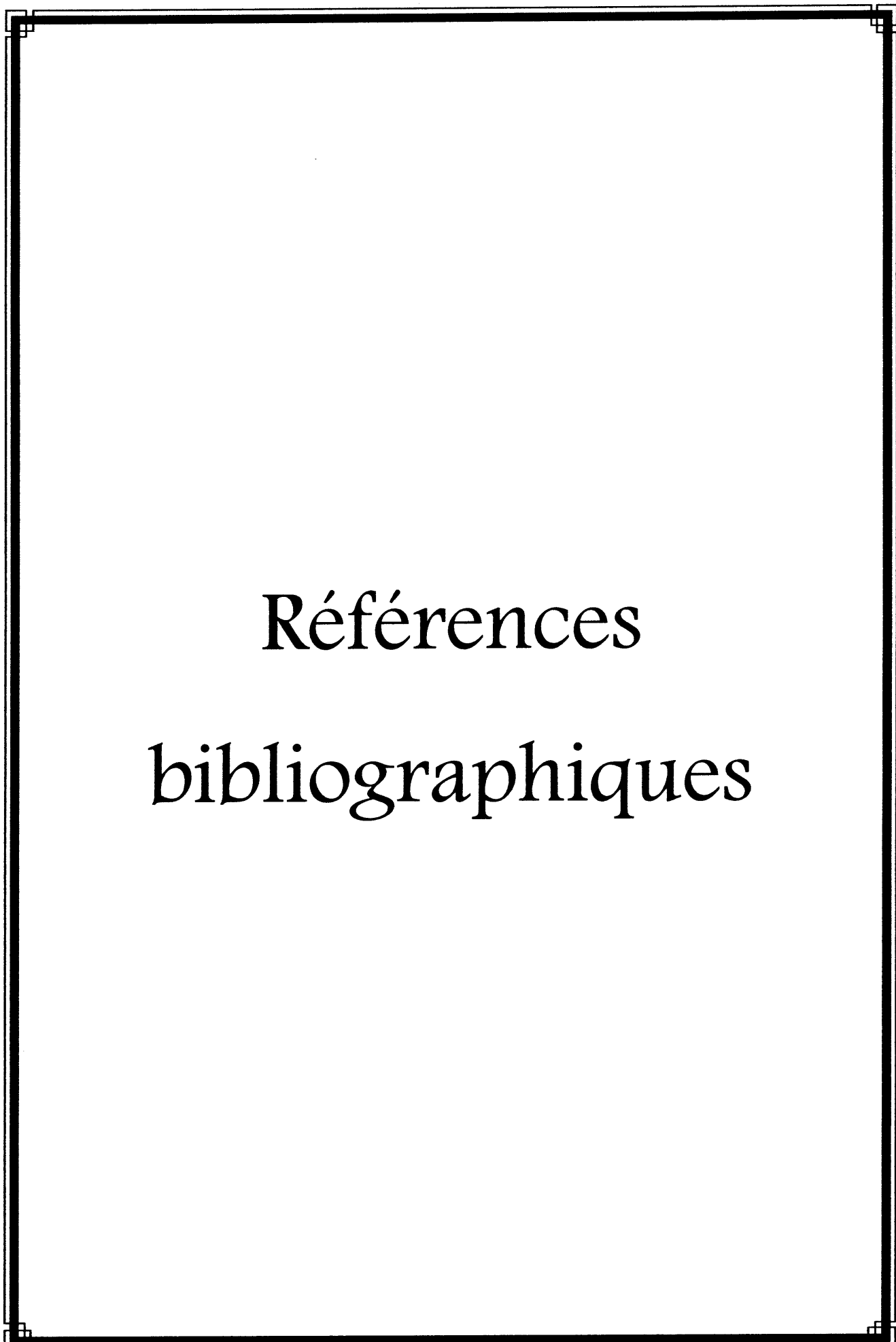

à améliorer d'avantage les performances de notre système du point de vue d'adoucissement de la commande, nous avons présenté une autre technique de commande non linéaire, il s'agit de la commande par modes glissants floue. Cette dernière combine les avantages de deux types de commande, à savoir, la commande par modes glissants (robustesse) et la commande par logique floue (utilisation d'une expertise, donc traduction du langage humain).

