

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées  
Département : Génie Electrique

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté par :

**Talbi Said**

**Bouaziz Mehdi**

En vue de l'obtention du diplôme de **Master** en :

Filière : ELECTROMECHANIQUE

Option : ELECTROMECHANIQUE

**Thème :**

**Commande par logique floue d'une éolienne à base de backstepping sous contraintes structurées et non structurées.**

Devant le jury composé de :

Bensmail Samia	MCB	UAMOB	Président
Ait Abbas Hamou	MCB	UAMOB	Encadreur
Ameziane Sadek	MAA	UAMOB	Examineur

Année Universitaire 2019/2020

# *Remerciements*

## Remerciements

*D'abord merci au DIEU le Tout-puissant de nous avoir donné le courage, la volonté et la patience de mener à terme ce présent travail.*

*On tient à remercier Mr, AIT ABBAS HAMOU Maitre de conférences à l'université de BOUIRA qui a accepté la charge de notre travail, et on lui exprime particulièrement toute notre reconnaissance pour nous avoir fait bénéficier de ses compétences scientifiques, ses qualités humaines et sa constante disponibilité.*

*Nous adressons également nos remerciements, à tous nos enseignants, qui nous ont donné les bases de la science, nous remercions très sincèrement, les membres de jury d'avoir bien voulu accepter de faire partie de la commission de jury.*

*Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à nos familles, nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenu et encouragé au cours de la réalisation de ce mémoire.*

*Merci à tous et à toutes.*

# *Dédicace*

## *Dédicace*

*C'est avec profonde gratitude et sincères mots, que nous dédions ce modeste travail de fin d'étude à :*

✓ *Nos chers parents, pour leurs sacrifices, et leurs conseils judicieux.*

*Nous espérons qu'un jour, nous pourrons leurs rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour nous, que dieu leur prête bonheur et longue vie.*

✓ *Nous dédions aussi ce travail, à nos frères et sœurs, nos familles, nos amis et à tous ceux qui nous sont chers.*

***Mehdi & Saïd***

# *Résumé*

## Résumé

Dans ce mémoire, notre objectif consiste à étudier la génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) associé à une éolienne, en lui appliquant une commande par backstepping complétée par un régulateur fuzzy-logic.

En premier lieu, on a songé à utiliser la commande vectorielle à base de régulateurs de type PI, cette commande résiste peu aux variations paramétriques ainsi qu'aux perturbations externes de la machine.

Pour remédier ce problème, on a eu recours à la technique de backstepping, qui a été ensuite améliorée par la commande intelligente fuzzy-logic, permettant d'obtenir une meilleure efficacité ainsi qu'une meilleure robustesse.

**Mots clés :** génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), éolienne, Commande vectorielle, régulateurs de type PI, Commande par Backstepping, régulateur fuzzy-logic.

## Abstract

In this paper, our objective consists in studying the synchronous permanent magnet generator (PMSG) associated to a wind turbine, applying a backstepping command completed by a fuzzy-logic regulator.

In the first place, we considered using vectorial control based on PI type regulator, this command resists less to parametrics variations and external disturbances of the machine.

To remediate this problem, we passed through the backstepping technique which was then improved by the intelligent fuzzy-logic control allowing to obtain a better efficiency as well as a better robustness.

**Key words:** Permanent magnet synchronous generator (PMSG), wind turbine, vectorial control, PI type regulator, backstepping command, fuzzy-logic regulator.

## ملخص

هدفنا في هذه المذكرة، هو دراسة المولد المتزامن ذي المغناطيس الدائم (GSAP) المرتبط بعنفة رياح (éolienne)، من خلال تطبيق التحكم في الاتجاه العكسي (commande par backstepping) المكمل بمنظم منطقي غامض (Logique floue)

في المقام الأول، فكرنا في استخدام التحكم في المتجهات استناداً إلى المنظمين من نوع (PI)، هذا التحكم مقاومته غير كافية للتغيرات البارامترية وكذلك للاضطرابات الخارجية للجهاز.

لمعالجة هذه المشكلة، لجأنا إلى تقنية التحكم في الاتجاه العكسي (commande par backstepping) والتي تم تحسينها بعد ذلك من خلال التحكم الذكي في المنطق الضبابي، مما يسمح بالحصول على كفاءة أفضل بالإضافة إلى متانة أفضل.

**الكلمات المفتاحية :** المولد المتزامن ذي المغناطيس الدائم (GSAP)، عنفة رياح، المنظمين من نوع (PI) المنطق الضبابي (Logique floue)، تقنية التحكم في الاتجاه العكسي (commande par backstepping)، التحكم في المتجهات.

*Liste des abréviations et des  
symboles*



### Liste des abréviations :

- MSAP : machine synchrone à aimant permanent.
- GSAP : génératrice synchrone a aimant permanent.
- MSAPI : machine synchrone à aimant permanent inséré.
- MSAPS : machine synchrone a aimant permanent surfacique.
- Fuzzy logic : logique floue.
- ENR : énergie renouvelable.
- PI : proportionnelle, intégrale.
- F.é.m. : force électromagnétique.
- PID : proportionnelle intégrale drivé.
- FMM: force magnétomotrice.
- MPPT: Maximum Power Point Tracking.
- NG: negative grand.
- EZ: environ zero.
- PG: positive grand.
- ABS: système antiblocage roues.

### Liste des symboles :

- $V(t)$  : vitesse instantané.
- $dx$  : longueur d'aire.
- $db$  : Décibel.
- $S$  : section.
- $\rho$  : Masse volumique.
- $dE_c$  : Variation énergie cinétiques.
- $P_v$  : Puissance de vent.
- $R$  : rayon.
- $m_0$  : Masse d'air.
- $P_t$  : Puissance turbine.
- $P_{théorique}$  : Puissance théorique.
- $P_{max}$  : Puissance maximale.
- $\lambda$  : vitesse spécifique.

- $\Omega_t$  : vitesse rotationnelle avant multiplicateur.
- $C_p$  : Coefficient de puissance.
- $\eta$  : Rendement aérodynamique.
- $V_n$  : vitesse vent nominale.
- $C_{p_{max}}$  : Coefficient de puissance maximale.
- $\Omega_{tn}$  : vitesse rotationnelle nominale.
- $\lambda_{opt}$  : vitesse spécifique optimale.
- $\beta$  : Angle de calage.
- $C_{aéro}$  : Couple aérodynamique.
- $C_{mec}$  : Couple mécanique.
- $C_{em}$  : Couple électromagnétique.
- $G$  : gain multiplicateur.
- $\Omega_{mec}$  : vitesse rotationnelle mécanique.
- $\Pi$  : Constante d'Archimède=3,14.
- $T_{aéro}$  : Couple aérodynamique.
- $\Omega_g$  : vitesse après multiplicateur.
- $C_g$  : Couple après multiplicateur.
- $J$  : Inertie.
- $C_f$  : Couple résistant du au frottement.
- $f$  : coefficient de frottement.
- $\Omega_m$  : vitesse rotationnelle avant multiplicateur.
- $C_{t_{opt}}$  : Couple optimal de la turbine éolienne (N.m).
- $k_{opt}$  : Coefficient du couple optimal.
- $C_{ref}$  : Couple référence.
- $V_{moy}$  : vitesse moyenne.
- $[V_s]$  : Vecteur tension statorique.
- $[\phi_s]$  : Vecteur flux statorique.

- $[I_s]$  : Vecteur courant statorique.
- $[R_s]$  : Matrice résistance statorique.
- $[\phi_{sf}]$  : Matrice vecteur de flux engendre par l'aimant.
- $\theta$  : Angle de change.
- $[L_s]$  : Matrice inductance statorique.
- $dt$  : Variation de temps.
- $\omega$  : Pulsation électrique.
- $W$  : Vitesse de rotation.
- $P$  : Nombre de pair de pole.
- $C_r$  : Couple résistant.
- $[\rho(\theta)]$  : Matrice de Park.
- $[\rho(\theta)]^{-1}$  : Matrice inverse de Park.
- $V_d$  : Tension direct.
- $V_q$  : Tension quadratique.
- $i_d$  : Courant direct.
- $i_q$  : Courant quadratique.
- $\varphi_d$  : Flux direct.
- $\varphi_q$  : Flux quadratique.
- $\varphi_f$  : Flux engendre par l'aimant.
- $C_{mot}$  : Couple motrice.
- $e_d, e_q$  : Terme découplant.
- $K_p, K_i$  : Gain proportionnelle et intégrale respectivement.
- $i_{dref}$  : Courant direct référence.
- $i_{qref}$  : Courant quadratique référence.
- $\Omega_{ref}$  : vitesse rotationnelle référence.
- $G_{Bo\Omega}$  : Fonction transfert en boucle ouverte vitesse rotationnelle.
- $G_{Bf\Omega}$  : Fonction transfert boucle fermé vitesse rotationnelle.

- $\omega_0$  : Pulsation propre.
- $\xi$  : Coefficient d'amortissement.
- $C_{em\_ref}$  : Couple électromagnétique référence.
- $P_c$  : Puissance générée par la commande.
- $R_s$  : Résistance statorique.
- $L_s$  : Inductance statorique.
- $L_d, L_q$  : Inductance statorique sur l'axe (d, q).
- $R_d, R_q$  : Résistance statorique sur l'axe (d, q).
- $\varphi_d, \varphi_q$  : Flux statorique sur l'axe (d, q).
- $\tau_e$  : Constante de temps électrique.
- $e_{sdq}$  : Terme découplant.
- $k_{iq}, k_{pq}$  : Paramètre régulateur.
- $V_1, V_2$  : Fonction lyapunov.
- $i_d^*, i_q^*$  : Courant de référence.
- $\Omega^*$  : vitesse rotationnelle référence.
- $\varepsilon_d, \varepsilon_q$  : Écart entre courants (d, q) et la consigne.
- $\varepsilon_\Omega$  : Écart entre vitesse rotationnelle et la consigne.
- $\dot{\varepsilon}_d, \dot{\varepsilon}_q, \dot{\varepsilon}_\Omega$  : Dérivés des écarts.
- $k_d, k_q, k_\Omega$  : Gains courant (d, q) et vitesse rotationnelle.
- $U_d, U_q$  : Termes de la commande.

# *Table des matières*

# Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicace.....	II
Résumé.....	III
Liste des abréviations et des symboles.....	IV
Table des matières.....	VIII
Liste des figures.....	XII

## INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale.....	1
----------------------------	---

## CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES ENERGIES RENOUVELABLES

I.1 Introduction.....	4
I.2 Définition des énergies renouvelables.....	4
I.2.1 Les Différentes types de l'énergie Renouvelable.....	4
I.2.1.1 Energie Hydraulique.....	5
I.2.1.2 Energie Solaire.....	6
I.2.1.3 Energie Biomasse.....	7
I.2.1.4 Energie géothermie.....	8
I.2.1.5 L'énergie éolienne.....	9
I.3 la production éolienne.....	10
I.3.1 Historique de l'éolienne.....	10
I.3.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	10
I.3.3 Les différents types d'éoliennes.....	11
I.3.3.1 Eoliennes à axe vertical.....	12
I.3.3.2 Eoliennes à axe horizontal.....	13
I.3.4 Différentes parties d'un aérogénérateur.....	13
I.3.4.1 Le mat.....	13
I.3.4.2 Le rotor.....	14
I.3.4.3 La nacelle.....	14
I.3.5 Eoliennes à vitesse fixe et variable.....	14
I.3.5.1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	15
I.3.5.2 Les éoliennes à vitesse variable.....	15
I.3.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	15
I.3.6.1 Avantages.....	15
I.3.6.2 inconvénients.....	16
I.4 Conclusion.....	16

## **CHAPITRE II : MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION DE L'ENERGIE EOLIENNE.**

II.1 Introduction.....	17
II.2 Modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne .....	17
II.2.1 Modélisation du vent.....	17
II.2.2 Conversion de l'énergie éolienne .....	19
II.2.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique .....	19
II.2.2.2 Loi de Betz.....	20
II.2.2.3 La vitesse spécifique ou normalisée .....	21
II.2.2.4 Coefficient de puissance $C_p$ .....	22
II.2.3 Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne.....	23
II.2.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine .....	24
II.2.3.2 Modèle de la turbine.....	24
II.2.3.3Modèle des pales .....	25
II.2.3.4 Modèle du multiplicateur de vitesse.....	25
II.2.3.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	26
II.2.4 Maximisation de puissance .....	27
II.2.5 Résultats de simulation .....	28
II.2.6 Interprétation des résultats .....	30
II.3 Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP) .....	30
II.3.1 Constitution de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) .....	30
II.3.2 Principe de fonctionnement de la MSAP .....	31
II.3.3 Catégories de la MSAP .....	31
II.3.3.1 Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPS).....	31
II.3.3.2 Machine synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI).....	32
II.3.3.3 Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE) .....	32
II.3.3.4 Aimants à concentration de flux.....	32
II.3.4 Matériaux pour aimants.....	33
II.3.5 Avantages de la MSAP .....	33
II.3.6 Inconvénients de la MSAP .....	34
II.3.7 Les domaines d'application de MSAP .....	34
II.4 Modélisation de la MSAP.....	35
II.4.1 Hypothèses simplificatrices.....	35
II.4.2 Mise en équation de la machine synchrone dans le référentiel (a,b,c) .....	35
II.4.2.1 Equations électriques.....	35
II.4.2.2 Equation mécanique .....	36
II.4.2.3 Equation électromagnétique.....	37

II.4.3	Passage du repère triphasé (a, b, c) au repère biphasé (d,q) .....	37
II.4.3.1	Principe de transformation de Park .....	37
II.4.4	Modélisation de la MSAP dans le repère de Park .....	38
II.4.4.1	Equations électriques .....	39
II.4.4.2	Equations magnétique .....	39
II.4.4.3	Expression de couple électromagnétique .....	39
II.4.4.4	Equation mécanique .....	40
II.4.5	schéma Simulink de la génératrice synchrone à aimants permanents .....	40
II.5	Conclusion .....	41
<b>CHAPITRE III : COMMANDE VECTORIELLE DE LA GSAP.</b>		
III.1	Introduction .....	42
III.2	Commande vectorielle de la GSAP .....	42
III.2.1	Découplage par compensation .....	43
III.3	Systèmes de régulation .....	44
III.3.1.	Régulation des courants .....	45
III.3.2.	Régulation de la vitesse .....	47
III.4	Avantages et inconvénients de la commande vectorielle.....	49
III.4.1	Les avantages .....	49
III.4.2	Les inconvénients.....	49
III.5	Structure complète de la commande vectorielle de la GSAP.....	49
III.6	Résultats de simulation et interprétation .....	50
III.6.1	Test Sans application de contraintes .....	50
III.6.2	Test Avec application de contraintes.....	52
III.7	Conclusion.....	55
<b>CHAPITRE IV : COMMANDE BACKSTEPPING-FUZZY D'UNE MSAP.</b>		
IV.1	Introduction .....	56
IV.2	Commande par la méthode backstepping .....	56
IV.2.1	Historique de la commande par la méthode backstepping .....	56
IV.2.2	Principe de la commande Backstepping.....	57
IV.2.2.1	Fonction de Lyapunov.....	57
IV.2.3	Conception de la commande Backstepping.....	58
IV.2.3.1	1ère étape Calcul de la première commande virtuelle .....	58
IV.2.3.2	2ème étape - Calcul de la deuxième commande virtuelle.....	59
IV.2.3.3	La 3ème étape - Calcul de la loi de commande finale .....	60
IV.2.4	Application du Backstepping à la commande du MSAP .....	62
IV.2.5	Structure complète de la commande backstepping de la GSAP .....	66
IV.2.6	Résultats de simulation et interprétation .....	67
IV.2.6.1	Test Sans application de contraintes .....	67



IV.2.6.2 Test Avec application de contraintes .....	69
IV.3 La Logique floue .....	71
IV.3.1 Historique de la commande floue .....	71
IV.3.2 Les différentes applications de la logique floue .....	72
IV.3.3 principe de la logique flou .....	72
IV.3.3.1 Théorie Des Ensembles Flous .....	72
IV.3.3.2 Les fonctions d'appartenances.....	73
IV.3.3.3 Les opérateurs de la logique floue.....	74
IV.3.4 Système de commande Flou .....	75
IV.3.4.1 Règles Floues.....	75
IV.3.4.2 La fuzzification .....	76
IV.3.4.3 Le moteur d'inférence .....	76
IV.3.4.4 La défuzzification.....	77
IV.3.5 Application de régulateur par logique floue sur la commande backstepping .....	79
IV.3.6 Structure complète de la commande bacstepping-fuzzy de la GSAP .....	80
IV.3.7 Résultats de simulation et interprétation .....	81
IV.3.7.1 Test Sans application de contraintes .....	81
IV.3.7.2 Test Avec application de contraintes.....	83
IV.4 Etude comparative entre la commande vectorielle, la commande backstepping et la commande backstepping-fuzzy .....	85
IV.4.1 Résultats de simulation et interprétation .....	86
IV.5 Conclusion .....	90
 <b>CONCLUSION GENERALE</b>	
Conclusion generale.....	91
Annexes.....	92
Bibliographie .....	92

# *Liste des figures*

# Liste des figures

<b>Figure I.1.</b> Les Différentes types de l'énergie Renouvelable. [23] .....	5
<b>Figure I.2.</b> Centrale hydroélectrique.[6] .....	6
<b>Figure I.3.</b> panneaux photovoltaïques. [24] .....	7
<b>Figure I.4.</b> Une Centrale Biomasse. [25] .....	8
<b>Figure I.5.</b> Energie géothermique. [26] .....	9
<b>Figure I.6.</b> fermes d'éoliennes. [27] .....	9
<b>Figure I.7.</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent. [3] .....	11
<b>Figure I.8.</b> Différents types d'éoliennes. [3].....	11
<b>Figure I.9.</b> L'éolienne de Savonius [9].....	12
<b>Figure I.10.</b> L'éolienne de Darrieus. [28].....	13
<b>Figure I.11.</b> Constitution d'une éolienne. [10].....	14
<b>Figure II.1.</b> Synoptique de reconstruction du vent. [46] .....	19
<b>Figure II.2.</b> Séquence de vent synthétique.....	19
<b>Figure II.3.</b> Colonne d'air animée d'une vitesse V. [1].....	20
<b>Figure II.4.</b> Tube du courant autour d'une éolienne. [2] .....	20
<b>Figure II.5.</b> Vitesse du vent (V) et vitesse tangentielle ( $\Omega t R_t$ ) [2].....	22
<b>Figure II.6.</b> Coefficient de puissance pour les différents Types d'éoliennes. [35] .....	23
<b>Figure II.7.</b> Différentes parties mécaniques de l'éolienne.[46] .....	23
<b>Figure II.8.</b> Entrées-sorties du modèle de la turbine[9].....	25
<b>Figure II.9.</b> Schéma bloc du modèle des pales.[46] .....	25
<b>Figure II.10.</b> Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse.....	26
<b>Figure II.11.</b> Modélisation de l'arbre de l'aérogénérateur.[46].....	27
<b>Figure II.12.</b> Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne.[46].....	27
<b>Figure II.13.</b> Schéma de la stratégie du contrôle MPPT de la turbine éolienne. ....	28
<b>Figure II.14.</b> Vitesse de la rotation de la turbine $w_g$ (rad/s).....	28

<b>Figure II.15.</b> Coefficient de puissance ( $C_p$ ). .....	29
<b>Figure II.16.</b> Couple de la turbine en (N.m). .....	29
<b>Figure II.17.</b> Puissance de la turbine en (watt). .....	29
<b>Figure II.18.</b> Stator et rotor de la machine à aimant permanent. [30] .....	31
<b>Figure II.19.</b> Différentes structures des rotors des MSAP. [16] .....	33
<b>Figure II.20.</b> Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park. [43] .....	37
<b>Figure II.21.</b> Représentation de la transformation de Park.....	38
<b>Figure II.22.</b> Schéma bloc Simulink de la génératrice synchrone à aimants permanents. ....	41
<b>Figure III.1.</b> Schéma fonctionnel d'un système réglé par un régulateur PI. ....	45
<b>Figure III.2.</b> Boucle de régulation du courant $i_d$ . .....	46
<b>Figure III.3.</b> Boucle de régulation du courant $i_q$ . .....	47
<b>Figure III.4.</b> Boucle de régulation de la vitesse. ....	48
<b>Figure III.5.</b> Schéma bloc de la commande vectorielle de la GSAP. ....	50
<b>Figure III.6.</b> Vitesse de rotation $\Omega$ (rad/s). ....	50
<b>Figure III.7.</b> Couples $C_t$ et $C_{em}$ (N.m). ....	51
<b>Figure III.8.</b> Puissances générées $P_c$ & $P_t$ (Watt). ....	51
<b>Figure III.9.</b> Courant $I_q$ (A). ....	51
<b>Figure III.10.</b> Courant $I_d$ (A). ....	52
<b>Figure III.11.</b> Variations des résistances et inductances en fonction du temps (sec). ....	52
<b>Figure III.12.</b> Vitesse de rotation ( $\Omega$ ) sous contraintes. ....	53
<b>Figure III.13.</b> Couples $C_t$ et $C_{em}$ sous contraintes. ....	53
<b>Figure III.14.</b> Puissances générées sous contraintes. ....	53
<b>Figure III.15.</b> Courant $I_q$ sous contraintes. ....	54
<b>Figure III.16.</b> Courant $I_d$ sous contraintes. ....	54
<b>Figure IV.1.</b> Structure interne du bloc régulateur Backstepping. [12] .....	61
<b>Figure IV.2.</b> Structure de la commande de la GSAP par backstepping. ....	66