Enfin, une étude comparative entre les trois lois de commande non linéaires présentées dans ce travail a montré clairement la supériorité de la dernière technique par rapport aux deux autres méthodes.

Le second objectif de ce travail concernait le problème du bon choix des paramètres des lois de commande en utilisant des algorithmes d'optimisation. Notre choix s'est porté sur des algorithmes stochastiques à base de population, à savoir, PSO, GSA vu qu'ils ont eu un grand succès pour pas mal de problèmes d'optimisation. Comme application, nous avons choisi la commande par modes glissants floue qui possède un nombre important de paramètres de synthèse à déterminer. Les résultats obtenus ont montré leur efficacité. Par la suite, une troisième méthode d'optimisation regroupant les avantages des deux autres méthodes a été proposée, les résultats d'application de cette méthode d'optimisation dénommée PSO-GSA ont montré la faisabilité de cette hybridation et son apport en termes d'accélération du processus d'optimisation et la valeur finale de la fonction objective.

A titre de perspectives de ce travail, nous pouvons suggérer pour des travaux ultérieurs :

- La synthèse d'une loi de commande à base d'observateur de vitesse pour le système éolien.
- Validation expérimentale des stratégies de commande présentées dans ce travail sur un banc expérimental.



Références bibliographiques

Références

- [1] T. Ackermann, "*Wind Power in Power Systems*, Royal Institute of Technology Stockholm", Sweden John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, England.
- [2] A. Boyette, "*Contrôle-Commande d'un Générateur Asynchrone à Double Alimentation Avec Système de Stockage pour la Production Eolienne* ", Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Université de Henri Poincaré, Nancy-I, France, 2006.
- [3] Rapport Annuel du conseil Mondial de l'énergie éolien 2013 (Global wind energy council, GWEC) disponible en ligne sur <http://www.gwec.net>.
- [4] N. Kasbadji Merzouk, "*Evaluation du Gisement Energétique Eolien Contribution a la Détermination du Profil Vertical de la Vitesse du Vent en Algérie* " Thèse de Doctorat en Physique Energétique et Matériaux, Université Abou Bekr Belkaid, Tlemcen, 2006.
- [5] F. Poitier, "*Etude et Commande de la Génératrice Asynchrone pour l'Utilisation de l'Energie Eolienne* ", Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [6] P.W. Carlin, A.S. Laxson et E.B. Muljadi, "*The History and State of Art of Variable-Speed Wind Turbine Technology* ", NREL/TP-500-28607, 2001.
- [7] E. Hau, "*Wind-turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics*", Editions Springer, 2000.
- [8] P. Gibe, "*Le Grand Livre D'éolienne* ", Edition le moniteur observ'er 146 rue de l'université 75007 Paris, France ,2004.
- [9] Site Internet : www.energiethec.com.
- [10] T. Douadi, "*Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Générateur Asynchrone*", Thèse de Magistère en Electrotechnique, Université Batna, 2010.
- [11] R. Cheriet et B. djenoub "*Etude et Commande d'un Système de Conversion d'Energie Eolienne Aérogénérateur Asynchrone à Double Alimentation* " Mémoire de PFE en Automatique et Informatique Industrielle, Université de Jijel, 2013.
- [12] S. el Aimani, "*Modélisation des Différent Technologie d'Eoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyen Tension* ", Thèse de Doctorat de l'Université de Science et Technologie de Lille, 2004.

[13] K. Ferkous, “ *Modélisation et Simulation d’une Chaîne de Conversion d’Energie Eolienne à l’Aide de Logiciel MATLAB/ SIMILINK* ”, 1er séminaire méditerranéen sur l’énergie éolienne, SMEE’2010, Alger, Algérie, 2010.

[14] Y.A. Bencherif, “*Modélisation et Commande d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation pour la Production de l’Energie Eolien* ” Mémoire de PFE en Electrotechnique, ENP, Alger, 2008.

[15] G. Octavian Cimuca, “ *Système Inertiel de Stockage d’Energie Associe à des Générateurs Eoliens*”, Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d’Arts et Métiers Centre de Lille, 2005

[16] S. drid, “ *Contribution à la Modélisation et la Commande Robuste d’une Machine à Induction Double Alimentation a Flux Orienté avec Optimisation de la Structure d’Alimentation, Théorie et Expérimentation* ”, Thèse de Doctorat en Electrotechnique, Université de Batna , 2005.