<b>Figure IV.3.</b> schéma bloc de la commande backstepping. ....	67
<b>Figure IV.4.</b> Vitesse de rotation $\Omega$ (rad/s). ....	67
<b>Figure IV.5.</b> Couples $C_t$ et $C_{em}$ (N.m). ....	68
<b>Figure IV.6.</b> Puissances générées $P_c$ & $P_t$ (Watt). ....	68
<b>Figure IV.7.</b> Courant $I_q$ (A). ....	68
<b>Figure IV.8.</b> Courant $I_d$ (A). ....	69
<b>Figure IV.9.</b> Vitesse de rotation ( $\Omega$ ) sous contraintes. ....	69
<b>Figure IV.10.</b> Couples $C_t$ et $C_{em}$ sous contraintes. ....	70
<b>Figure IV.11.</b> Puissances générées sous contraintes ....	70
<b>Figure IV.12.</b> Courant $I_q$ sous contraintes. ....	70
<b>Figure IV.13.</b> Courant $I_d$ sous contraintes. ....	71
<b>Figure IV.14.</b> Différentes formes des fonctions d'appartenance.[47] ....	73
<b>Figure IV.15.</b> Exemple d'opérations sur des ensembles flous. [47] ....	74
<b>Figure IV.16.</b> Schéma synoptique du système flou. [47] ....	75
<b>Figure IV.17.</b> représentation de la fonction d'appartenance de l'erreur. ....	79
<b>Figure IV.18.</b> représentation de la fonction d'appartenance de la variation d'erreur. ....	79
<b>Figure IV.19.</b> fonction d'appartenance du contrôle. ....	80
<b>Figure IV.20.</b> Structure de la commande de la GSAP par backstepping-fuzzy. ....	80
<b>Figure IV.21.</b> Structure de la commande backstepping-fuzzy. ....	81
<b>Figure IV.22.</b> Vitesse de rotation $\Omega$ (rad/s). ....	81
<b>Figure IV.23.</b> Couples $C_t$ et $C_{em}$ (N.m). ....	82
<b>Figure IV.24.</b> Puissances générées (Watt). ....	82
<b>Figure IV.25.</b> Courant $I_q$ (A). ....	82
<b>Figure IV.26.</b> Courant $I_d$ (A). ....	83
<b>Figure IV.27.</b> Vitesse de rotation( $\Omega$ ) sous contraintes. ....	83
<b>Figure IV.28.</b> Couples $C_t$ et $C_{em}$ sous contraintes. ....	84

<b>Figure IV.29.</b> Puissances générées sous contraintes. ....	84
<b>Figure IV.30.</b> Courant $I_q$ sous contraintes.....	84
<b>Figure IV.31.</b> Courant $I_d$ sous contraintes.....	85
<b>Figure IV.32.</b> Structure finale de la commande bacstepping-fuzzy de la GSAP (comparaison) .....	86
<b>Figure IV.33.</b> Vitesse de rotation $\Omega$ (rad/s). ....	86
<b>Figure IV.34.</b> Couples $C_t$ et $C_{em}$ (N.m).....	87
<b>Figure IV.35.</b> Puissances générées (Watt).....	87
<b>Figure IV.36.</b> Courant $I_q$ (A). ....	87
<b>Figure IV.37.</b> Courant $I_d$ (A). ....	88
<b>Figure IV.38.</b> Vitesse de rotation ( $\Omega$ ) sous contraintes. ....	88
<b>Figure IV.39.</b> Couples $C_t$ et $C_{em}$ sous contraintes. ....	89
<b>Figure IV.40.</b> Puissances générées sous contraintes. ....	89
<b>Figure IV.41.</b> Courant $I_q$ sous contraintes.....	89
<b>Figure IV.42.</b> Courant $I_d$ sous contraintes.....	90

## Liste des tableaux

<b>Table IV.1.</b> Matrice d'inférences .....	78
---	----

***INTRODUCTION***  
***GENERALE***

# Introduction générale

---

## Introduction générale

Les énergies renouvelables ou EnR ne représentent qu'environ 20% de la production mondiale d'électricité ; en excluant l'hydroélectricité, ce taux tombe à 2%. Dans un contexte de crise énergétique mondiale sous-tendue par l'impératif d'un développement durable (problèmes environnementaux, épuisement des ressources fossiles,...), Les défis de futur énergétique nécessiteraient le développement des EnR comme sources de substitution, propres et inépuisables. Ces dernières existent sous plusieurs formes, on peut citer par exemple : l'hydraulique, le solaire, la géothermique, la biomasse et l'éolienne qui fait l'objet de notre étude. Parmi les ressources d'énergie renouvelables, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour pallier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante [1].

Les systèmes éoliens ont recours à plusieurs types de génératrices pour convertir l'énergie mécanique de l'arbre éolien en énergie électrique. En raison de la complexité des systèmes de conversion éolienne, plusieurs obstacles sont rencontrés, dont : la nécessité d'un multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice, et la non constance de la vitesse du vent [46] .

Différents types de génératrices peuvent être utilisés pour convertir l'énergie mécanique produite par le mouvement de l'arbre éolien en énergie électrique. Les génératrices synchrones à aimants permanents, pris de plus en plus la prédominance sur les autres machines électriques. Ce type de machine permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques, cela par élimination du multiplicateur de vitesse, ce qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien. La machine synchrone à aimants permanents est également caractérisée par un couple volumique élevé, une inertie très faible. Toutes ces caractéristiques offrent à la machine synchrone à aimants permanents des performances intéressantes et une meilleure contrôlabilité [4].

Il existe de nombreux principes de commande des machines synchrones à aimants permanents (MSAP) parmi lesquelles la méthode du flux orienté (ou pilotage vectoriel). La commande vectorielle proposée par Hasse en 1969 et Blaschke en 1972 permet aux entraînements à courant alternatif d'avoir une dynamique proche de celle des entraînements à courant continu. La commande est en général un contrôle découplé du couple et du flux de la machine. Par conséquent la dynamique de couple peut être très rapide. Depuis, cette méthode



# Introduction générale

---

est à l'origine de plusieurs réalisations industrielles dans les différents domaines comme la robotique, les machines-outils, la traction électrique [47].

Dans ce travail, nous allons nous intéresser à étudier des stratégies de commande permettant l'optimisation de l'énergie extraite par la turbine ainsi que des contrôleurs permettant de commander la puissance électrique fournie au réseau. On propose alors la synthèse d'une loi de commande utilisant une technique réursive, de type Backstepping. Cette commande présente une procédure réursive qui combine entre le choix de la fonction de Lyapunov et la synthèse de la loi de commande. Cette méthode transforme le problème de synthèse de la loi de commande pour le système global en une synthèse de séquence de commande pour des systèmes réduits. En exploitant la flexibilité de ces derniers, le Backstepping peut répondre aux problèmes de régulation, de poursuite et de robustesse avec des conditions moins restrictives que d'autres méthodes [9].

Aujourd'hui, de nouvelles techniques de commande plus compétitives, plus aptes à surmonter les non linéarités des systèmes et plus adaptées à la résolution des problèmes de robustesse sont proposées à la recherche. En particulier, la logique floue (Fuzzy logic) constitue une autre alternative intéressante. Plusieurs avantages lui sont reconnus : le raisonnement proche du raisonnement naturel de l'opérateur, l'indépendance d'une modélisation, la maîtrise des systèmes à réguler avec un comportement non linéaire, l'obtention fréquente de meilleures performances dynamiques et ses qualités intrinsèques de robustesse [47].

L'objectif de notre travail est de concevoir une commande adaptative à base de la commande backstepping-fuzzy d'une génératrice synchrone à aimants permanents afin de surmonter l'effet des incertitudes structurées et non structurées ainsi que les perturbations externes.

Nous repartirons ce travail en quatre chapitres :

- Le premier chapitre comporte un état de l'art sur les énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne avec une présentation de ses différents types, ainsi les éléments constituant un aérogénérateur. Enfin on présente les principaux avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.
- Le second chapitre est consacré à la modélisation du système étudié, à savoir la modélisation de la chaîne de conversion éolienne. Nous allons ainsi présenter le modèle de la GSAP dans le repère naturel triphasé (a,b,c), puis dans le repère biphasé (d,q) en utilisant la transformation de Park.

## Introduction générale

---

- Le troisième chapitre est dédié à la commande vectorielle de la GSAP pour laquelle on utilise des découplages par compensation et des régulateurs PI. Des simulations du système global sous MATLAB/SIMULINK sans et avec contraintes ont été effectuées, ces dernières ayant permis de tester la robustesse de cette commande vis-à-vis des contraintes appliquées.
- Dans le quatrième et dernier chapitre, on se focalisera, dans un premier temps, sur la commande Backstepping à laquelle nous ajouterons, dans un second temps, un régulateur Fuzzy. Des simulations de ces deux cas distincts seront réalisées avec et sans contraintes.

Enfin, une étude comparative entre les diverses commandes étudiées sera réalisée, montrant ainsi l'influence de chaque commande sur la machine. Montrant ainsi l'influence de la commande sur la machine.

- Nous terminerons notre travail par une conclusion générale qui englobera les résultats obtenus au cours de notre étude, ainsi que des perspectives futures.

*CHAPITRE I*  
*GENERALITES SUR LES*  
*ENERGIES*  
*RENOUVELABLES*

# Généralités Sur Les Energies Renouvelables

---

## I.1 Introduction

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables [2]. En effet, les ressources en énergies renouvelables sont devenues parmi les plus importantes priorités de la majorité des pays industrialisés notamment les pays développés. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres [1].

L'énergie éolienne est l'énergie du vent, C'est une énergie plus respectueuse de l'environnement que les énergies classiques telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire. Elle est presque universellement reconnue comme une source d'énergie la plus prometteuse pour produire de l'électricité propre à court et à moyen termes et elle contribue à la préservation de l'environnement [1].

Dans ce chapitre nous allons vous présenter un état de l'art sur les énergies renouvelables, notamment l'énergie éolienne avec présentation de ses différents types, ainsi les éléments constituant un aérogénérateur. Enfin on présente les principaux avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

## I.2 Définition des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables (soleil, vent, eau, biomasse) sont des sources d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérées comme inépuisables à l'échelle de l'homme. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. On peut dire alors qu'une source d'énergie est renouvelable si le fait d'en consommer ne limite pas son utilisation future. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau, et la biomasse génère certains gaz polluants, mais en bien moindre quantité que des carburants fossiles [3].

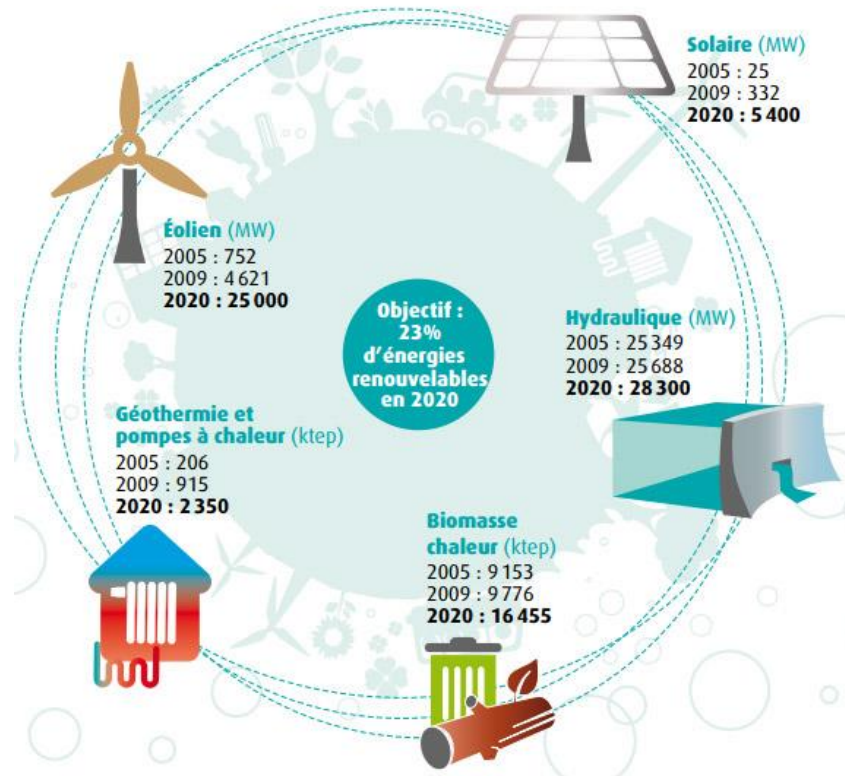
### I.2.1 Les Différentes types de l'énergie Renouvelable

Les énergies renouvelables sont nombreuses la plupart sont issues directement ou indirectement du soleil : son rayonnement réchauffe l'atmosphère terrestre provoque le vent, les courants, le cycle de l'eau... [1].

Il existe cinq types d'énergies renouvelables, produites à partir de différentes sources.  
Figure(I.1)

# Généralités Sur Les Energies Renouvelables

- Energie Hydraulique.
- Energie biomasse.
- Energie de La géothermie.
- Energie Solaire.
- Energie éolienne.



*Figure (I.1) : Les Différentes types de l'énergie Renouvelable. [23]*

## I.2.1.1 Energie Hydraulique

De nombreuses civilisations se sont servies de la force de l'eau, qui représentait une des sources d'énergie les plus importantes avant l'ère de l'électricité. Un exemple connu est celui des moulins à eau, placés le long des rivières. Aujourd'hui, bien que de nombreux sites aient été parfaitement équipés, cela ne suffit plus à compenser l'augmentation vertigineuse de la consommation.

De nos jours l'énergie hydraulique est utilisée au niveau des barrages et sert principalement à la production d'électricité. Le principe en est simple : La force motrice de l'eau fait tourner une turbine qui entraîne un générateur électrique (système comparable à une dynamo). Ensuite, l'électricité obtenue peut être soit utilisée directement ou stockée en batteries, soit

# Généralités Sur Les Energies Renouvelables

injectée dans le réseau de distribution. La puissance développée dépend de deux facteurs la hauteur de la chute d'eau et le débit de l'eau Figure (I.2) [3].

On distingue différents types de centrales hydroélectriques suivant la hauteur de chute [6] :

- Les centrales de basse chute, ils utilisent des turbines de type Kaplan.
- Les centrales de moyenne chute, ils utilisent des turbines de type Francis.
- Les centrales de haute chute, ils utilisent des turbines de type Peloton.

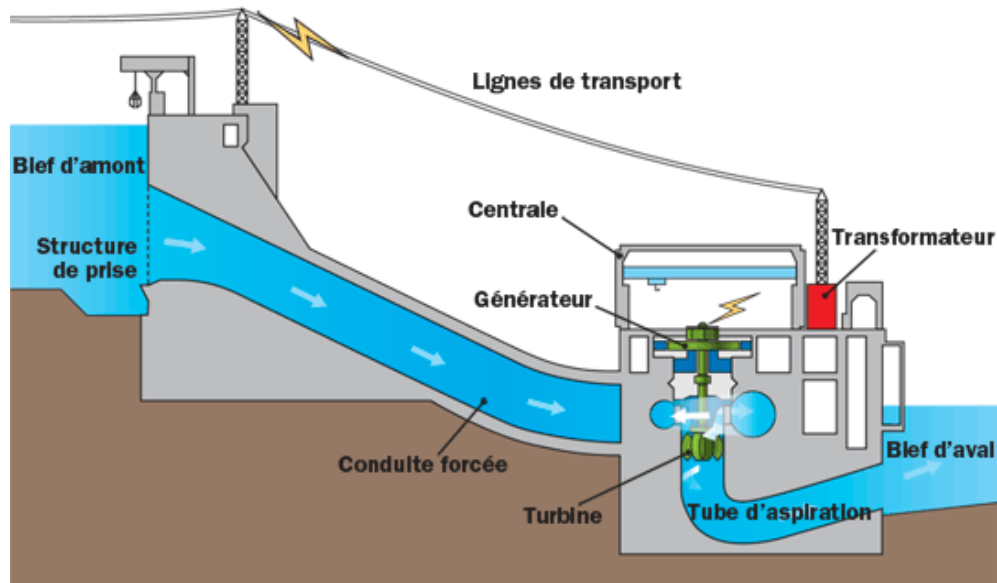


Figure (I.2) : Centrale hydroélectrique.[6]

## I.2.1.2 Energie Solaire

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir des panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires qui permet de récupérer l'énergie du soleil et de produire de l'électricité, sans pièces tournantes et sans bruit et elle n'émet aucun gaz à effet de serre.

L'électricité produite peut être soit stockée dans des batteries pour les installations autonomes, soit injectée dans le réseau. Par sa souplesse et sa facilité d'installation et de maintenance, l'énergie solaire est une solution technique et économique pour l'électrification des sites isolés [3].

- On peut distinguer trois types d'énergie solaire [4]:
  - **L'énergie solaire thermique** : qui consiste tout simplement à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire avec de la vapeur à partir de la chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité.

# Généralités Sur Les Energies Renouvelables

---

- **L'énergie solaire passive** : est une autre forme d'utilisation de l'énergie solaire qui consiste à utiliser directement la lumière pour le chauffage.
- **L'énergie solaire photovoltaïque** : qui consiste à produire directement de l'électricité à partir de la lumière à l'aide des panneaux solaires. Cette forme d'énergie est déjà exploitée dans de nombreux pays, surtout dans les pays ou les régions ne disposant pas de ressources conventionnelles tel qu'aux hydrocarbures ou le charbon. Figure (I.3)



*Figure (I.3) : panneaux photovoltaïques. [24]*

## I.2.1.3 Energie Biomasse

Cette énergie permet de fabriquer de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, ou bien après de nouvelles transformations chimiques biocarburants. La biomasse est une énergie qui peut être polluante; comme le biocarburant et le bois qui donne, quand on le brûle, des gaz à effet de serre [3].

- La filière biomasse est répartie en quatre catégories [7] :
  - La biomasse solide (bois, déchet de bois, déchets agricole, déjections animales).
  - Le biogaz (de décharge, de station d'épuration ou d'unités de méthanisation industrielle ou agricoles).
  - Les déchets municipaux renouvelables solides.
  - La biomasse liquide (bioéthanol, biodiesel, huile végétale).

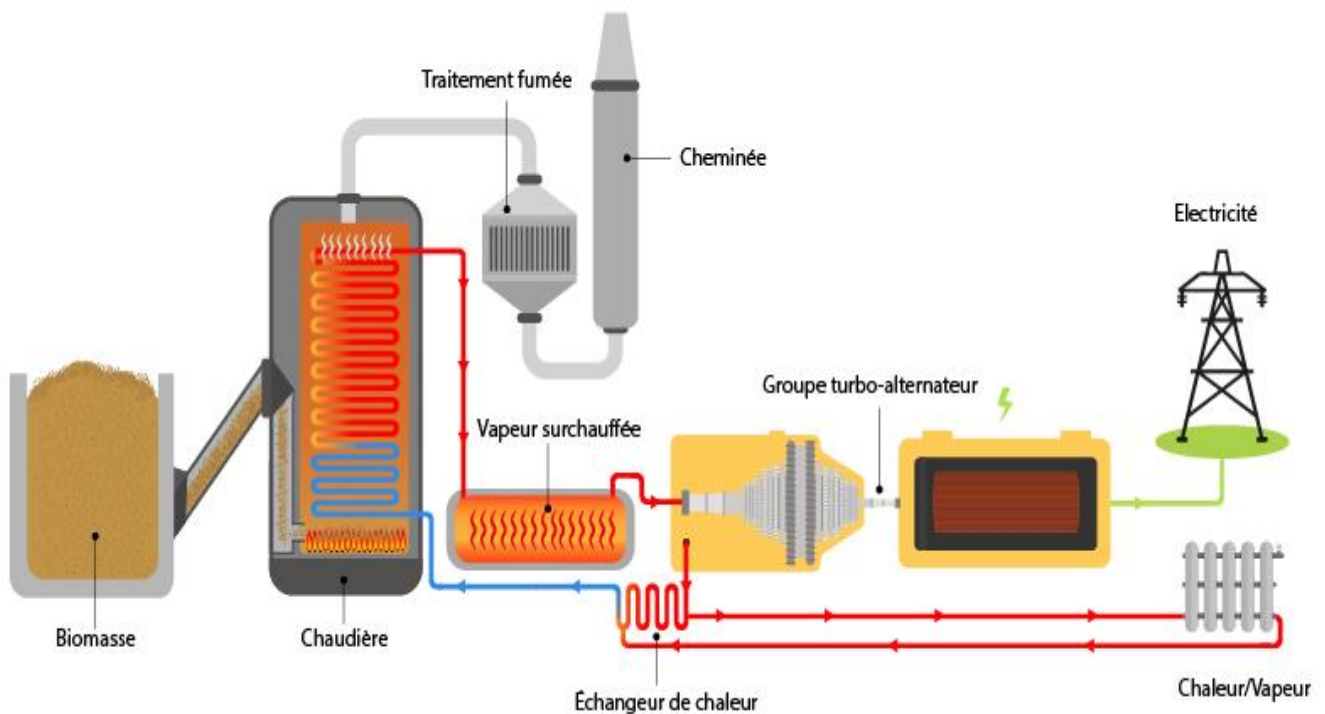


Figure (I.4) : Une Centrale Biomasse. [25]

## I.2.1.4 Energie géothermie

Du grec Géo (terre) et thermos (chaud) l'énergie géothermique est une source d'énergie qui dépend de la chaleur de la terre. Elle provient principalement de la désintégration des éléments radioactifs naturellement présents dans les roches du sous-sol, Dans certaines roches et à certaines profondeurs circulent, des flux de vapeur et d'eaux chaudes. La température des roches augmente en moyenne de  $1^{\circ}\text{C}$  tous les 30m de profondeur. En certains points du globe, en particulier dans les régions volcaniques, qui correspondent à des intrusions de magma dans la croûte terrestre, cela peut aller jusqu'à  $100^{\circ}\text{C}$  par 100m, A la surface de la terre, cette énergie est en moyenne 10000 fois plus faible que l'énergie fournie par le soleil [3].

La production de l'électricité géothermique consiste à convertir la chaleur des nappes aquifères haute température (de  $150$  à  $350^{\circ}\text{C}$ ) à l'aide de turboalternateur, la géothermie est essentiellement développée dans les zones volcaniques [7].



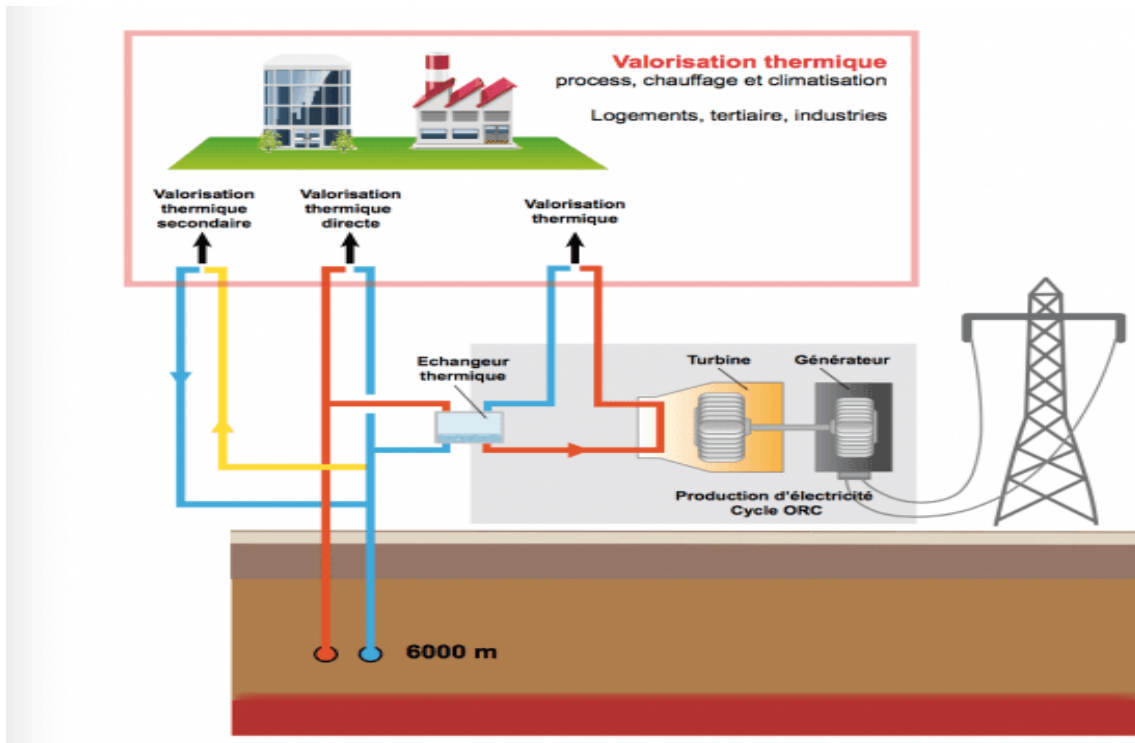


Figure (I.5) : Energie géothermique. [26]

## I.2.1.5 L'énergie éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [2].

Les éoliennes sont une forme très ancienne d'exploitation du vent. Une importante évolution 1970-2000. Une éolienne qui est un dispositif pour extraire de l'énergie cinétique du vent en la transformant en énergie mécanique ou en énergie électrique. En enlevant une certaine partie de son énergie cinétique le vent doit ralentir mais seulement cette masse d'air qui traverse le disque du rotor sera affectée [5].



Figure (I.6): fermes d'éoliennes. [27]

## I.3 la production éolienne

### I.3.1 Historique de l'éolienne

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de cent ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale actuellement [3].

Probablement, la première éolienne a été construite en Ecosse par le professeur James Blyth en 1887. L'année suivante en 1888, la première éolienne opérationnelle a été développée par Bruch et ses collègues et installée sur la côte atlantique [8]. Par la suite, le développement réel de l'énergie éolienne comme une source d'électricité a commencé et avancé étape par étape. Au cours des années 1920-1930, la popularité des éoliennes n'a cessés d'augmenter et a atteint son plus haut sommet à la fin de cette période avec plus de 600.000 unités de turbines éoliennes installées dans les fermes et les zones rurales des Etats-Unis [8].

Le marché de l'éolien a commencé à ralentir à la fin des années 1950, ceci étant causé par le développement des lignes électriques à grande échelle. Mais avant cela, la plupart des fermes utilisaient l'électricité éolienne équipée de la turbine à axe horizontal au vent construit en 1941. L'emploi de l'énergie éolienne a connu une hausse considérable au cours de la dernière décennie, la production mondiale à doubler tout les 3,5 ans depuis le début du 21ème siècle [8].

### I.3.2 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

Cette conversion se fait en deux étapes [8]:

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit de l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui la transmet ensuite sur les réseaux électrique.

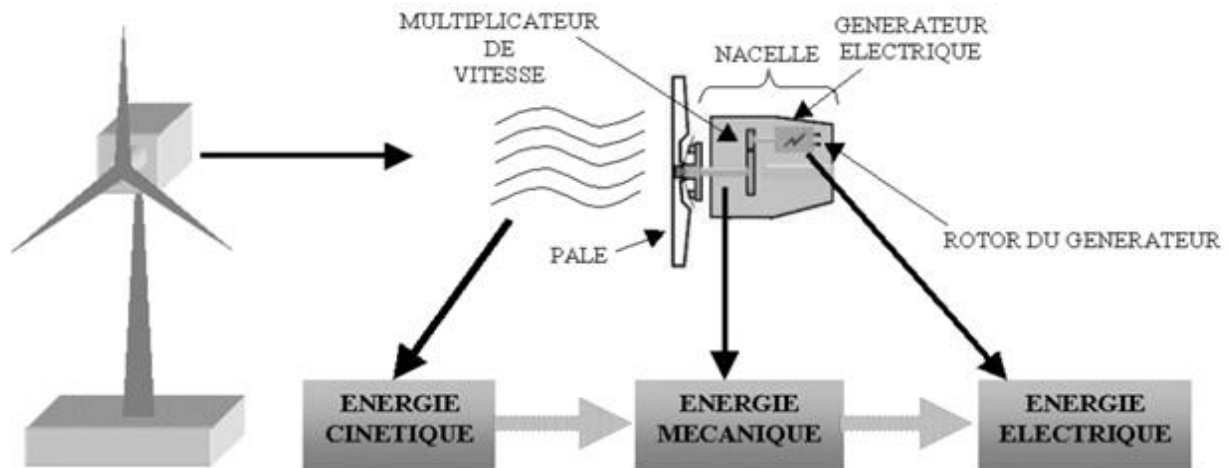


Figure (I.7): Conversion de l'énergie cinétique du vent. [3]

### I.3.3 Les différents types d'éoliennes

On classe les éoliennes suivant la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice. Il existe principalement deux types de turbines éoliennes [2]:

- Turbines éoliennes à axe vertical.
- Turbines éoliennes à axe horizontal.



a) Eoliennes à axe horizontal

b) Eoliennes à axe vertical

Figure (I.8): Différents types d'éoliennes. [3]

## I.3.3.1 Eoliennes à axe vertical

L'axe de rotation de cette turbine éolienne est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique. La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol Figure (I.8) [9].

Il y a deux types d'éolienne à axes vertical :

### ➤ Le rotor de Savonius

Dont le fonctionnement est basé sur le principe de "traînée différentielle », Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur [1].

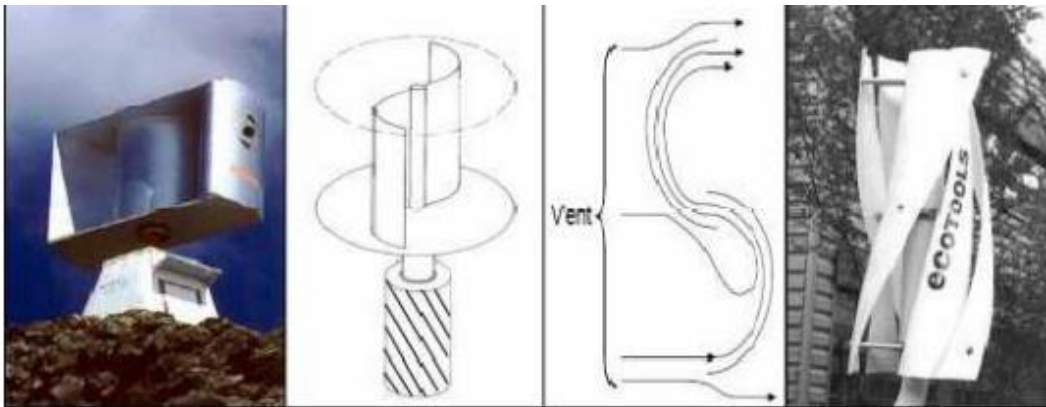


Figure (I.9): L'éolienne de Savonius [9].

### ➤ Le rotor de Darrieus

L'éolienne de rotor Darrieus fonctionne grâce à l'utilisation de la force de portance qui se base sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces donne alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Le couple de démarrage de ce type d'éoliennes est proche de zéro, ce qui implique lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe, soit montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur Figure (I.10)

[9].

Eolienne Darrieus



*Figure(I.10): L'éolienne de Darrieus. [28]*

### I.3.3.2 Eoliennes à axe horizontal

Ce type d'éolienne est plus répandu dans le monde. Ce système se base sur la principale de portance aérodynamique, les pales sont profilées de la même façon qu'une aile d'avion et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine [4].

Dans ce type d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important Figure (I.8) [1].

### I.3.4 Différentes parties d'un aérogénérateur

La majorité des éoliennes installées dans le monde sont de turbine à axe horizontal. On peut considérer trois composants essentiels dans ce type d'éolienne [9]:

#### I.3.4.1 Le mat

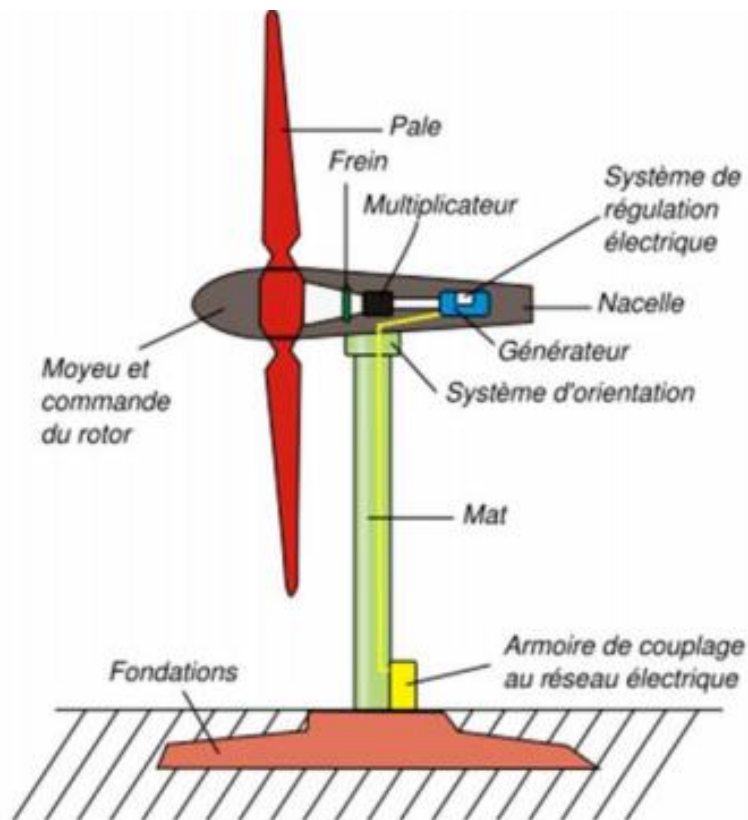
Les mats peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (rotor + nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Le mat atteint une hauteur comprise entre 80 m et 100 m [1].

## I.3.4.2 Le rotor

C'est le capteur d'énergie qui permet de transformer l'énergie du vent reçu en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué par des pales et de l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse [9], Son diamètre détermine la puissance qui pourra être récupérée [8].

## I.3.4.3 La nacelle

C'est la partie essentielle de l'éolienne, elle contient les éléments de transmission mécanique entre le rotor et le générateur, aussi comprenant le multiplicateur et le système de freinage de sécurité ainsi que les équipements de mesures du vent. Elle est liée à la tour par une liaison de type pivot motorisée permettant de choisir son orientation et éventuellement de positionner l'éolienne au vent Figure (I.11) [9].



*Figure (I.11): Constitution d'une éolienne. [10]*

## I.3.5 Eoliennes à vitesse fixe et variable

Les turbines éoliennes peuvent également être classifiées à des turbines à vitesse fixe, et autres à vitesse variable.

## I.3.5.1 Les éoliennes à vitesse fixe

Les turbines à vitesse fixes tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable [9].(Seulement pour les génératrices asynchrones).

## I.3.5.2 Les éoliennes à vitesse variable

Le fonctionnement à vitesse variable permet de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, l'utilisation de convertisseur à base d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est nécessaire. Cette dernière est généralement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [11].

## I.3.6 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux ci ne deviennent pas un frein à son développement [8].

### I.3.6.1 Avantages

- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [8].
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire [9].
- ❖ Les éoliennes requièrent peu de place sur les terres agricoles. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations [1].
- ❖ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [7].
- ❖ Le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte [11].
- ❖ Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [8].
- ❖ ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [3].

# Généralités Sur Les Energies Renouvelables

---

## I.3.6.2 inconvénients

- ❖ Une éolienne toute seule ne produit pas réellement beaucoup de bruit, mais lorsque l'on se retrouve avec un parc éolien le bruit devient de plus en plus désagréable [1].
- ❖ L'impact visuel qui reste un thème subjectif [10].
- ❖ la nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux [2].
- ❖ La qualité de la puissance électrique produite par les Aérogénérateurs n'est pas constante. Donc elle n'est pas toujours très bonne [11].
- ❖ L'impact sur les oiseaux : certaines études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro-turbines [8].

## I.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une vue générale sur les différents types des énergies renouvelables en particulier l'énergie éolienne, Nous avons également consacré ce chapitre à la description des différents types d'éoliennes, leurs principes de fonctionnement, ainsi leurs éléments constitutifs.

Finalement, nous avons citées les principaux avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.



***CHAPITRE II***  
***MODELISATION DE LA***  
***CHAINE DE CONVERSION***  
***DE L'ENERGIE***  
***EOLIENNE.***

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

## **II.1 Introduction**

Ces dernières années le moteur synchrone à aimants permanents est devenu le moteur le plus utilisé dans beaucoup de domaines industriels, Grâce aux progrès de l'électronique de puissance et l'informatique, le moteur synchrone à aimants permanents à pu s'imposer dans les systèmes d'entraînement, C'est ainsi que ces moteurs ont apparus et sont de plus en plus utilisés de nos jours dans plusieurs applications industrielles tel que les équipements domestiques (machine à laver le linge), les équipements de technologie de l'information (DVD drives), Les équipements de soins médicaux et de santé, la propulsion des sous-marins et des véhicules électriques ainsi que les machines-outils et les applications de l'énergie de l'éolienne [12].

Afin d'étudier le dispositif mécanique de la turbine éolienne qui permet d'assurer la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ainsi que celle de l'énergie mécanique en énergie électrique via la génératrice, nous allons, dans ce chapitre, établir un modèle mathématique qui permettra de simuler le comportement de l'éolienne dans un cadre de fonctionnement bien défini.

Dans ce chapitre, Nous allons dans un premier temps, modéliser le vent, puis nous nous intéresserons, dans un deuxième temps, à la modélisation de la turbine et de la machine qui lui sera associé.

Au cours de cette étude, nous nous attacherons à connaître les principaux paramètres de fonctionnement de la turbine, à savoir les coefficients de puissance, le couple et la limite de BETZ.

## **II.2 Modélisation de la chaîne de production d'énergie éolienne**

### **II.2.1 Modélisation de la vitesse du vent**

L'énergie cinétique du vent est l'élément primaire et fondamental du système de conversion d'énergie éolienne. Le vent est un champ de déplacement de masses d'air caractérisé par une vitesse variable et une direction aléatoire. Son déplacement au niveau de la turbine éolienne crée des forces sur les surfaces de ses pales, qui génèrent un mouvement rotatif du dispositif [9].

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, est au cube de la vitesse du vent. Ces fluctuations étant influencées par le déplacement des masses d'air en

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

altitude, mais également par le relief, le type de recouvrement du sol et la stabilité thermique de l'atmosphère. Le vent varie en direction et en intensité, mais pour les besoins du modèle, on se limite à la variation du vent en intensité, dans une seule direction afin de déterminer une séquence valable et représentative de vents réels [3].

La modélisation du vent est importante, que ce soit pour :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne ;
- Définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales ;
- Développer et affiner la modélisation du rotor ;
- Evaluer le potentiel d'énergie utilisable ;
- Fournir une aide pour l'implantation des machines.

La vitesse du vent en un point de l'espace  $V(t)$  est la résultante de deux composantes, l'une  $V_0(t)$  varie lentement et régulièrement sur de plus longues périodes dans un site donné, alors que l'autre  $V_T(t)$  varie en turbulence en fonction de temps. Son expression est donnée par la formule (II.1) [9].

$$V(t) = V_0(t) + V_T(t) \quad (\text{II.1})$$

- $V_T(t)$  Une composante turbulente du vent qui est un processus aléatoire stationnaire (ne varie pas avec la vitesse moyenne du vent).
- $V_0(t)$  Une composante lente : c'est la moyenne de la vitesse du vent variant régulièrement sur de plus longues périodes sur un site donné.