[17] T. belkacem, “*Modélisation et Commande Floue Optimise d’une Génératrice à Double Alimentation Application a un System Eolien à Vitesse Variable* ”, Thèse de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, 2010

[18] P.E. Vidal, “*Commande Non-Linéaire d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation* ” Thèse de Doctorat en Génie Electrique, Institut National Polytechnique de Toulouse , 2004

[19] W. Boussebt et A. Harrouche “*Commande par Mode Glissant Floue de la Machine Asynchrone à Double Alimentation*”, Mémoire de PFE en Automatique et Informatique Industrielle, Université de Jijel, 2013.

[20] G. Salloum, “*Contribution à la Commande Robuste de la Machine Asynchrone à Double Alimentation* ”, Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Toulouse, 2007.

[21] N. Akkari, “*Contribution à l’Amélioration de la Robustesse de la Commande d’une Machine Asynchrone à Double Alimentation*”, Thèse de Doctorat, Université de Batna, 2010.

[22] I. Hamzaoui, “*Modélisation de la Machine Asynchrone à Double Alimentation en Vue de son Utilisation Comme Aérogénérateur* ”, Mémoire de Magister, ENP Alger, 2008.

[23] A. Habbadi, “ *Commande Numérique d’une Machine Asynchrone Alimentée par un Onduleur de Tension MLI : Nouvelle Structure d’Autopilotage* ”, Livre Publié en 1988.

[24] M. boutoubat , L. mokrani et M. Machmoum , “*Control of a Wind Energy Conversion*

System for Active Power Generation and Harmonic Filtering”, ICIPEE’12, pp.14-16,2012

- [25] J. Slotine, J. E et W. Li, “*Applied Nonlinear Control*”. London: Prentice-Hall, Inc. 1991.
- [26] O. Mahmoudi, N. Madani, M.F. Benkhoris et F. Boudjema, “*Cascade Sliding Mode Control of a Field Oriented Induction Machine Drive*”, The European Physical Journal, 1999.
- [27] A. Kerboua, “*Commandes et Observateur par Mode de Glissement : Application à une Machine Asynchrone Alimentée en Tension*”, Thèse de Magister, ENP ,1999.
- [28] P. Lopez et A.S. Nouri, “ *Théorie Élémentaire et Pratique de la Commande par les Régimes Glissants*”, Springer, 2006.
- [29] H. Bühler, “*Réglage par Mode de Glissement* ”, Traité d’Electricité, 1ère édition, presses, 1991.
- [30]. A. Levant, “*Sliding Order and Sliding Accuracy in Sliding Mode Control*”, International Journal of Control, Volume 58, no 6, pp. 1247–1263, 1993.
- [31] I. Deghboudj, “*Commande des System Non-Linéaire par Mode Glissant d’Ordre Supérieur* ”, Thèse de Magister en Electronique, Université de Constantine 1, 2011.
- [32] A. Boussayoud et D. Bouhbel, “ *Synthèse par OEP des Commandes PID et PID Floue pour la Stabilisation d’un Quadrirotor* ”, Mémoire de PFE en Automatique et Informatique Industriel, Université de Jijel, 2013.
- [33] E. H. Mamdani, “*Application of Fuzzy Logic to Approximate Reasoning Using Linguistic Synthesis*”, IEEE Trns. Computers, Volume.26, No. 12, pp.1182-1191.1997.
- [34] R.M. Tong, “*A Retrospective View of Fuzzy Control Systems*”, Fuzzy Sets and systems, vol.14, pp.199-210, 1984.
- [35] J.M. Mendel, “*Fuzzy Systems for Engineering: A Tutorial*”, pro IEEE. vol.83, no.3, pp.347-377 Mar. 1995.
- [36] R.J. Wai, “*Fuzzy Sliding-Mode Control Using Adaptive Tuning Technique*”, IEEE transactions on industrial electronics, Volume. 54, No 1, 2007.
- [37] A. EL DOR, *Senior Member, IEEE* “ *Perfectionnement des Algorithmes d’optimisation par Essaim Particulaire. Applications en Segmentation d’Images et en Electronique* ”, Thèse de Doctorat en Informatique, Université de Paris-est, 2012.
- [38]. A.R. Conn, K. Scheinberg, et Ph.L. Toint, “*Recent Progress in Unconstrained non-Linear Optimization Without Derivatives*», Mathematical Programming, 79 pp.397–414, 1997.