L'aéro-turbine filtre les fluctuations hautes fréquences. On reconstitue à cet effet un filtre passe bas à la composante de turbulence afin que celle-ci reproduise une caractéristique plus proche de la réalité dont la fonction de transfert est donnée par l'expression (II.2). [9]

$$G_f = \frac{1}{1 + \tau \cdot s} \quad (\text{II.2})$$

La valeur de la constante de temps dépend du diamètre du rotor et également de l'intensité de la turbulence du vent et de la vitesse moyenne du vent ( $\tau = 0.11375\text{s}$ ) [9].

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

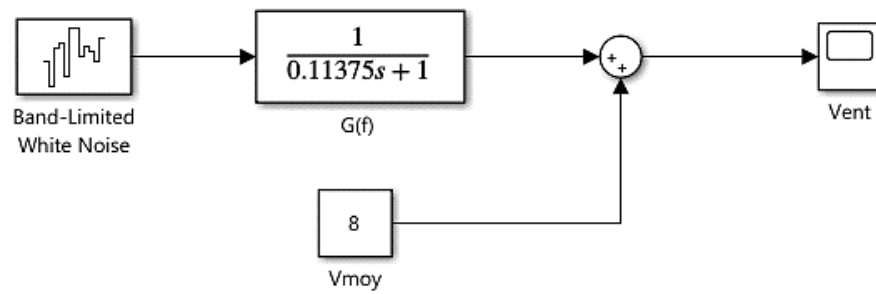


Figure II.1. Synoptique de reconstruction du vent. [46]

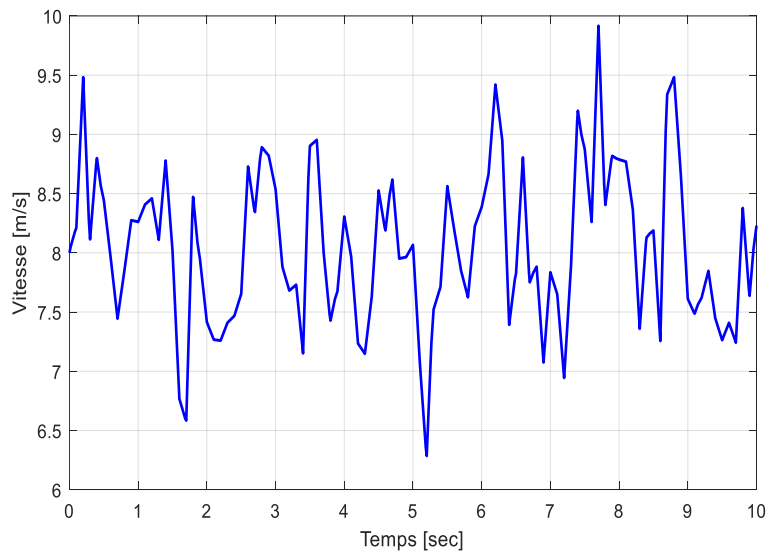


Figure II.2. Séquence de vent synthétique.

La figure précédente (II.2) représente une séquence de vent générée par le modèle Simulink de la figure (II.1) avec une vitesse moyenne de vent  $V_0(t)=8\text{m/s}$ .

## II.2.2 Conversion de l'énergie éolienne

### II.2.2.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur  $dx$ , de section  $S$ , de masse volumique  $\rho$ , animée d'une vitesse  $V$  s'écrit comme suit [1]:

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot dx \cdot v^2 \quad (\text{II.3})$$

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

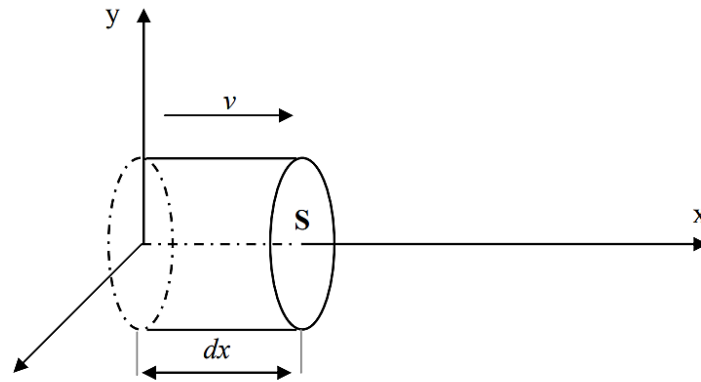


Figure II.3. Colonne d'air animée d'une vitesse  $V$ . [1]

La puissance du vent  $P_v$  extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps. [2]

En supposant  $dx=vdt$ , on déduit l'expression de  $P_v$  : [2]

$$P_v = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II.4})$$

$\rho$ : masse volumique de l'air (en  $\text{Kg/m}^3$ ).

$V$ : vitesse instantanée du vent (en  $\text{m/s}$ ).

$E_c$ : en joules.

$S = \pi \cdot R^2$ : surface balayée par les pâles en  $\text{m}^2$ .

## II.2.2.2 Loi de Betz

La loi de BETZ stipule qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de BETZ pour la première fois. Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (Figure II.4) sur lequel on a représenté la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur  $V_1$  et  $V_2$  en aval [11].

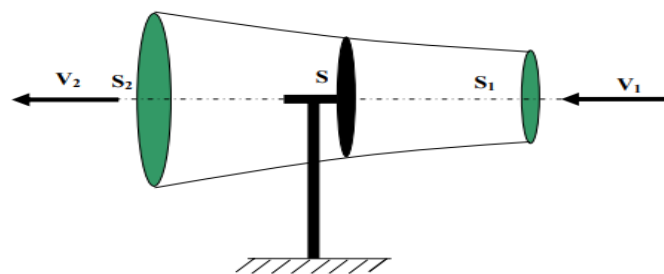


Figure II.4. Tube du courant autour d'une éolienne. [2]

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

---

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en un second est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne [2].

$$m_0 = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II.5})$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval [2].

$$P_t = \frac{m_0 (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.6})$$

En remplaçant l'expression de  $m_0$  dans l'équation de  $P_t$ , on obtient :

$$P_t = \frac{\rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.7})$$

La puissance totale théoriquement disponible sur la surface  $S$  est extraite sans diminution de vitesse de vent en mettant  $V_2=0$  dans l'expression finale de  $P_t$ .

$$P_{théorique} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{II.8})$$

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité.

La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz

$$P_{max} = P_{théorique} * 0.59$$

## II.2.2.3 La vitesse spécifique ou normalisée

On définit la vitesse spécifique ou normalisée  $\lambda$  comme étant le rapport de la vitesse linéaire en bout des pales de la turbine  $\Omega t$  et  $Rt$  sur la vitesse instantanée de vent  $V$  (Figure II.5) et donnée par l'expression suivante : [11]

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{V} \quad (\text{II.9})$$

$R_t$ : Rayon de la surface balayée en m.

$V$ : Vitesse de vent en m/s.

$\Omega t$ : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.

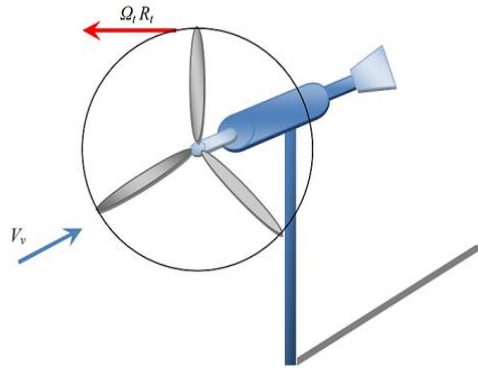


Figure II.5. Vitesse du vent ( $V$ ) et vitesse tangentielle ( $\Omega t R_t$ ) [2]

## II.2.2.4 Coefficient de puissance $C_p$

On définit le coefficient de puissance, le rapport entre la puissance extraite du vent (récupérable) et la puissance totale théoriquement disponible [9].

$$C_p = \frac{P_t}{P_{théorique}} = \frac{\left( \left( 1 + \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \right) \left( 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right) \right)}{2} \quad (\text{II.10})$$

Le coefficient de puissance présente un maximum de  $16/27$  soit  $0,59$ . C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative  $\lambda$  représentant la vitesse relative est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent. [34] On déduit alors le rendement aérodynamique :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p_{\max}} \quad (\text{II.11})$$

$C_{p_{\max}}$  étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance  $C_p$ . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale  $\lambda_{opt}$  pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale  $V_n$  et une vitesse de rotation nominale  $\Omega_{tn}$  [2].

Dans notre cas, l'évolution du coefficient de puissance qui est en fonction de  $\lambda$  et l'angle de calage  $\beta$ , est donné par l'approximation polynomiale suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \sin \left[ \frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (\text{II.12})$$

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

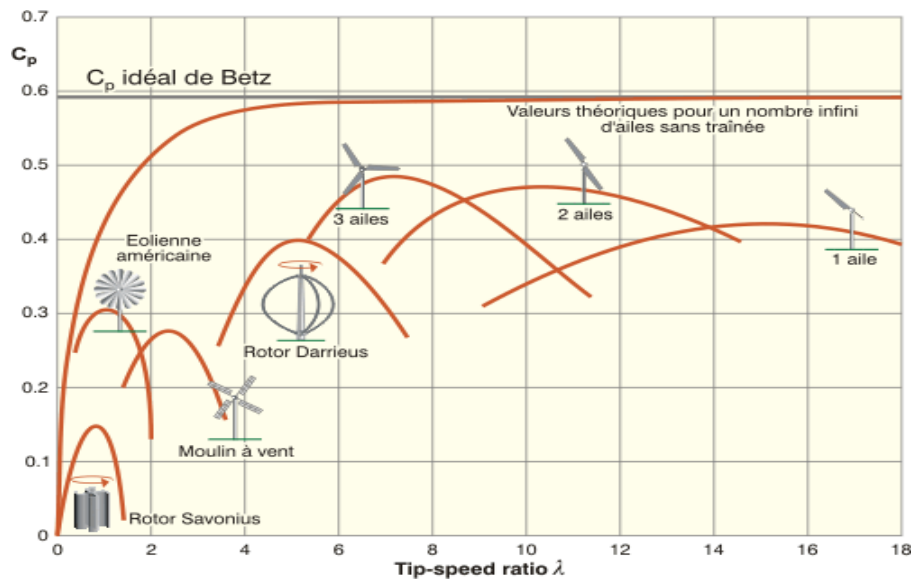


Figure II.6 : Coefficient de puissance pour les différents Types d'éoliennes. [35]

## II.2.3 Modélisation de la partie mécanique d'une éolienne

Dans cette partie, on modélise la turbine éolienne, le multiplicateur de vitesse et l'arbre de transmission :

- La turbine éolienne se compose de 3 pales orientables.
- Le multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique.
- L'arbre est relié la partie mécanique à la partie électrique autrement dit relie la turbine au générateur.

La (figure II.7), ci-dessous représente différents composants de la partie mécanique :

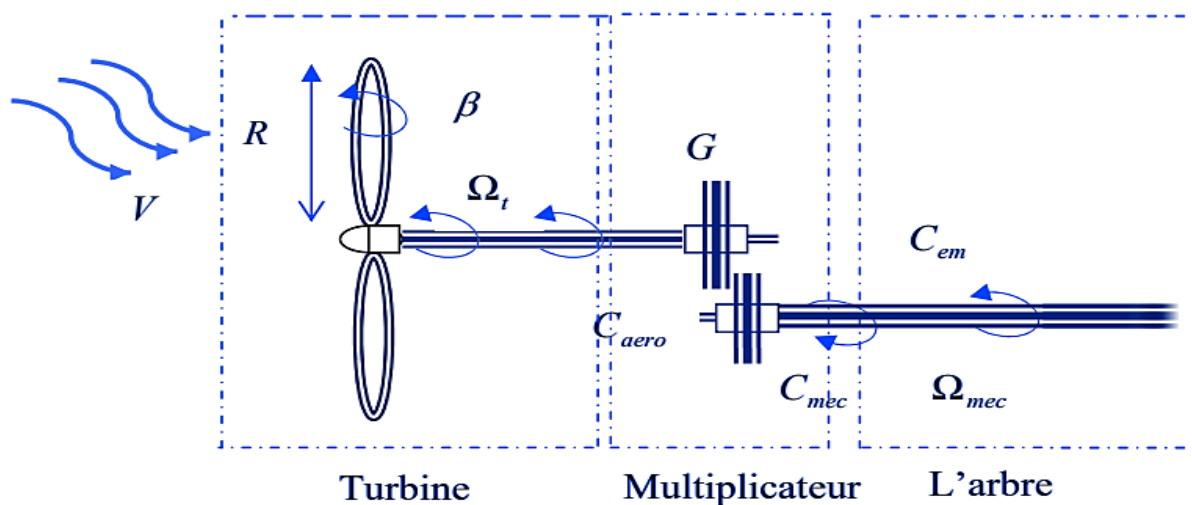


Figure II.7. Différentes parties mécaniques de l'éolienne. [46]



# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

## II.2.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans le cadre d'étude électromécanique sont relativement simples et obéissent aux hypothèses simplificatrices suivantes [36] [37] [38]:

- La vitesse du vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales, ce qui permet de considérer l'ensemble des pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air ( $\delta$ ) est très faible et peut être ignoré.
- Les pertes par frottement du rotor turbine sont considérées négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté génératrice.

## II.2.3.2 Modèle de la turbine

La turbine assure une transformation d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée de trois pales qui pivotent sur les axes d'un angle  $\beta$ . Le vent de vitesse  $V$ , appliqué sur les pales de l'éolienne, entraîne sa mise en rotation et crée une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine [9].

L'expression de la puissance mécanique  $P_T$  disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur, ainsi que celle de son couple  $C_T$  sont données de la manière suivante :

$$P_T = C_p \cdot P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II.13})$$

$$C_T = \frac{P_T}{\Omega_T} = \frac{R \cdot P_T}{\lambda \cdot V} = \frac{C_p}{2\lambda} \rho \pi R^3 V^2 \quad (\text{II.14})$$

$C_T$ : Couple de la turbine éolienne (N.m).

Le coefficient de puissance  $C_p$  représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et dépend également de la caractéristique de la turbine.

Les variables d'entrée et sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit[2] :

- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage.

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes.

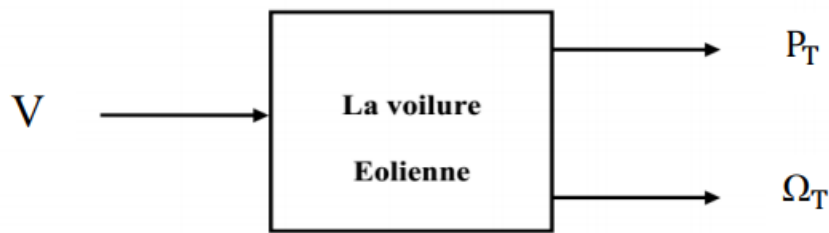


Figure II.8. Entrées-sorties du modèle de la turbine [9].

## II.2.3.3 Modèle des pales

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface des pales.

Le schéma bloc des pales étudiées est représenté en (Figure II.9).

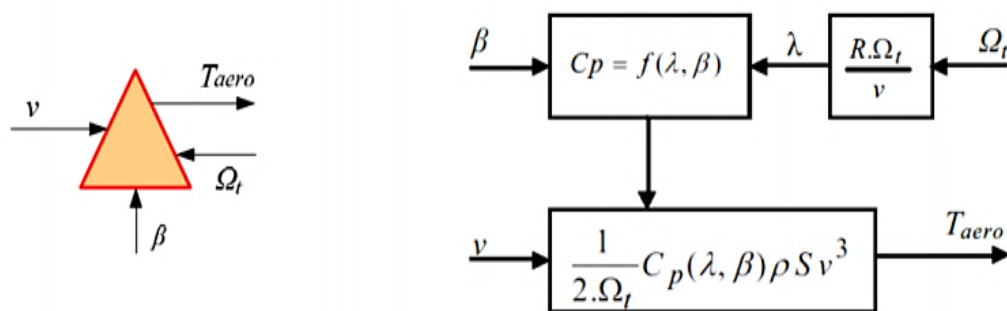


Figure II.9. Schéma bloc du modèle des pales. [46]

## II.2.3.4 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur selon les formules mathématiques suivantes :

$$\Omega_g = G \cdot \Omega_t \quad (\text{II.15})$$

$$C_g = \frac{C_T}{G} \quad (\text{II.16})$$

Ainsi, en remplaçant l'expression (II.14) dans (II.16), on obtient :

$$C_g = \frac{P_T}{\Omega_g} \quad (\text{II.17})$$

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Où :

$\Omega_g$  : Vitesse de rotation après multiplicateur en (rad/s).

$C_g$  : Couple après multiplicateur (N.m).

$G$  : Gain de multiplication.

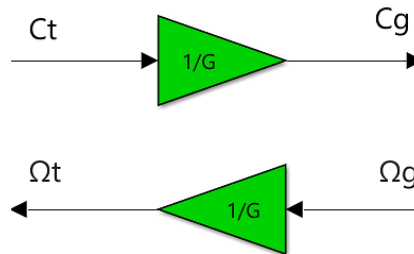


Figure II.10. Schéma bloc du modèle du Multiplicateur de vitesse

## II.2.3.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission

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 [2]:

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} = C_{mec} \quad (II.18)$$

Où :

-  $J$  : L'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice.

Le couple mécanique est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (II.19)$$

-  $C_{em}$  : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

-  $C_g$  : Le couple issu du multiplicateur.

-  $C_f$  : Le couple résistant dû aux frottements, avec :

$$C_f = f \cdot \Omega_g \quad (II.20)$$

On obtient finalement l'équation suivante :

$$J \frac{d\Omega_g}{dt} + f \cdot \Omega_g = C_g - C_{em} \quad (II.21)$$

Où :  $f$  : Le coefficient de frottement.

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

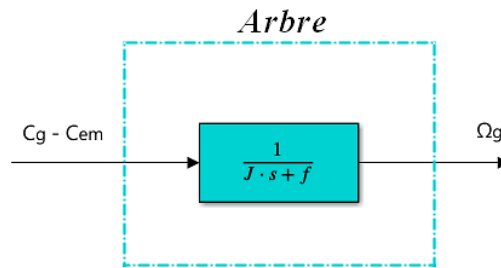


Figure II.11. Modélisation de l'arbre de l'aérogénérateur. [46]

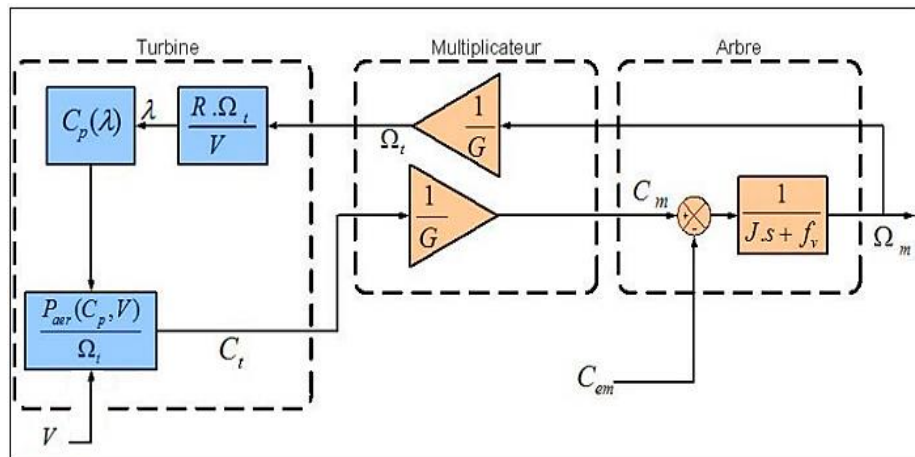


Figure II.12. Schéma bloc du modèle de la turbine éolienne. [46]

## II.2.4 Maximisation de puissance

MPPT classique nous facilite la recherche du point maximum de puissance, en connaissant la caractéristique de la voilure éolienne, cette méthode nous permet de se rapprocher rapidement de l'optimum à l'aide des mesures simples, internes au convertisseur mécano – électrique, c'est-à-dire sans utilisation de capteur de vitesse du vent [39][40].