- [39] A.L. Custódio et L.N. Vicente, “*Using Sampling and Simplex Derivatives in Pattern Search Methods*”. Siam journal on optimization, 18 pp.537–555, 2007.
- [40] W.C. Davidon, “*Variable Metric Methods for Minimization*”. A.E.C.research and development report ANL-5990 (Rev. TID-4500, 14th ed.), 1959.
- [41] R. Fletcher et M.J.D. Powell, “*A Rapidly Convergent Descent Method for Minimization*”, the computer journal, 6 pp.163–168, 1963.
- [42] J. R. Birge et F. Louveaux, “*Introduction to Stochastic Programming*”. Springer-Verlag, New York, 1997.
- [43] P. Kall et S.W. Wallace, “*Stochastic Programming*”, Wiley, Chichester etc., 1994.
- [44] A. Prékopa, “*Stochastic Programming*”, Kluwer academic publishers, Dordrecht, 1995.
- [45] H. Hachimi, “*Hybridations d’Algorithmes Métaheuristiques en Optimisation Globale et Leurs Applications* ”, Thèse de Doctorat en Optimisation, Analyse Numérique, Statistique, Institut National des Sciences Appliquées de Rouen ,2013.
- [46] R. Hassan, B. Cohanin et O. deWeck, “*A Copmarison of Particle Swarm Optimization and the Genetic Algorithm*”, Massachusetts institute of Technology, Cambridge, MA, 02139 Vanderplaats Research and Development, Inc, Colorado Springs, CO, 80906.
- [47] J. Kennedy et R. Eberhart “*Particle Swarm Optimization* ”, Proceedings of IEEE International Conference on Neural Networks IV. pp. 1942–1948. 1995
- [48] S. Mirjalili, S. Zaiton et M. Hashim , “ *A New Hybrid PSOGSA Algorithm for Function Optimization* ” International Conference on Computer and Information Application(ICCIA), 2010.
- [49] E. Rashedi, S. Nezamabadi, et S. Saryazdi, “ *GSA: A Gravitational Search Algorithm*”, Information Sciences, vol. 179, no. 13, pp. 2232-2248, 2009.
- [50] Isaac Newton, “*In Experimental Philosophy Particular Propositions are Inferred From the Phenomena and Afterwards Rendered General by Induction*”, 3rd edition, Andrew Motte's English translation published, volume 2,1729.
- [51] D. Holliday, R. Resnick et J. Walker, “*Fundamentals of Physics*”, John Wiley and Sons, 1993.
- [52] B. Schutz, “*Gravity From the Ground Up*”, Cambridge University Press, 2003.
- [53] R. Mansouri, F. Nasserri et M. Khorrami, “*Effective Time Variation of G in a model Universe With variable Space Dimension*”, Physics Letters 259 pp.194–200, 1999.

[54] Shanhe. Jiang ,Zhicheng. Ji , Yanxia. Shen, “ *A Novel Hybrid Particle Swarm Optimization and Gravitational Search Algorithm for Solving Economic Emission Load Dispatch Problems with Various Practical Constraints*” International Journal of Electrical Power & Energy Systems Volume 55, pp.628–644, 2014.

[55] M. Sabouri et S.-H. Zahiri, “*A Hybrid Gravitational Search Algorithm Genetic algorithm for Neural Network Training*”, Science Direct, Elsevier, Applied Mathematics and Computation 185, pp.1026–1037, 2007.

[56] K.R. Mahmoud et S. Hamad, “*Parallel Implementation of Hybrid GSA-NM Algorithm for Adaptive Beam-Forming Applications*”, Progress In Electromagnetics Research B, Volume 58, 2014.

[57] K. Premalatha et A.M. Natarajan, “*Hybrid PSO and GA Models for Document Clustering*”, Int. J. Advance. Soft Comput. Appl, Volume 2, No. 3, 2010.

[58] A. Ahmed, A. Esmine et S. Matwin, “*HPSOM: A Hybrid Particle Swarm Optimization Algorithm With Genetic Mutation*”, International Journal of Innovative Computing, Information and Control Volume 9, Number 5, pp. 1919-1934, 2013.

Annexes

Annexe A

A.1 Transformation Triphasée – Biphasée

A.1.1. Changement de repère

Le but d'un changement de repère est de rendre l'écriture des équations électriques et mécaniques plus simple à exploiter.

A.1.2. Rappel sur la transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique qui a permis la simplification des équations des machines électriques triphasées. Elle permet de passer d'un système triphasé alternatif à un système diphasé continu.

A.1.3. Passage du repère triphasé au repère de Park

- **Le passage de Concordia (repéré triphasé [a,b,c] – biphase [α, β])**

La transformation utilisée pour calculer les composantes (α, β) dans le repère fixe d'une grandeur triphasée telle que $\underline{X} = (X_a, X_b, X_c)^T$ est:

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} \quad (\text{A.1})$$

La transformation inverse peut donc être obtenue et s'écrit :

$$\begin{bmatrix} X_a \\ X_b \\ X_c \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{2}{3} & 0 & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{1}{3} & \frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{1}{\sqrt{3}} & \frac{\sqrt{2}}{3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \\ X_0 \end{bmatrix} \quad (\text{A.2})$$

La transformation de CONCORDIA est un cas particulier de la transformation modifiée de Park,

- **Repère fixe (α, β) – Repère tournant (d, q)**

La transformation des grandeurs biphases du repère fixe (α, β) vers le repère tournant (d, q) s'exprime par :

$$\begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{A.3})$$

θ : est l'angle entre le repère biphase fixe et le repère tournant (d, q)

La transformation inverse qui permet de passer de variables exprimées dans le repère biphase (d, q) vers des variables exprimées dans le repère (α, β) est :

$$\begin{bmatrix} X_\alpha \\ X_\beta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_d \\ X_q \end{bmatrix} \quad (\text{A.4})$$

A.1.4. Choix du référentiel

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

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

A.1.4.1. Référentiel lié au stator

Dans ce cas les repères (d, q) sur le stator. Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (α, β) Ce système est utilisé pour étudier les régimes de démarrage et de freinage des machines électriques.

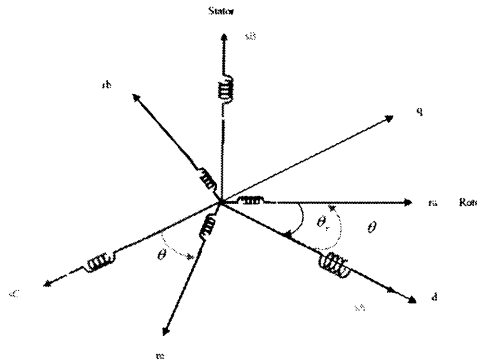


Figure A.1 : Les repères (d, q) liés au stator.

$$\theta_s = 0$$

et

$$\theta_s = \theta_r + \theta \Rightarrow \theta_r = -\theta$$

$$\frac{d\theta_s}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_r}{dt} = -\frac{d\theta}{dt} = -\omega_r$$

A.1.4.2. Référentiel lié au rotor

Dans ce cas les repères (d, q) sur le rotor, le système d'axes (d, q) est immobile par rapport au rotor et tourne avec la vitesse $\omega = \omega_s$

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

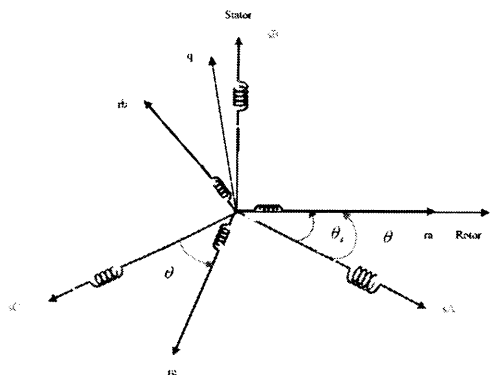


Figure A.2 : Les repères (d, q) liés au rotor.

$$\theta_r = 0$$

$$\theta_s = \theta_r + \theta \Rightarrow \theta_s = \theta$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta_s}{dt} = \frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

A.1.4.3. Référentiel lié au champ tournant

Dans ce cas les repères (d, q) sur le champ tournant. Ce référentiel est appelé aussi système d'axes (X,Y), il tourne avec la vitesse du champ électromagnétique,

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$$

$$\theta_s = \theta_r + \theta \Rightarrow \theta_r = \theta_s - \theta$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - \frac{d\theta}{dt} = \omega_s - \omega = g\omega_s$$