La courbe spécifique d'une turbine tripale possède une forme en cloche. Le sommet de cette courbe est équivalent à la puissance maximale. Il est caractérisé par la vitesse réduite optimale ( $\lambda_{RS}$ ) et le coefficient de puissance maximal ( $C_p\text{-opt}$ ). La valeur de la vitesse du vent d'après l'équation est égale à [2]:

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V} \quad (\text{II.22})$$

L'expression de la puissance en fonction de la vitesse de la turbine est donnée comme suit :

$$P_t = \frac{1}{2} \cdot \rho C_p(\lambda) \cdot S \cdot \frac{R^3}{\lambda^3} \cdot \Omega_t^3 \quad (\text{II.23})$$

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

En divisant l'expression de la puissance sur la vitesse de rotation, on aura l'expression du

couple: 
$$C_t = \frac{1}{2\lambda^3} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{II.24})$$

On considère que les conditions sont optimales (puissance optimale), donc on peut calculer la valeur optimale du couple à partir de l'équation (II.24).

$$C_{t-opt} = K_{opt} \cdot \Omega_t^2 \quad (\text{II.25})$$

Ou :

$$K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} C_{p,max} \rho \pi R^5 \quad (\text{II.26})$$

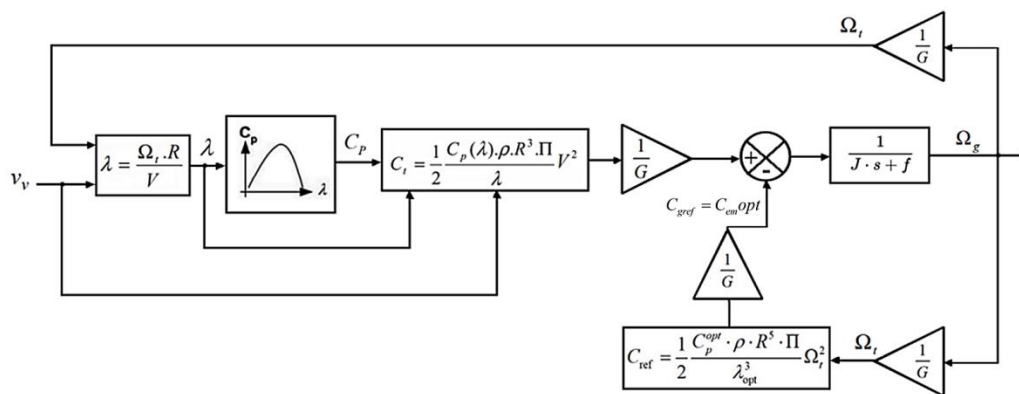


Figure II.13. Schéma de la stratégie du contrôle MPPT de la turbine éolienne. [46]

## II.2.5 Résultats de simulation

Après simulation, pour une vitesse de vent variable et une vitesse moyenne  $V_{moy}=8\text{m/s}$ , nous sommes parvenus aux résultats ci-après :

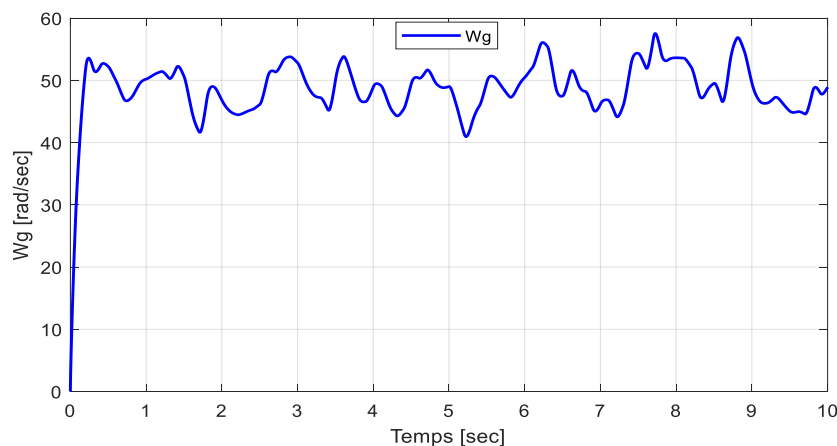
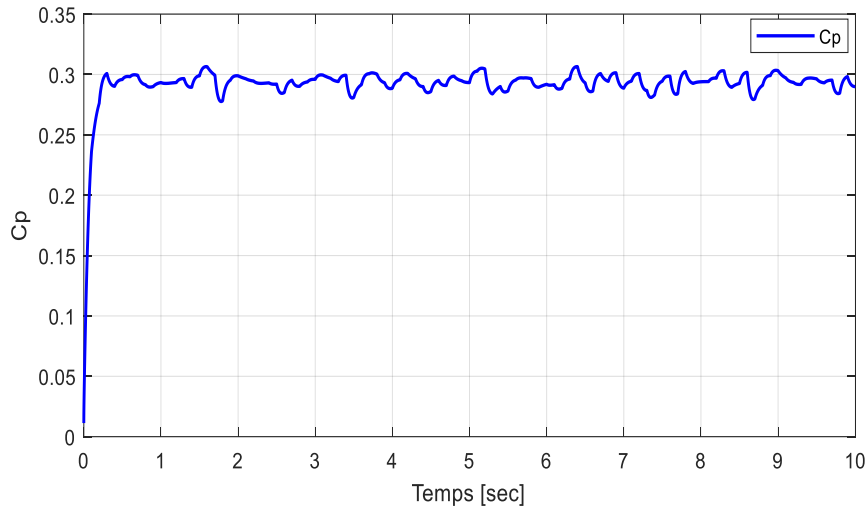
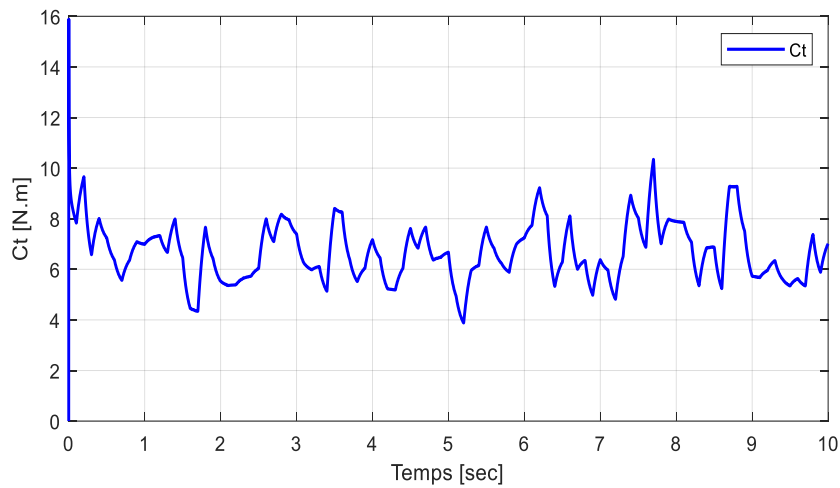


Figure II.14. Vitesse de la rotation de la turbine wg(rad/s).

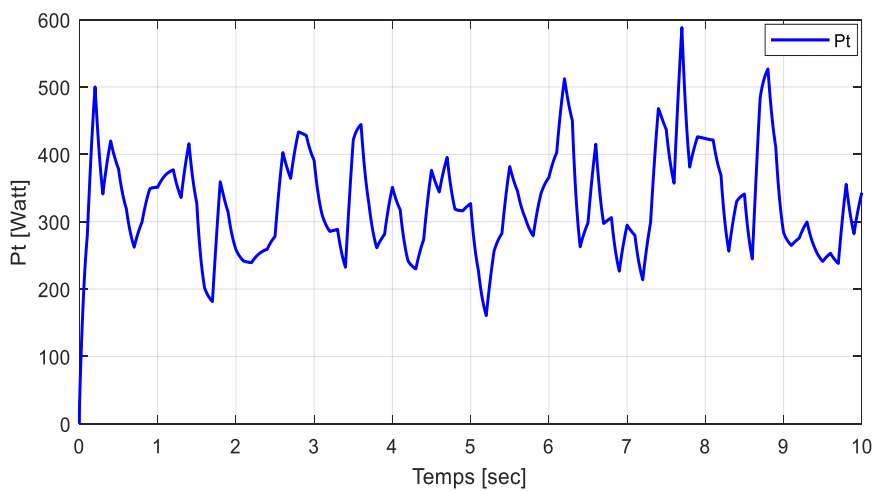
# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.



**Figure II.15.** Coefficient de puissance ( $C_p$ ).



**Figure II.16.** Couple de la turbine en (N.m).



**Figure II.17.** Puissance de la turbine en (watt).

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

---

## II.2.6 Interprétation des résultats

L'évolution du coefficient de puissance «  $C_p$  » en fonction du temps est représentée sur la (figure II.15), on remarque que celui-ci reste approximativement constant autour d'une valeur de 0.3, ainsi le fonctionnement à puissance maximale est respecté.

La vitesse de rotation de la turbine ( $W_g$ ) et sa puissance ( $P_t$ ) sont proportionnelles au vent, ce qui explique la fameuse transformation de la puissance cinétique du vent en puissance mécanique disponible sur l'arbre de transmission.

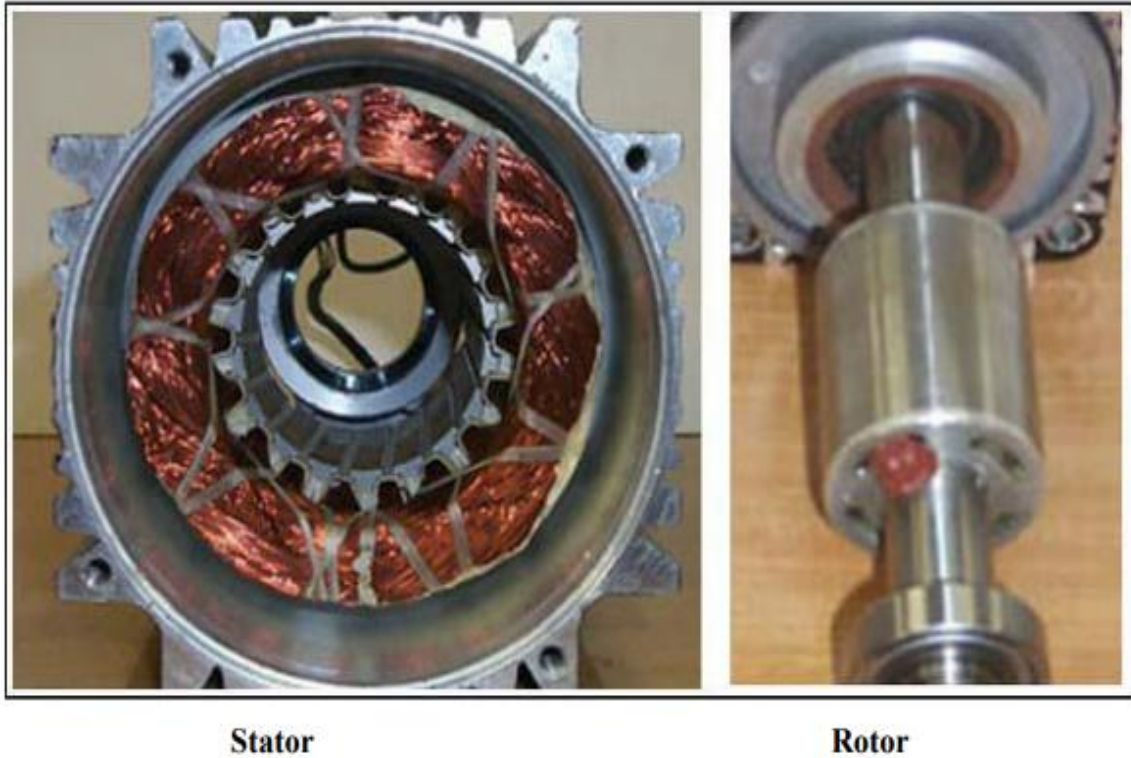
## II.3 Présentation du moteur synchrone à aimants permanents (MSAP)

### II.3.1 Constitution de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

La machine synchrone est constituée de deux parties, la partie mobile ou rotor constituant l'inducteur et une partie fixe ou stator portant les enroulements constituant l'induit, la mince zone entre les deux parties précédentes est appelée l'entrefer [30].

- **Stator** : il est similaire à celui de la machine asynchrone. Il se compose d'un bobinage distribué triphasé, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales. Ce bobinage est logé dans les encoches creusées dans le circuit magnétique fixe. Ce dernier est feuilleté afin de réduire les courants de Foucault et de limiter les pertes dans le fer. Il est généralement construit en tôle à base d'alliage Fer-Silicium qui permet l'obtention d'une induction élevée [29].
- **Rotor** : les enroulements parcourus par un courant continu (dans le cas de la machine à rotor bobiné) sont remplacés par des aimants permanents alternants pôles nord et pôles sud. Le flux inducteur balaye les enroulements statoriques et y induit des forces électromotrices ( $f_{em}$ ) alternatives. L'interaction des champs rotorique et statorique donne naissance au couple électromagnétique [29].

Il existe deux types de rotor, ayant pour rôle de générer le champ d'induction rotorique. Les rotors à pôles lisses et les rotors à pôles saillants.



*Figure II.18. Stator et rotor de la machine à aimant permanent. [30]*

### II.3.2 Principe de fonctionnement de la MSAP

Toute machine électrique dans laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique [13].

### II.3.3 Catégories de la MSAP

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue construction mécanique :

#### II.3.3.1 Machines synchrones à aimants permanents montés en surface (MSAPS)

Pour ce type de machines, les aimants sont placés sur le rotor, ils sont aimantés radialement. Cette configuration du rotor est la plus utilisée. Le principal avantage de la machine avec des aimants en surface est rapports couple/masse et puissance/masse élevés et très bon rendement. Donc, elles ont un faible coût de fabrication par rapport à d'autre machines à aimant. Leur



# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

---

inconvenient est l'exposition des aimants permanents au champ démagnétisant. De plus, les aimants sont soumis à des forces centrifuges qui peuvent causer leur détachement du rotor. Parfois, un cylindre externe non ferromagnétique de haute conductivité est utilisé. Il protège les aimants de la désaimantation, de la réaction de l'induit et des forces centrifuges. Ce cylindre peut en plus fournir un couple de démarrage asynchrone et agir comme un amortisseur. Dans le cas des aimants du type terres rares la réactance synchrone dans l'axe d et l'axe q sont, pratiquement les mêmes (Figure II.19.a) [16] [17].

## II.3.3.2 Machine synchrones à aimants permanents insérés (MSAPI)

Comme les machines avec aimants en surface, les aimants du type insérés sont aussi montés sur la surface du rotor. Toutefois, les ouvertures entre les aimants sont partiellement remplies avec le fer, comme il est montré dans la (Figure II.19.b). Le fer entre les aimants permanents crée une saillance et donne un couple reluctant en plus du couple des aimants. La réactance synchrone de l'axe q est légèrement supérieure à celle dans l'axe d [16] [17].

## II.3.3.3 Machines synchrones à aimants permanents enterrés (MSAPE)

Les machines à aimants enterrés sont des machines avec des aimants intégrés dans le rotor et aimantés radialement (figure II.19.c). Du fait que la surface du pôle magnétique est plus petite que celle du rotor, l'induction dans l'entrefer est plus faible que l'induction dans l'aimant. La réactance synchrone dans l'axe d est plus petite que celle de l'axe q. Les aimants dans cette configuration sont très bien protégés contre les forces centrifuges. Cette configuration du rotor est recommandée pour les applications à grandes vitesses [16] [17].

## II.3.3.4 Aimants à concentration de flux

Une autre façon de placer les aimants permanents dans le rotor est de les enterrer profondément à l'intérieur du rotor. Ici, les aimants sont aimantés dans le sens de la circonférence (figure II.19.d).

L'avantage de cette configuration par rapport aux autres est la possibilité de concentrer le flux généré par les aimants permanents dans le rotor et d'obtenir ainsi une induction plus forte dans l'entrefer. Comme les machines à aimants intérieurs, les aimants permanents de cette dernière sont aussi bien protégés contre la désaimantation et les contraintes mécaniques. La réactance synchrone sur l'axe-q est plus grande que celle de l'axe d [31].

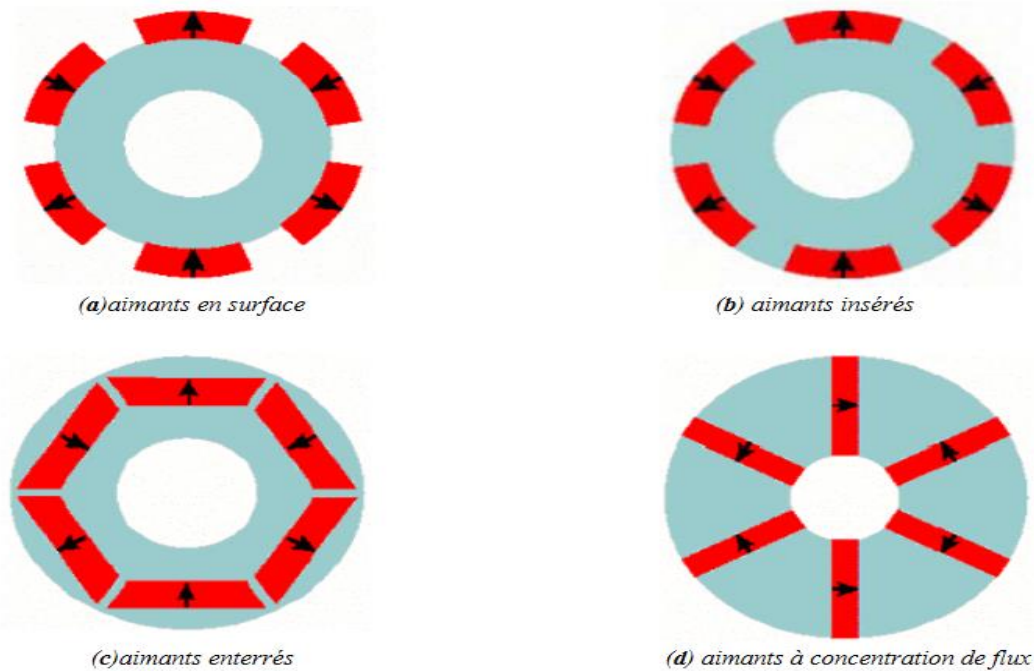


Figure II.19 : Différentes structures des rotors des MSAP. [16]

## II.3.4 Matériaux pour aimants

Selon les matériaux utilisés dans les aimants, on distingue deux types d'aimants permanents:

- Aimants « rigides » ou durs : bien adaptés aux aimants modernes à cause des caractéristiques linéaires [2].
- Aimants « peu rigides » : Leurs caractéristiques non linéaires et les représentations associées sont plus complexes que celles des aimants rigides [2].

## II.3.5 Avantages de la MSAP

Les machines synchrones à aimants permanents présentent plusieurs avantages par rapport aux autres types de machines [18]:

- Puissances massiques élevées.
- Absence de contacts glissants.
- Un bon rendement
- Absence des balais et d'alimentation continue.
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Fonctionnement en survitesse.

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Cette machine est donc bien indiquée pour les systèmes embarqués et peut être employée pour des systèmes de faible puissance (petits moteurs) ou de puissance plus importante (jusqu'à quelques dizaines de MW en fonctionnement moteur) [18].

## **II.3.6 Inconvénients de la MSAP**

Comme inconvénients de la MSAP on cite [1] :

- Technologie coûteuse liée au coût des aimants.
- Interaction magnétique due au changement de structure.
- Ondulations de couple.

## **II.3.7 Les domaines d'application de MSAP**

Les MSAP sont utilisées pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges, et grâce au développement de l'électronique de puissance, l'association machine à aimants-convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières comme [19] :

- Equipements domestiques (machine à laver le linge).
- Automobiles.
- Equipements d'échantillonnage de l'information (DVD drives).
- Outils électriques, jouets, système de vision et ses équipements.
- Equipements de soins médicaux et de santé (fraise de dentiste).
- Servomoteurs.
- Production d'électricité.
- Propulsion des véhicules électriques et la propulsion des sous-marins.
- Machines-outils.

Elles sont utilisées pour des puissances allant de la gamme des microwatts à celle des mégawatts. Toutefois leur domaine d'utilisation privilégié reste les puissances à quelques dizaines de Kilowatts ou l'aimant permanent permet d'obtenir à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que les machines à rotor bobiné [20].

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

---

## II.4 Modélisation de la MSAP

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix), la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne [1].

### II.4.1 Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses simplificatrices essentielles [21] :

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de le FMM créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- L'effet d'encoche est négligeable.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

Comme les enroulements statoriques sont montés en étoile à neutre isolé, la somme instantanée des courants statoriques est nulle, de sorte qu'il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

### II.4.2 Mise en équation de la machine synchrone dans le référentiel (a,b,c)

La modélisation d'une MSAP comprend trois types d'équations : électrique, mécanique et électromagnétique [22].