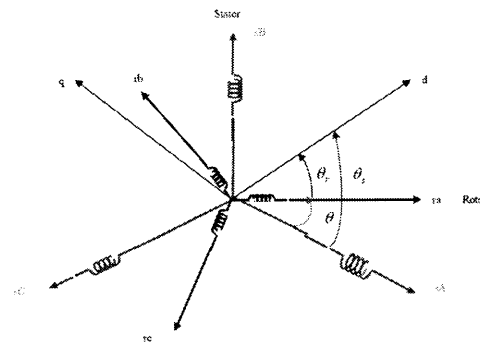


Figure A.3 : Les repères (d, q) liés au champ tournant.

A.2. Paramètre de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation « GADA »

Paramètres de la MADA	
Puissance p_e	7.5 kW
Résistances statorique R_s	0.455 Ω
Résistances rotorique R_r	0.62 Ω
Inductance statorique L_s	0.084 H
Inductance rotorique L_r	0.081 H
Inductance mutuelle M	0.078 H
Moment d'inertie J	0.3125 Kg. m ²
Nombre de pair de pôles P	2
Coefficient de frottements f	0.00673 N. m. s/rad
Fréquence nominale f_n	50 Hz
La vitesse nominale Ω_n	157 Rad/s

A.3. Paramètres de l'éolienne

paramètres de La turbine	
Puissance (KW)	7.5 KW
Nombre de pales	3
Diamètre de la turbine	3 m
Gain de multiplicateur	8

A.4. Paramètre des régulateurs dans la Simulation

A.4.1. contrôle linéaire

- Vitesse : $K_p = 10, K_i = 5$
- Courant I_{dr} : $K_p = 5, K_i = 3$
- Courant I_{qr} : $K_p = 15, K_i = 10$

A.4.2. contrôle par mode glissant

- Vitesse : $K_{11} = 10, K_{12} = 5$
- Courant I_{dr} : $K_{01} = 5000, K_{11} = 1000$
- Courant I_{qr} : $K_{02} = 5000, K_{12} = 1000$

A.4.3. Paramètres de MGOS

- Vitesse : $K_p = 10, K_i = 5$
- Courant I_{dr} : $\gamma_1 = 1400, \Lambda_1 = 550$
- Courant I_{qr} : $\gamma_2 = 1400, \Lambda_2 = 550$

A.4.4. Paramètres de Modes Glissants Floue

- Vitesse : $K_p = 10, K_i = 5$
- Courant I_{dr} : $\lambda_1 = 5000, \alpha_1 = 50, K_{11} = 1000$
- Courant I_{qr} : $\lambda_2 = 5000, \alpha_2 = 50, K_{12} = 1000$

A.4.5. Paramètres optimisé par PSO de la commande Mode Glissant Floue

- Vitesse : $K_p = 10, K_i = 5$
- Courant I_{dr} : $\lambda_1 = 7821.06, \alpha_1 = 7.34, K_{11} = 1000$
- Courant I_{qr} : $\lambda_2 = 1998.77, \alpha_2 = 18.48, K_{12} = 1000$

A.4.6. Paramètres optimisé par GSA de la commande Mode Glissant Floue

- Vitesse : $K_p = 10, K_i = 5$
- Courant I_{dr} : $\lambda_1 = 1838.39, \alpha_1 = 2.53, K_{11} = 1000$
- Courant I_{qr} : $\lambda_2 = 3575.36, \alpha_2 = 3.65, K_{12} = 1000$

A.4.7. Paramètres optimisé par PSO-GSA de la commande Mode Glissant Floue

- Vitesse : $K_p = 10, K_i = 5$
- Courant I_{dr} : $\lambda_1 = 4168.45, \alpha_1 = 3.82, K_{11} = 1000$
- Courant I_{qr} : $\lambda_2 = 9430.85, \alpha_2 = 8.66, K_{12} = 1000$

Annexe B

Preuve de stabilité et convergence du mode glissant d'ordre supérieur

Considérons le système dynamique régi par l'équation

$$\dot{S} = a + bu \quad (\text{b.1})$$

Et supposant que pour des constants positifs C, K_m, K_M, U_M, q qui vérifient les équations sont

$$|\dot{a}| + U_M |\dot{b}| < C, \quad 0 < K_m < b < K_M, \quad \left| \frac{a}{b} \right| < q U_M, \quad 0 < q < 1 \quad (\text{b.2})$$

La loi de commande de ce contrôleur est

$$\dot{u}_1(t) = \begin{cases} -u & \text{si } |u| > U_M \\ -\Lambda \text{sign}(S) & \text{si } |u| \leq U_M \end{cases} \quad (\text{b.3})$$

$$u(t) = -\gamma |S|^{\frac{1}{2}} \text{sign}(S) + \int \dot{u}_1(t) dt \quad (\text{b.4})$$

Lemme : Avec $K_m \Lambda > C$ et γ suffisamment grand le contrôleur garantit une apparition de mode glissant d'ordre deux $\dot{S} = S = 0$ attractant toutes les trajectoires en un temps fini la commande u arrive à l'intervalle $[-U_M, U_M]$ en un temps fini et reste dans cet intervalle

Une condition suffisante pour ce lemme est

$$\lambda > \sqrt{\frac{2}{K_m \Lambda - C} \frac{(K_m \Lambda + C) K_M (1+q)}{K_m^2 (1-q)}} \quad (\text{b.5})$$

Preuve : Calculant \dot{u} avec $|u| > U_M$ on obtient $\dot{u} = -\frac{1}{2} \gamma \dot{S} |S|^{-\frac{1}{2}} - u$ d'équation (b.2) et (b.3) $\dot{S} u > 0$ avec $|u| > U_M$. Ainsi $\dot{u} u < 0, |\dot{u}| > U_M$ lorsque $|u| > U_M$ et $|u| \leq U_M$ est établi en temps fini, l'équation suivante est vérifiée lorsque $|u| \leq U_M$ et $S \neq 0$:

$$\ddot{x} = \dot{a} + \dot{b}u - b \frac{1}{2} \gamma \frac{\dot{S}}{|S|^{\frac{1}{2}}} - b \Lambda \text{sign}(S) \quad (\text{b.6})$$

$$\frac{2(K_m\Lambda + C)^2}{\gamma^2 K_m^2 (K_m\Lambda - C)} < 1 \quad (\text{b.12})$$

Malheureusement cette inégalité reste insuffisante, pour elle ne comprendre pas la possibilité du glissement d'ordre 1 capable d'inclure $u \in [-U_M, U_M]$ c'est facile de voir que tel mode n'est pas possible pour $S > 0, \dot{S} > 0$. Dans ce cas \dot{u} reste négative et ne permet pas le changement de signe. D'autre part de l'équation (b.1) et (b.2) et $|u| \leq U_M$

$$|\dot{S}| = b \left| \frac{a}{b} + u \right| \leq K_m(1 - q)U_M, |\dot{S}| = b \left| \frac{a}{b} + u \right| \leq K_M(1 + q) \quad (\text{b.13})$$

Ainsi $\dot{S}_0 \leq K_M(1 + q)$ et la condition :

$$\frac{\dot{x}_M}{\dot{x}_0} < \frac{K_m(1-q)U_M}{K_M(1+q)U_M} = \frac{K_m(1-q)}{K_M(1+q)} \quad (\text{b.14})$$

Est suffisant pour éviter gardant $u \in [-U_M, U_M]$ dans le mode glissant ce qui coïncide avec (b.5). Ce qui laisse de preuve la convergence en temps fini. il est suffisant de considère un petit intervalle à l'origine lorsque $|u| \leq U_M$ est garantie. Considérons la nouvelle variable $\theta = a + bu_1$. C'est clair que $\theta = \dot{S}$ lorsque $S = 0$ et $u_1 \rightarrow \frac{-a}{b}$ lorsque $t \rightarrow \infty$ ainsi $\theta = b \left| \frac{a}{b} + u_1 \right| \rightarrow 0$ au moment $|u_1| < U_M$ sa dérive $\dot{\theta} = \dot{a} + \dot{b}u_1 - b\Lambda \text{sign}(S)$ satisfait l'inégalité

$$0 < (K_m\Lambda - C) < \dot{\theta} \text{sign}(S) < (K_M\Lambda + C) \quad (\text{b.15})$$

La variation totale dans $\theta = \sum |\dot{x}_i|$ c'est une série géométrique qui converge dans

$$T < \frac{\sum |\dot{x}_i|}{(K_m\Lambda - C)} \quad (\text{b.16})$$