#### II.4.2.1 Equations électriques

Les équations triphasées des tensions et des flux statoriques sont écrit respectivement comme suit :

$$[Vs] = [Rs]. [Is] + \frac{d}{dt} [\varphi s] \quad (\text{II.27})$$

$$[\varphi s] = [Ls]. [Is] + [\Phi sf] \quad (\text{II.28})$$

En définissant les vecteurs suivants :

$$[Vs]=[Va \ Vb \ Vc]^T [Is] = [Ia \ Ib \ Ic]^T [\varphi s] = [\varphi a \ \varphi b \ \varphi c]^T$$

## Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

$$[Rs]=\begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad (\text{II.29})$$

$$[Ls]=\begin{bmatrix} L_a & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ab} & L_b & M_{bc} \\ M_{ac} & M_{bc} & L_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.30})$$

[Vs] : Vecteur tension statorique.

[Is] : Vecteur courant statorique.

[φs]: Vecteur flux statorique.

[Rs]: Matrice résistance du stator.

[Ls]: Matrice inductance du stator.

[Φsf]: Vecteur flux engendré par l'aimant définie par :

$$[\Phi_{sf}] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \cos(\theta - \frac{2p}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2p}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.31})$$

θ : Angle de charge (position de rotor) défini par :

$$\theta(t) = \int_0^t \omega dt \quad (\text{II.32})$$

Sachant que :

$$\omega = P \Omega_r \quad (\text{II.33})$$

ω: Pulsation électrique. *et* Ω<sub>r</sub>: La vitesse de rotor. P: Nombre de paire de pôle.

### II.4.2.2 Equation mécanique

L'application de la 2ème loi de Newton donne l'équation de mouvement :

$$\frac{d}{dt} (\Omega_r) = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - f \Omega_r) \quad (\text{II.34})$$

J: Moment d'inertie.

C<sub>em</sub>: Couple électromagnétique.

C<sub>r</sub>: Couple résistant.

f: Coefficient de frottement.

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

## II.4.2.3 Equation électromagnétique

L'équation de couple électromagnétique est importante pour définir l'équation mécanique et prend la forme suivante :

$$C_{em} = [i_s]^T \left[ \frac{1}{2} \cdot \frac{d[L_s]}{d\theta} [i_s] + \frac{1}{2} \cdot \frac{d[\Phi_{sf}]}{d\theta} \right] \quad (II.35)$$

## II.4.3 Passage du repère triphasé (a, b, c) au repère biphasé (d,q)

Le modèle synchrone dans le référentiel (a, b, c) étant fort complexe, et aboutit à des équations différentielles à coefficients variables, le but des transformations matricielles est de le simplifier. Cette simplification réduit l'ordre de système.

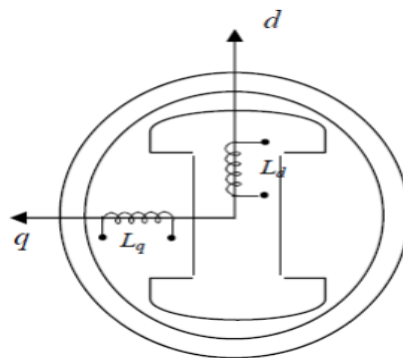
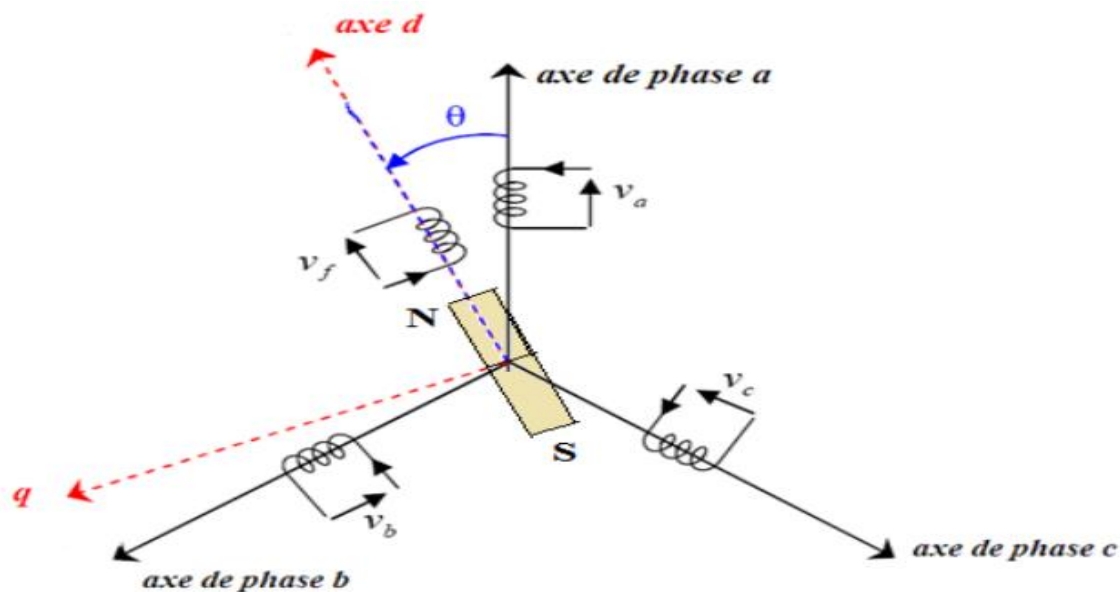


Figure II.20. Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park. [43]

### II.4.3.1 Principe de transformation de Park

La transformation de Park est un outil mathématique consiste à transformer le système triphasé (a, b, c) en un système diphasé (d, q). Ce passage mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de  $2\pi/3$  en deux bobines fictives équivalentes déphasées de  $\pi/2$  et situées sur le rotor, l'aimant se situe sur l'axe d. Les variables et les paramètres sont alors représentés dans un référentiel à deux axes: l'axe direct (d) et l'axe de quadrature arrière (q), perpendiculaires, l'angle est appelé angle Park. La (Figure II.21) montre le principe de la transformation de Park.



*Figure II.21: Représentation de la transformation de Park.*

## II.4.4 Modélisation de la MSAP dans le repère de Park

Pour passer du système triphasé au système biphasé, il faut utiliser les transformations suivantes :

$$\begin{cases} [V_{abc}] = [P(\theta)]^{-1} [V_{dq}] \\ [V_{dq}] = [P(\theta)] [V_{abc}] \end{cases} \quad (\text{II.36})$$

Avec :  $P(\theta)$  Matrice de PARK, est donnée par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Et :  $P(\theta)^{-1}$  Matrice de PARK INVERSE, est donnée par :

$$[P(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta) & -\sin(\theta) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

## II.4.4.1 Equations électriques

Après développement des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \varphi_q \omega \\ V_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \varphi_d \omega \end{cases} \quad (\text{II.39})$$

## II.4.4.2 Equations magnétique

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II.40})$$

Remplaçons les équations flux dans les équations des tensions, on aura :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - L_q i_q \omega \\ V_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \omega(L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.41})$$

$V_d, V_q$  : Représentent respectivement les vecteurs des tensions statoriques d'axes d et q.

$i_d, i_q$  : Représentent respectivement les vecteurs des courants statoriques d'axes d et q.

$\omega$  : Représente la vitesse électrique de rotation du rotor.

$L_d, L_q$  : Représentent respectivement les inductances statoriques d'axes d et q.

Pour retrouver le théorème généralisé de la convention génératrice (GSAP), il suffit d'inverser le sens des courants ; les équations de la GSAP s'écrivent donc comme suit :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_s \frac{di_d}{dt} + L_q i_q \omega \\ V_q = -R_s i_q - L_s \frac{di_q}{dt} + \omega(-L_d i_d + \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.42})$$

## II.4.4.3 Expression de couple électromagnétique

La connaissance du couple électromagnétique  $C_{em}$  de la machine est essentielle pour l'étude de la machine et sa commande. Le couple électromagnétique  $C_{em}$  est exprimé par la dérivée partielle du stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [32][33].



## Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

Le couple électromécanique développé par la machines synchrone peut être donné par la relation suivante:

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{II.43})$$

On remplace les flux par leurs expressions, on aura ainsi :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P [(L_d - L_q) i_d i_q + \varphi_f i_q] \quad (\text{II.44})$$

### II.4.4.4 Equation mécanique

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{mot} - C_{em} - f\Omega \quad (\text{II.45})$$

Sachant que :

$C_m$ : Couple moteur appliqué sur la génératrice.

$J$ : Moment d'inertie.

$f$ : Coefficient de frottement visqueux.

### II.4.5 schéma Simulink de la génératrice synchrone à aimants permanents

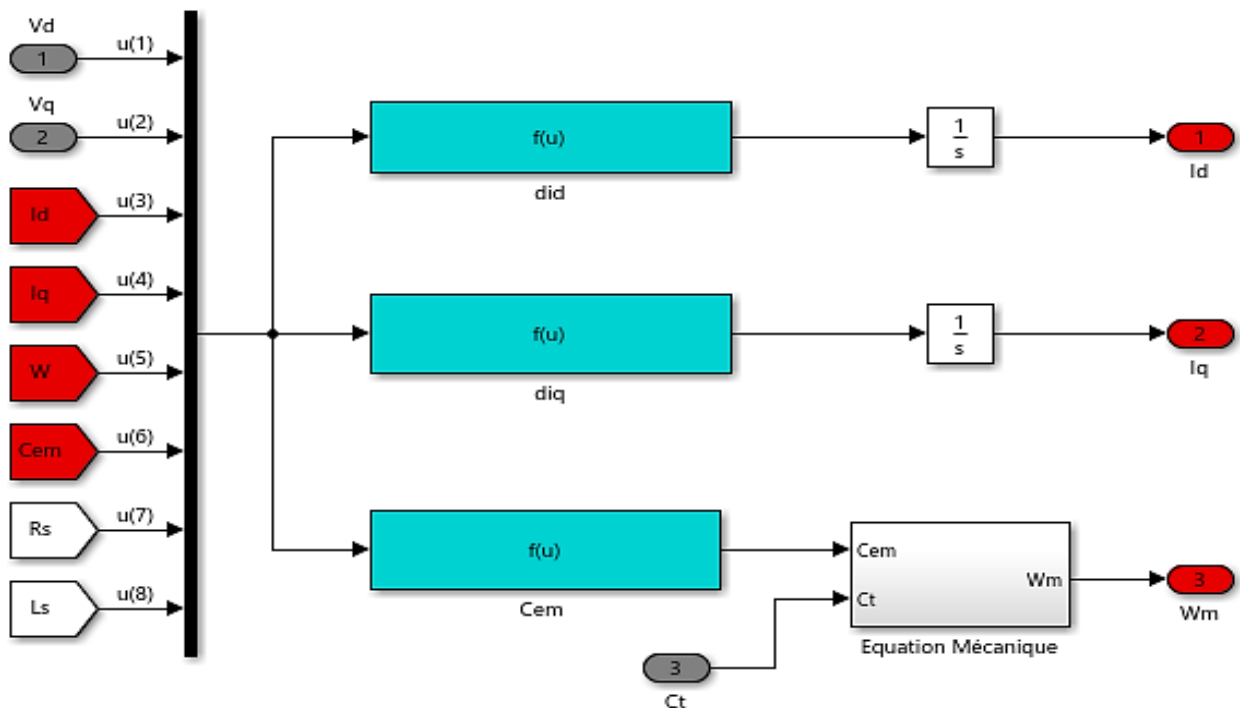


Figure II.22 : Schéma bloc Simulink de la génératrice synchrone à aimants permanents.

# Modélisation de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne.

## **II.5 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté la modélisation du système de conversion de l'énergie éolienne basé sur la génératrice synchrone à aimants permanents. En premier lieu, nous avons modélisé la partie mécanique de la turbine ainsi que l'axe de transmission, puis nous avons présenté le modèle mathématique de la machine synchrone dans sa structure générale en se basant sur ses équations électriques, magnétiques et mécanique.

Ensuite, pour des raisons de simplification, nous avons établi le modèle dans un système d'axe biphasé lié au stator grâce à la transformation de Park.

*CHAPITRE III*  
*COMMANDE*  
*VECTORIELLE DE LA*  
*GSAP.*

## III.1 Introduction

Après avoir modélisé la machine associée à l'éolienne dans le chapitre précédent, nous allons voir, dans ce chapitre-ci, le principe et les concepts de la commande vectorielle appliquée à la machine dans un premier temps, et ce, afin de présenter les structures de cette commande dans le repère de Park.

Dans un second temps, nous testerons la robustesse de la machine vis-à-vis des variations paramétriques, et nous présenterons les résultats obtenus par simulation, avec et sans contraintes.

## III.2 Commande vectorielle de la GSAP

Le principe de base de la commande vectorielle a été proposé par BALSCHKE et HASSE dans les années 70. Cette commande consiste à orienter le vecteur courant et le vecteur flux à fin de rendre le comportement de la machine synchrone similaire à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Le but de la commande vectorielle appliquée à la GSAP est d'éliminer le problème de couplage entre l'induit et l'inducteur [9].

La commande vectorielle est l'une des méthodes de commande appliquée aux machines alternatives. Elle est basée sur l'élimination du couplage entre l'inducteur et l'induit en dissociant le courant statorique en deux composantes de Park ( $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ ) en quadrature dans un référentiel lié au champs tournant de façon que l'une des composantes ( $i_{sq}$ ) commande le couple et l'autre ( $i_{sd}$ ) commande le flux, donc à maîtriser les grandeurs ( $i_{sd}$  et  $i_{sq}$ ) en agissant directement sur les tensions  $V_{sd}$  et  $V_{sq}$  [41].

La stratégie de commande la plus souvent utilisée est celle qui consiste à maintenir le courant  $I_d$  à une valeur nulle. Cette stratégie permet de simplifier la commande du couple par la linéarisation de la relation entre le couple et le courant. D'autre part, si le courant  $I_d$  est maintenu nul, physiquement le flux de réaction d'induit est en quadrature avec le flux rotorique produit par les aimants permanents.

Comme nous l'avons vu dans le chapitre II, le modèle de la machine synchrone à aimants permanents dans le repère de Park est donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s i_d + L_s \frac{di_d}{dt} - \varphi_q \omega \\ V_q = R_s i_q + L_s \frac{di_q}{dt} + \varphi_d \omega \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

# Commande Vectorielle de la GSAP

---

Dans le cas de la génératrice synchrone à aimants permanents, on obtient donc :

$$\begin{cases} V_d = -R_s i_d - L_s \frac{di_d}{dt} + \varphi_q \omega \\ V_q = -R_s i_q - L_s \frac{di_q}{dt} - \varphi_d \omega \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} P (\varphi_d i_q - \varphi_q i_d) \quad (\text{III.4})$$

Puisque le courant  $I_d$  est nul, cela implique :

$$\varphi_d = \varphi_f \quad (\text{III.5})$$

$$C_{em} = \frac{3}{2} P \cdot I_q \cdot \varphi_f \quad (\text{III.6})$$

Pour une machine synchrone à pôles lisses, on a :

$$L_{ds} = L_{qs} = L_s \quad (\text{III.7})$$

## III.2.1 Découplage par compensation

Les équations différentielles qui représente le modèle de la machine étudiée dans le référentielle de Park (d, q), sont couplée entre elles où les courants  $i_d$  et  $i_q$  (pas indépendants l'un de l'autre) [9].

D'après les équations (III.1) et (III.2), on remarque que les courants  $I_d$  et  $I_q$  sont couplés. Les termes «  $L_q \cdot \omega \cdot i_q$  », «  $L_d \cdot \omega \cdot i_d$  » et «  $\varphi_f \cdot \omega$  » correspondent aux termes de couplage entre les axes d et q.

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation, Cette méthode à pour but de découpler les axes (d, q), qui permet d'écrire les équations de la machine et de la partie de régulation d'une manière simple et ainsi de calculer de façon simple les coefficients des régulateurs [9].

# Commande Vectorielle de la GSAP

---

On note ainsi :

$$\begin{cases} V_{d1} = R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} \\ e_q = -L_q i_q \omega \end{cases} \quad (\text{III.8})$$

Et :

$$\begin{cases} V_{q1} = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \\ e_d = (L_d i_d - \varphi_f) \omega \end{cases} \quad (\text{III.9})$$

On peut alors écrire :

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} + e_q \\ V_q = V_{q1} + e_d \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

$e_q, e_d$  : f.e.m.s de la machine qui représentent les termes de décompensation.

D'autre part :

$$\begin{cases} V_{d1} = (R_s + sL_d) i_d \\ V_{q1} = (R_s + sL_q) i_q \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

On peut voir que les courants  $i_d$  et  $i_q$  sont séparés, ce qui permet d'écrire les équations de ces derniers comme suit :

$$\begin{cases} i_d = \frac{V_{d1}}{(R_s + sL_d)} \\ i_q = \frac{V_{q1}}{(R_s + sL_q)} \end{cases} \quad (\text{III.12})$$

De ce fait, les deux courants statoriques du référentiel (d, q) sont découplés, d'où le courant  $i_d$  agit sur le flux et le courant  $i_q$  agit sur le couple.

## III.3 Systèmes de régulation

Les régulateurs les plus utilisés dans le domaine des réglages industriel sont les régulateurs classiques de type PI ou PID, pour assurer une meilleure précision, et un bon temps de réponse.[9]

Dans la structure de notre commande, on propose de mettre en œuvre des régulateurs de type PI, ce type de régulateurs possède une action proportionnelle qui permet d'appliquer une

# Commande Vectorielle de la GSAP

---

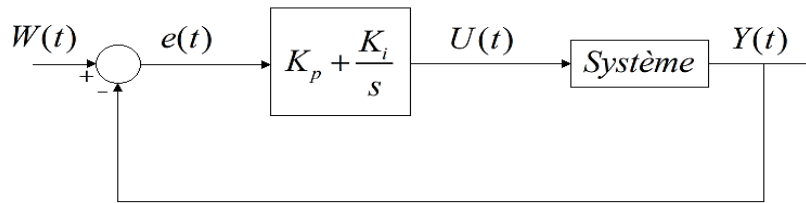
correction pour tout écart  $e(t)$  entre la mesure et la consigne  $W(t)$ , si l'écart  $e(t)$  est nul le régulateur fonctionne en tout ou rien, il possède ainsi une composante intégrale qui est une action complémentaire à l'action proportionnelle et qui permet d'éliminer l'écart statique à l'aide d'un terme intégrateur ; par ailleurs, l'action proportionnelle se stabilise dans le temps grâce à cette action intégrale.

La relation entre la sortie du régulateur et le signal de l'écart s'écrit :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (\text{III.13})$$

A partir de (III.13), on obtient: 
$$\frac{U(t)}{e(t)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (\text{III.14})$$

$K_p$  et  $K_i$  : représentent respectivement le gain proportionnel et le gain intégral.



*Figure III.1. Schéma fonctionnel d'un système réglé par un régulateur PI. [46]*

### III.3.1. Régulation des courants

On peut écrire le modèle mathématique de la machine sous la forme suivante :

$$\begin{cases} V_{sd}(s) = R_s i_{sd}(s) + sL_s i_{sd}(s) - \omega \varphi_{sq} \\ V_{sq}(s) = R_s i_{sq}(s) + sL_s i_{sq}(s) + \omega \varphi_{sd} \end{cases} \quad (\text{III.15})$$

On considère les termes de couplage ( $e_{dq} = \omega \varphi_{sdq}$ ) comme des perturbations mesurables. On peut alors écrire la fonction de transfert de la machine comme suit :

$$G_s(s) = \frac{1}{R_s + L_s s} = \frac{1}{R_s} \frac{1}{1 + \tau_e s} \quad (\text{III.16})$$

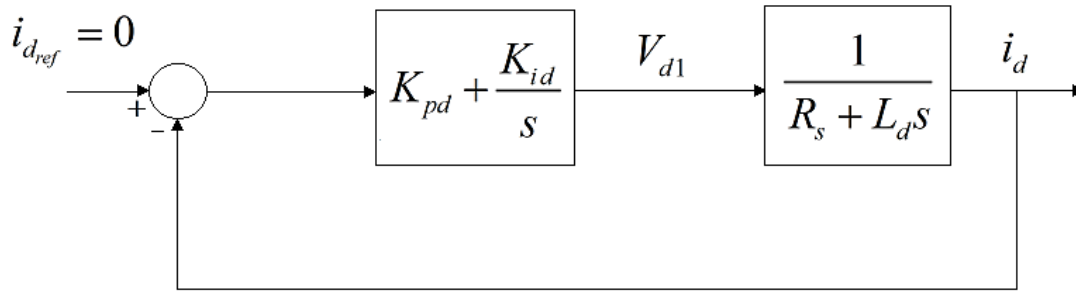
$$G_s(s) = \frac{i_{sdq}(s)}{V_{sdq}(s) + e_{sdq}(s)} \quad (\text{III.17})$$

Où :  $\tau_e$  : Constante de temps électrique, avec :  $\tau_e = \frac{L_s}{R_s}$

## Commande Vectorielle de la GSAP

---

La boucle de régulation du courant  $i_d$  est représentée comme suit :



**Figure III.2.** Boucle de régulation du courant  $i_d$ . [46]

On écrit la fonction de transfert en boucle ouverte du courant  $i_d$  sous la forme suivante :

$$G_{BO}(s) = \left( K_{pd} + \frac{K_{id}}{s} \right) \left( \frac{1}{R_s + L_d s} \right) \quad (\text{III.18})$$

On pose :

$$\frac{L_d}{R_s} = \frac{K_{pd}}{K_{id}} = \tau_e \quad (\text{III.19})$$

La fonction de transfert en boucle ouverte du courant  $i_d$  deviendra :

$$G_{BO}(s) = \frac{K_{id}}{R_s s} \quad (\text{III.20})$$

La fonction de transfert en boucle fermée du courant  $i_d$  s'écrit comme suit :

$$G_{BF}(s) = \frac{G_{BO}(s)}{1 + G_{BO}(s)} = \frac{1}{\frac{R_s}{K_{id}} s + 1} \quad (\text{III.21})$$

$$G_{BF}(s) = \frac{1}{\tau_e s + 1} \quad (\text{III.22})$$

Avec :  $\tau_e = \frac{R_s}{K_{id}}$

En tenant compte que la fonction de transfert en boucle fermée est un système de 1<sup>er</sup> ordre, le

temps de réponse sera défini par :  $\tau_r = 3\tau_e$  (III.23)



# Commande Vectorielle de la GSAP

D'après (III.19) et (III.23), les paramètres du régulateur PI peuvent s'écrire finalement :

$$\begin{cases} K_{id} = \frac{3R_s}{\tau_r} \\ K_{pd} = \frac{3L_d}{\tau_r} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

La boucle de régulation du courant  $i_q$  est représentée comme suit :

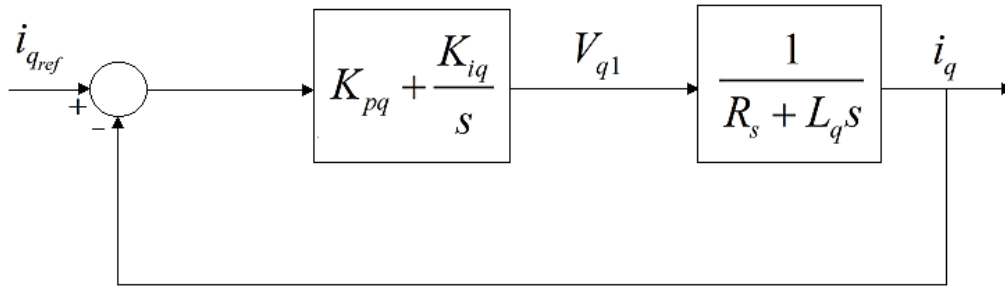


Figure III.3. Boucle de régulation du courant  $i_q$ . [46]

Dans le cas où les pôles sont lisses, le système de régulation du courant  $i_q$  est identique à celui du courant  $i_d$ , et les inductances des axes « d » et « q »  $L_d$  et  $L_q$  sont de valeurs égales. Pour réguler le courant  $i_q$ , on poursuit donc les mêmes démarches faites pour la régulation du courant  $i_d$ , et on obtiendra les paramètres du régulateur PI, ' $K_{iq}$ ' et ' $K_{pq}$ ' comme suit :

$$\begin{cases} K_{iq} = \frac{3R_s}{\tau_r} \\ K_{pq} = \frac{3L_q}{\tau_r} \end{cases} \quad (\text{III.25})$$

## III.3.2. Régulation de la vitesse

Le régulateur de vitesse permet de déterminer le courant  $i_q$  de référence, ainsi le couple de référence, afin de maintenir la vitesse correspondante. La sortie du régulateur de vitesse est le signal de commande qui représente le courant  $i_q$  de référence du régulateur de courant  $i_q$ . [9]

Nous allons régler la vitesse de la machine en proposant un régulateur de type PI, ce choix justifier par [12] :

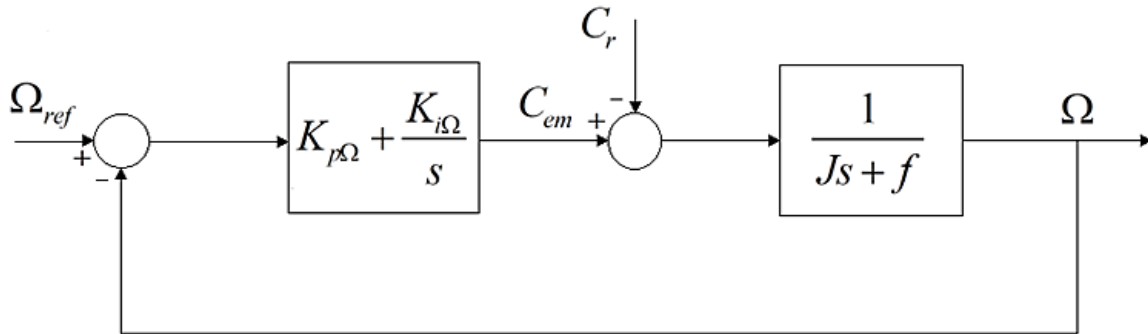
- simplicité de la réalisation et de son réglage (auto réglable).
- La connaissance maitrise de ce type de régulateur et de son application dans l'industrie et sa robustesse de commande.
- Son prix de revient moins cher.

## Commande Vectorielle de la GSAP

La dynamique de la vitesse est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f_r \Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{III.26})$$

Le schéma fonctionnel du contrôle de la vitesse est donné comme suit :



**Figure III.4.** Boucle de régulation de la vitesse. [46]

La fonction de transfert de la vitesse en boucle ouverte s'écrit :

$$G_{BO_\Omega}(s) = \left( K_{p\Omega} + \frac{K_{i\Omega}}{s} \right) \frac{1}{Js + f} \quad (\text{III.27})$$

$$G_{BO_\Omega}(s) = \frac{K_{p\Omega}}{s} \left( s + \frac{K_{i\Omega}}{K_{p\Omega}} \right) \frac{1}{Js + f} \quad (\text{III.28})$$

On peut obtenir la fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée, en adoptant la méthode de placement de pôle :

$$G_{BF_\Omega}(s) = \frac{1}{\frac{J}{K_{i\Omega}} s^2 + \left( \frac{f + K_{p\Omega}}{K_{i\Omega}} \right) s + 1} \quad (\text{III.29})$$

La fonction de transfert de la vitesse en boucle fermée est d'une dynamique de 2<sup>ème</sup> ordre, la forme canonique d'un système de 2<sup>ème</sup> ordre se définit par la formule suivante :

$$G_{BF_\Omega}(s) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_0^2} s^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} s + 1} \quad (\text{III.30})$$

Avec :  $\omega_0$  : Pulsation propre du système .

$\xi$  : Coefficient d'amortissement.

# Commande Vectorielle de la GSAP

---

En identifiant l'expression de (III.29) avec celle de (III.30), on obtient :

$$\frac{1}{\omega_0^2} = \frac{J}{K_i} \quad (\text{III.31})$$

$$\frac{2\xi}{\omega_0} = \left( \frac{f + K_p}{K_i} \right) \quad (\text{III.32})$$

Depuis (III.31) et (III.32), on peut déduire finalement les paramètres ' $K_{i\Omega}$ ' et ' $K_{p\Omega}$ ' du régulateur de vitesse PI comme suit :

$$\begin{cases} K_{i\Omega} = J\omega_0^2 \\ K_{p\Omega} = 2\xi J\omega_0 - f \end{cases} \quad (\text{III.33})$$

## III.4 Avantages et inconvénients de la commande vectorielle

### III.4.1 Les avantages [4]

- Elle est précise et rapide.
- Elle est basée sur le modèle transitoire.
- Le contrôle des grandeurs se fait en amplitude et en phase.

### III.4.2 Les inconvénients [4]

- Présence de transformation de coordonnées dépendant d'un angle  $\theta_s$  estimé.
- Faible robustesse aux variations paramétriques.

## III.5 Structure complète de la commande vectorielle de la GSAP

À l'aide des étapes précédentes de la modélisation, on peut construire la structure complète de la commande vectorielle de la GSAP, où l'entrée de référence de la commande est le couple de référence  $C_{em-ref}$  obtenu à partir de la régulation de vitesse. La figure (III.5) illustre la stratégie de la commande vectorielle, elle comporte les boucles de régulation de courants et le découplage des tensions.

# Commande Vectorielle de la GSAP

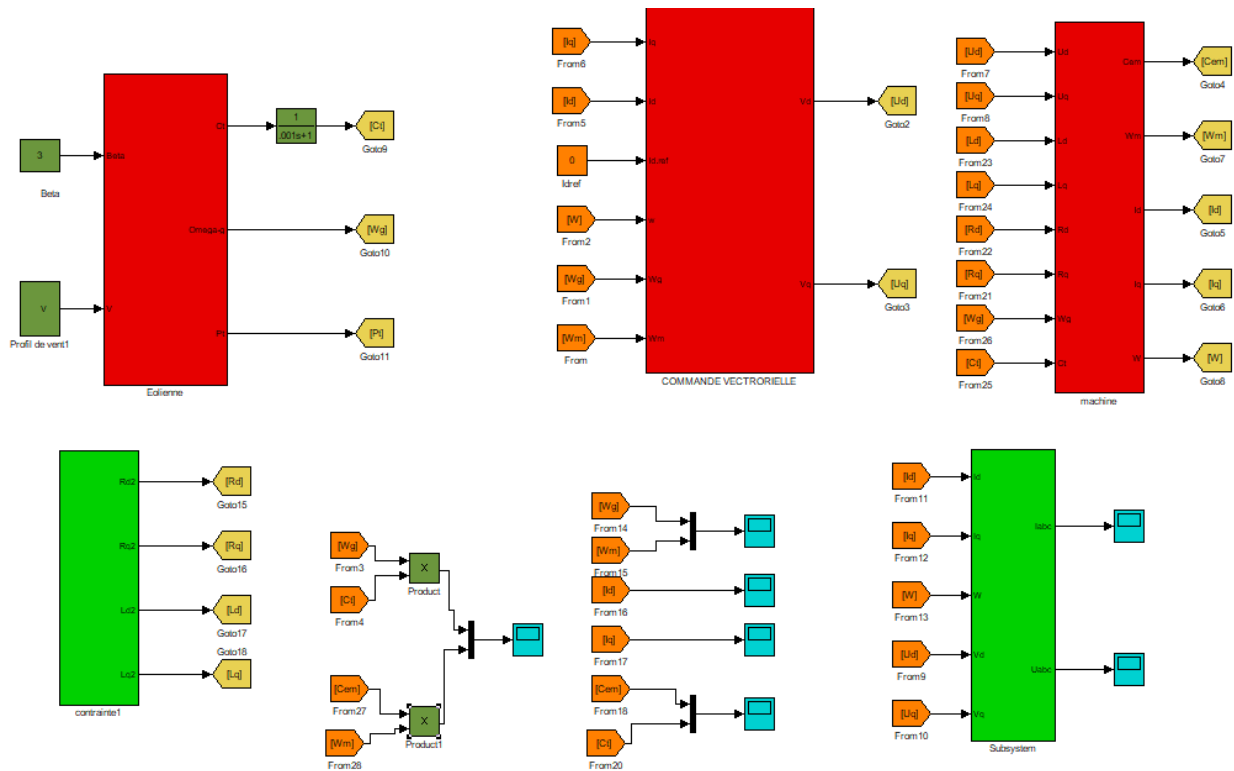


Figure III.5. Schéma bloc de la commande vectorielle de la GSAP.

## III.6 Résultats de simulation et interprétation

En vue de vérifier les performances de la commande mise en œuvre, nous allons élaborer deux tests, à savoir : sans et avec contraintes. Dans ce dernier cas, nous augmenterons progressivement les valeurs des résistances (suite à l'échauffement de la génératrice) ainsi que celles des inductances propres au modèle de la GSAP (suite à une supposition de saturation).

### III.6.1 Test Sans application de contraintes

Dans ce cas présent, nous adoptons un fonctionnement idéal sans aucune contrainte.

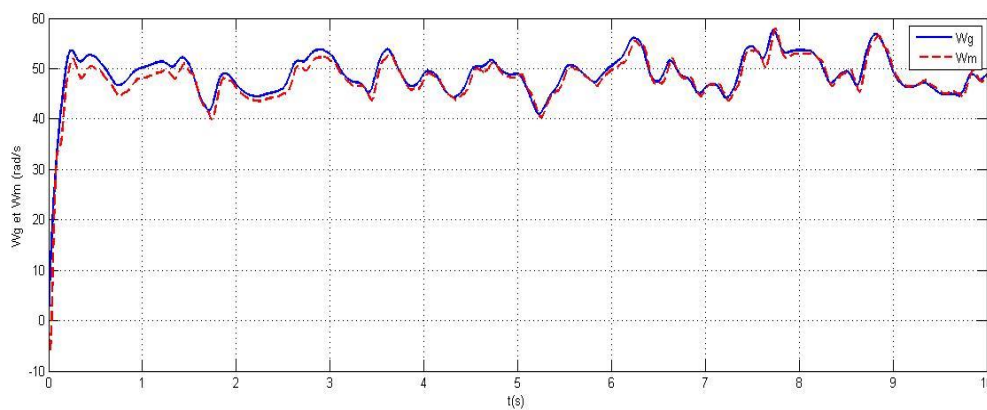


Figure III.6. Vitesse de rotation  $W$  (rad/s).

# Commande Vectorielle de la GSAP

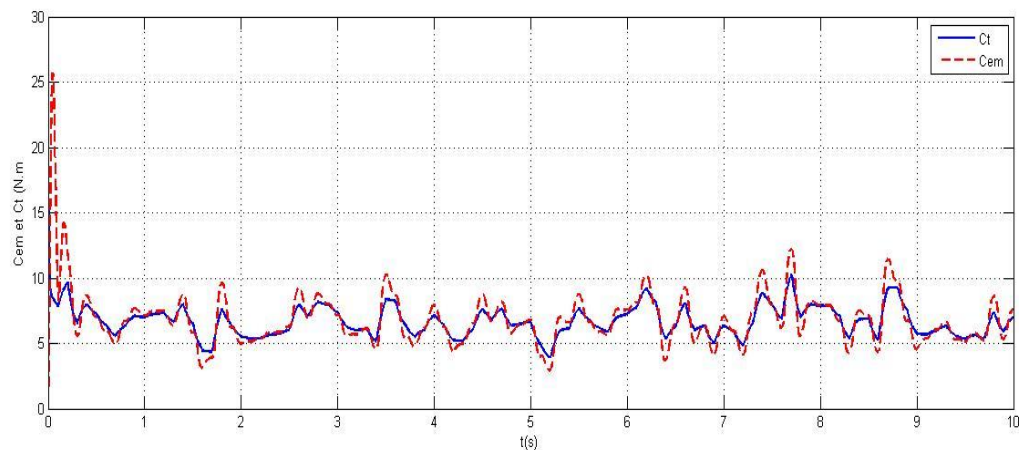


Figure III.7. Couples  $C_t$  et  $C_{em}$  (N.m).

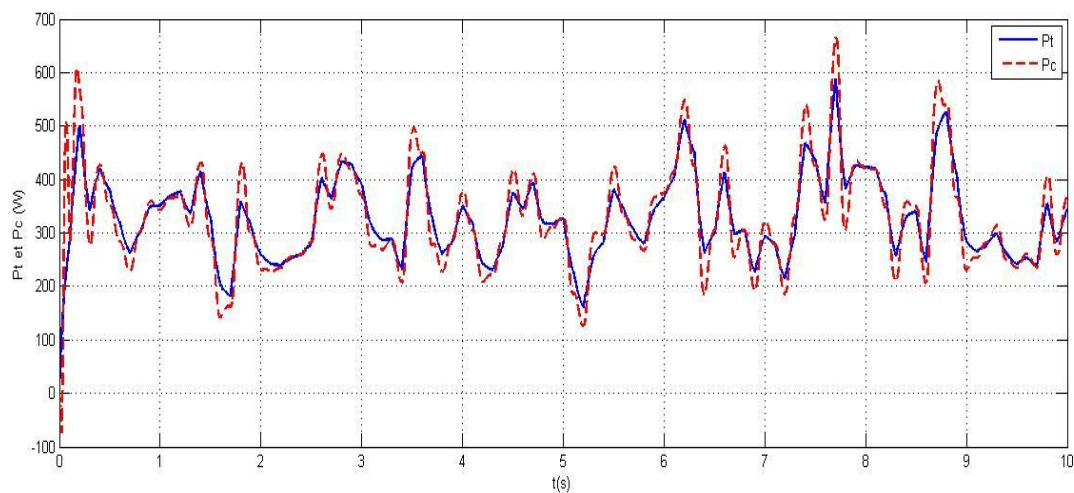


Figure III.8. Puissances générées  $P_c$  &  $P_t$  (Watt).

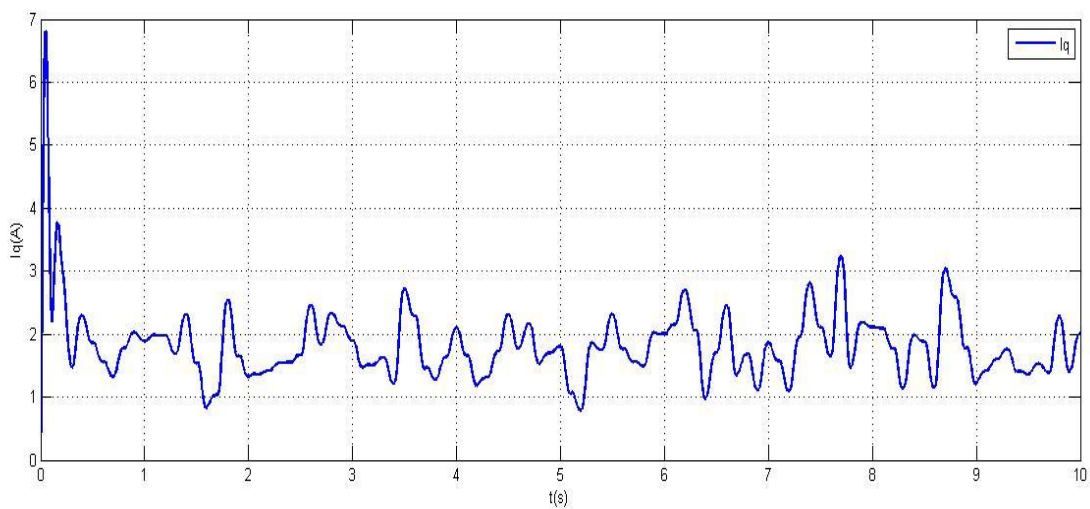
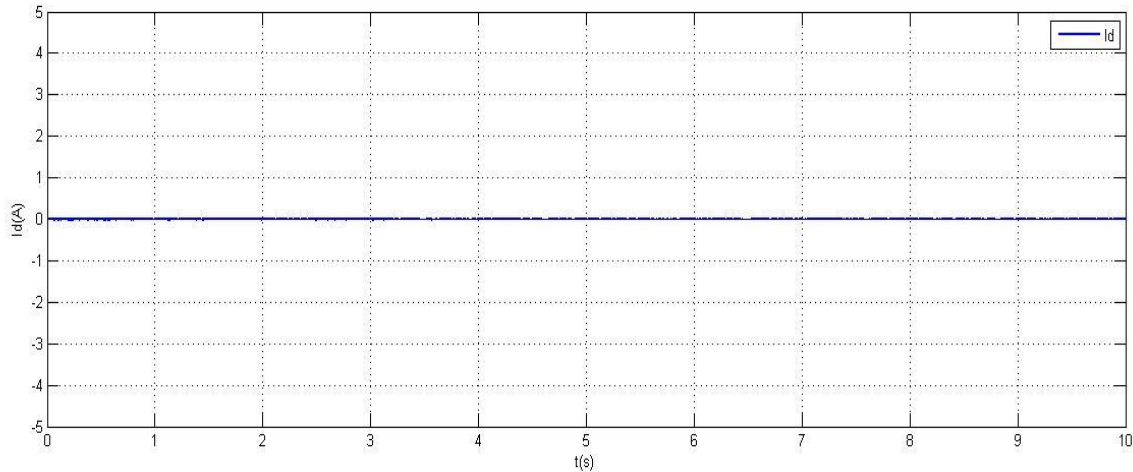


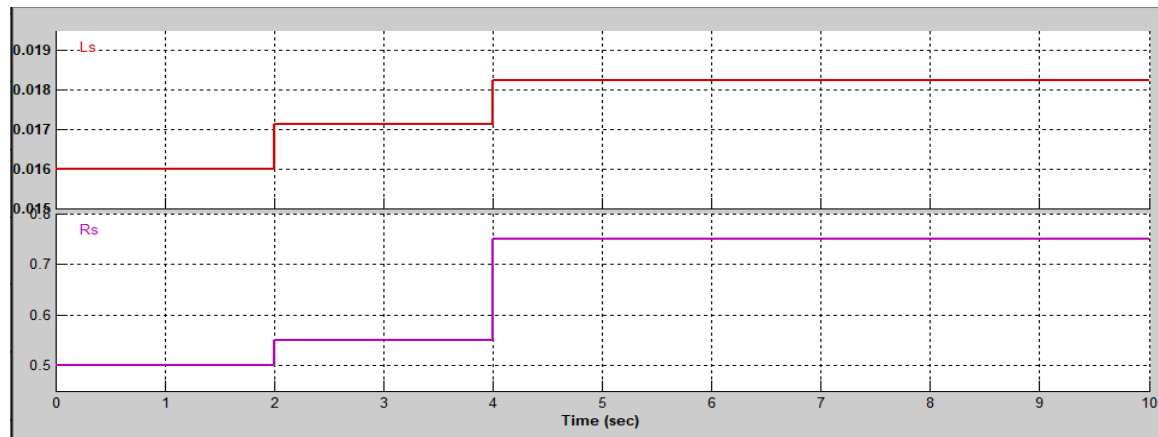
Figure III.9. Courant  $I_q$  (A).



*Figure III.10. Courant  $I_d$  (A).*

## III.6.2 Test Avec application de contraintes

Afin d'étudier les variations des différentes grandeurs en fonction des contraintes appliquées, et en vue d'analyser les conditions extrêmes de fonctionnement, nous allons procéder à deux augmentations des paramètres susceptibles de changer à travers le temps, à savoir les résistances  $R_d$  et  $R_q$  (supposition d'échauffement de la génératrice au fil du temps) ainsi que les inductances  $L_d$  et  $L_q$  (supposition de saturation) comme l'indique la (figure III.11).

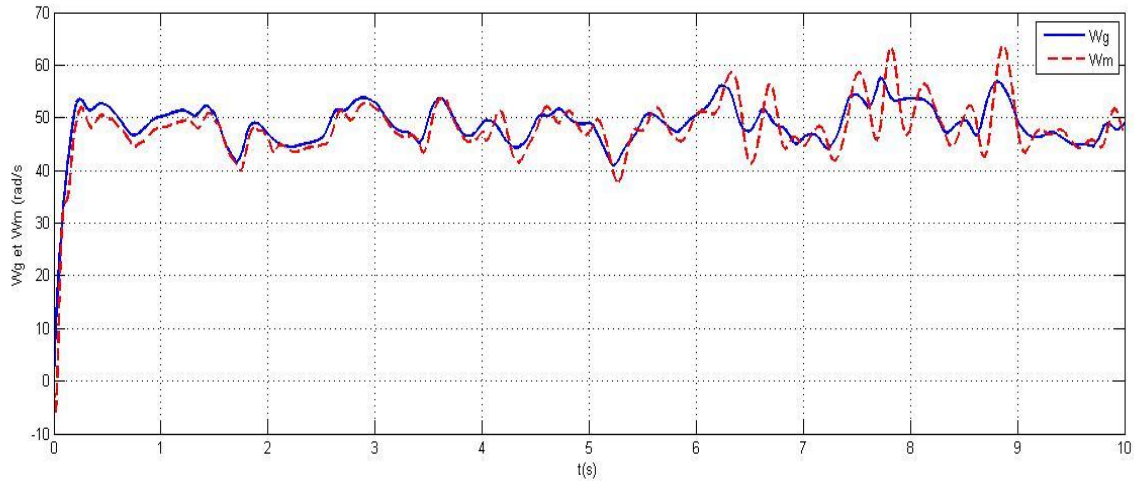


*Figure III.11. Variations des résistances et inductances en fonction du temps (sec).*

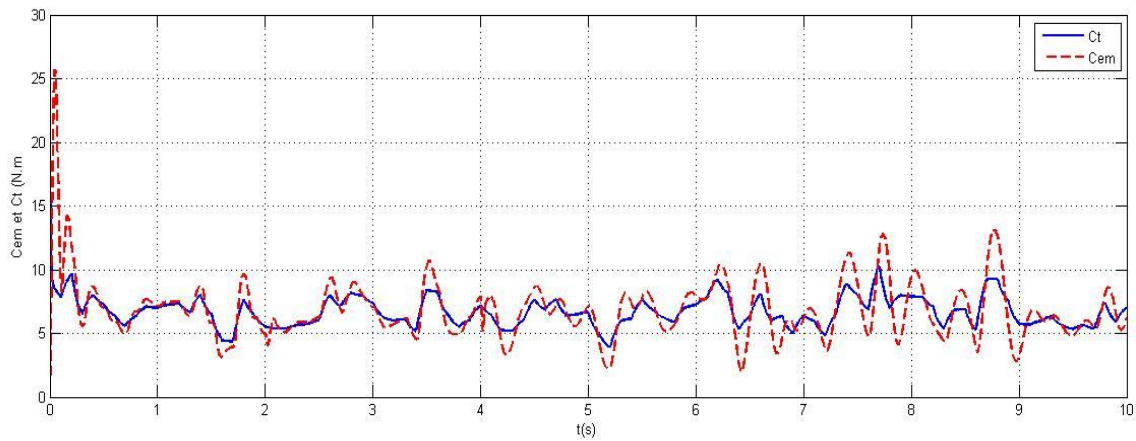
- A  $t=2$ sec : Augmentation des résistances de 25% et des inductances de 7%.
- A  $t=4$ sec : Augmentation des résistances de 50% et des inductances de 14%.

Les résultats obtenus par cette simulation sont présentés par les figures ci-après, suivis de leurs interprétations :

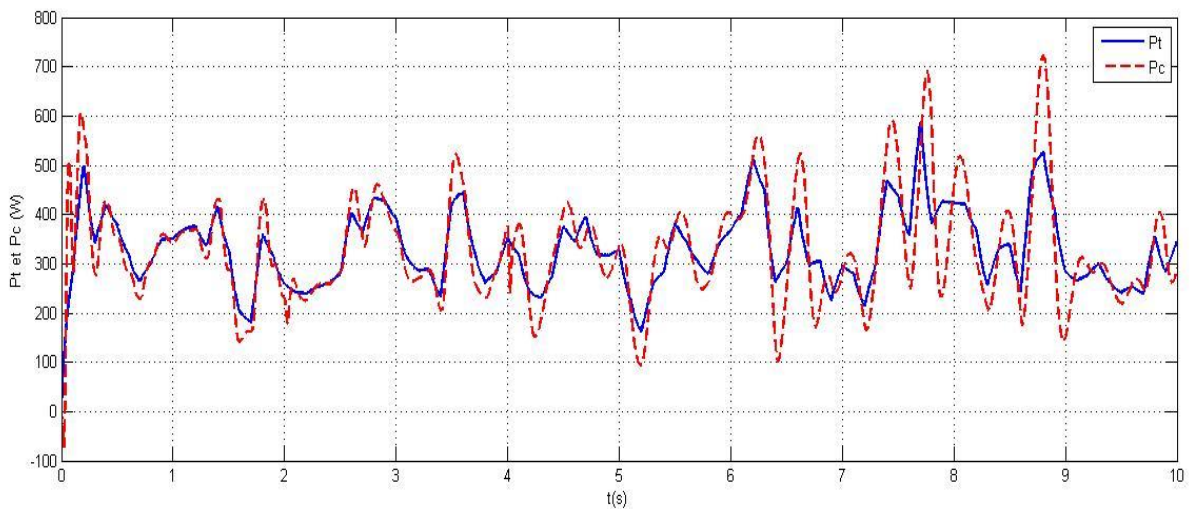
# Commande Vectorielle de la GSAP



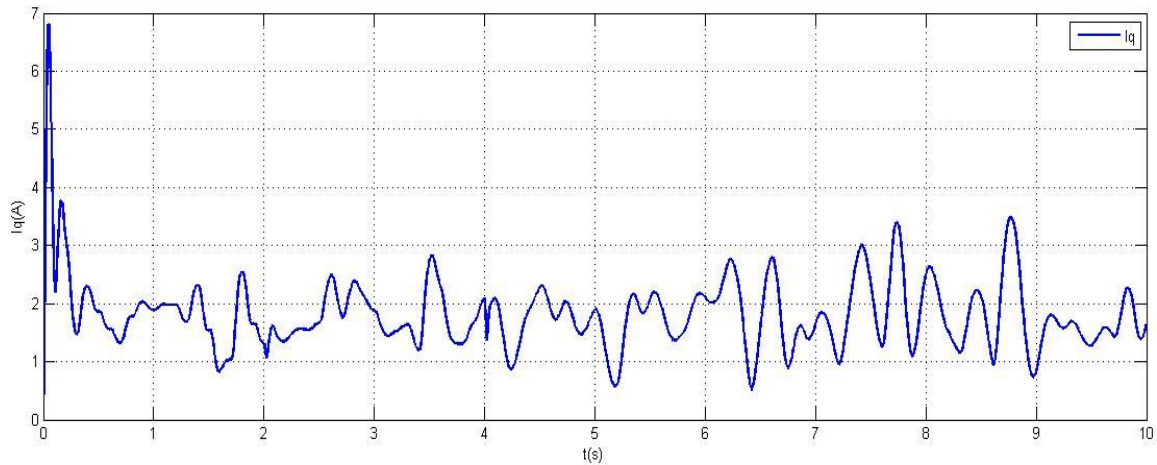
*Figure III.12. Vitesse de rotation  $W$  (rad/s) sous contraintes.*



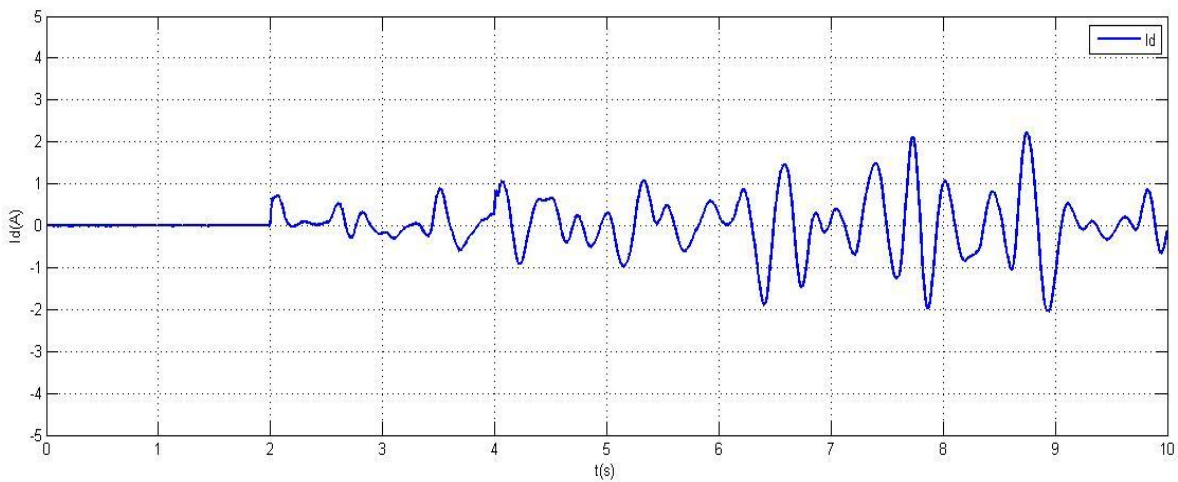
*Figure III.13. Couples  $C_t$  et  $C_{em}$  sous contraintes.*



*Figure III.14. Puissances générées sous contraintes.*



**Figure III.15.** Courant  $I_q$  sous contraintes.



**Figure III.16.** Courant  $I_d$  sous contraintes.

## ❖ Interprétation

Concernant la vitesse (*Fig III.6*), et la puissance (*Fig III.8*), on constate de légers décalages en absence de contrainte, tandis que lors de l'application des contraintes (*Fig III.12*) et (*Fig III.14*), des oscillations assez importantes apparaissent autour de la valeur de référence.

Pour le couple électromagnétique (*Fig III.13*), en appliquant les contraintes, on remarque une détérioration du suivi ; de même pour le courant  $i_q$  (*Fig III.15*), qui est l'image du couple.

A propos du courant  $i_d$ , il demeure nul en fonctionnement sans contraintes (*Fig III.10*), Avant que ces dernières viennent le perturber (*Fig III.16*).



## III.7 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description de la commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents. Pour valider le modèle mathématique de cette commande, des simulations avec et sans contraintes ont été effectuées. Ces dernières ont abouti à des résultats avec des performances plutôt bonnes, notamment le court temps de réponse permettant à la chaîne de s'adapter rapidement aux variations de la vitesse du vent.

En vue d'améliorer les performances de notre système, on doit songer à d'autres types de commandes plus avancées telle que la commande backstepping ainsi le régulateur fuzzy, qui seront l'objectif du prochain chapitre.

*CHAPITRE IV*

*COMMANDE*

*BACKSTEPPING-FUZZY*

*D'UNE MSAP.*

## IV.1 Introduction

Depuis quelques années, beaucoup de progrès ont été faits dans le domaine de la commande des systèmes non linéaires. La technique du backstepping et les régulateurs fuzzy font parties de ces nouvelles percées dans ce domaine.

Les lois de commande classique de type PI donnent de bons résultats dans le cas des systèmes linéaires à paramètres constants. Pour un système non linéaire ayant des paramètres non constants, ces lois de commande classiques peuvent être insuffisantes et non robustes lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques du système sont exigées. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations paramétriques, aux perturbations et aux non linéarités, d'où la conception d'un contrôleur pour un tel système peut souvent s'avérer une tâche difficile voire impossible [12].

La technique du Backstepping offre une méthode systématique pour répondre à ce type de problème. Elle combine la notion de fonction de contrôle de Lyapunov avec une procédure récursive de conception. Cela permet de surmonter l'obstacle de la dimension des systèmes d'ordre plus élevé et d'exploiter la souplesse de conception de leurs contrôleurs [12].

La logique floue a été introduite en 1965 par Lotfi Zadeh comme une description mathématique bien que, le principe de cette idée a été connu plus tôt chez les philosophes et les logiciens. Cette approche fait partie des méthodologies intelligentes, elle est inspirée de la capacité de l'homme à prendre des décisions et agir de façon convenable malgré le flou (l'incertitude) des connaissances disponibles. Elle a été introduite dans le but d'approcher le raisonnement humain à l'aide d'une représentation adéquate des connaissances telles que la base des règles et les fonctions d'appartenance, qui sont construites par l'introduction des informations linguistiques et numériques fournies par l'expert humain [47].

Dans ce chapitre on passe sur différentes connaissances de ces méthodes puis on applique sur notre système éolien à machine synchrone à aimant permanent.

## IV.2 Commande par la méthode backstepping

### IV.2.1 Historique de la commande par la méthode backstepping

Le Backstepping a été développé par Kanellakopoulos et al En 1991, et inspiré par les travaux de Feurer et Morse de 1978 d'une part et Tsinias en 1989, Kokotovit et Sussmann en 1989 d'autre part. L'arrivée de cette méthode a donné un nouveau souffle à la commande

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

---

adaptative des systèmes non linéaires, qui malgré les grands progrès réalisés, manquait d'approches générales [12].

Le mot backstepping est particulièrement justifié par le processus récursif intrinsèque à la synthèse. Il permet d'effectuer une synthèse constructive d'une loi de commande pour les systèmes non linéaires triangulaires en adoptant la théorie de Lyapunov. L'idée consiste à choisir une fonction de Lyapunov définie positive et que sa dérivée soit toujours négative [8].

## IV.2.2 Principe de la commande Backstepping

L'idée de base de la commande de type Backstepping est de rendre les systèmes bouclés équivalents à des sous-systèmes d'ordre un en cascade stable au sens de Lyapunov, ce qui leur confère des qualités de robustesse et une stabilité globale asymptotique. En d'autres termes, c'est une méthode multi-étapes. A chaque étape du processus, une commande virtuelle est ainsi générée pour assurer la convergence du système vers son état d'équilibre. Cela peut être atteint à partir des fonctions de Lyapunov qui assurent pas à pas la stabilisation de chaque étape de synthèse [9].

### IV.2.2.1 Fonction de Lyapunov

La commande des systèmes non linéaire s'appuie sur deux approches de Lyapunov :

#### ❖ Première méthode de Lyapunov

Cette méthode vise à linéariser le système à commander, afin de profiter des techniques consacrées aux systèmes linéaires. Elle ne permet d'étudier que la stabilité locale et ne donne pas d'information sur le domaine de stabilité global. De plus, dû aux approximations du premier degré (linéarisation), il n'est pas possible de tenir compte de tous les types de phénomènes non-linéaires. En fait, l'étude locale est surtout intéressante pour justifier ou non la poursuite de l'étude de la stabilité. Si on trouve que le système linéarisé est instable, le système non linéaire le sera nécessairement aussi [12].

#### ❖ Deuxième méthode de Lyapunov

Cette méthode est basée sur le concept d'énergie dans un système. Le principe de cette méthode consiste à analyser la stabilité du système, sans même résoudre les équations différentielles non linéaires qui le régissent. La stabilité dépend uniquement de l'étude des variations (signe de la dérivée) de l'énergie, ou d'une fonction qui lui est équivalente, le long de la trajectoire du système. L'étude de la stabilité d'un système caractérisé par un vecteur

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

d'état  $x$  consiste alors à chercher une fonction  $V(x)$  (représentative de l'énergie) de signe défini positive, dont la dérivée est semi définie et de signe négative dans le même domaine [9].

## IV.2.3 Conception de la commande Backstepping

Cette méthode s'applique à des systèmes ayant une forme dite triangulaire, telle que l'indique la représentation d'état suivante [9] :

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = f_1(X_1) + g_0(X_1)X_2 \\ \dot{X}_2 = f_2(X_1, X_2) + g_1(X_1, X_2)X_3 \\ \dot{X}_n = f_n(X_1, X_2, \dots, X_n) + g_{n-1}(X_1, X_2, \dots, X_n)U \end{cases} \quad \text{IV.1}$$

Avec :  $X = [X_1, X_2, \dots, X_n]^T \in \mathbb{R}^n$  et  $U \in \mathbb{R}$ .

On désire faire suivre à la sortie  $y=x$  le signal de référence  $y_{ref}$  supposée connue. Le système étant d'ordre  $n$ , la conception s'effectue en  $n$  étapes.

### IV.2.3.1 1ère étape Calcul de la première commande virtuelle

On commence par la première équation du système (IV.1) où  $X_2$  sera considérée comme une commande virtuelle intermédiaire. On définit la première référence désirée du sous-système  $X_1$  qui doit suivre la référence définie  $y_{ref}$  tel que [42] :

$$(X_1)_d \triangleq y_{ref} = \alpha_0 \quad \text{IV.2}$$

Où  $(X_1)_d$  est l'état désiré. La première variable d'erreur du sous-système est définie par :

$$e_1 = X_1 - \alpha_0 \quad \text{IV.3}$$

Et :

$$\dot{e}_1 = \dot{X}_1 - \dot{\alpha}_0 \quad \text{IV.4}$$

Pour un tel sous système, nous construisons d'abord la fonction de Lyapunov  $V_1$  sous une forme quadratique :

$$V = \frac{1}{2} e_1^2 \quad \text{IV.5}$$

Sa dérivée temporelle est donnée par :

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1(X_1) + g_0(X_1)X_2 - \dot{\alpha}_0] \quad \text{IV.6}$$

Afin d'assurer la stabilité du sous système e d'après Lyapunov, il faut que  $\dot{V}$  soit négative.

Pour cela on choisit sous la forme :  $\dot{V} = -K_1 e^2 \leq 0$  IV.7

## Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

---

Où  $K_1 > 0$  est un paramètre de conception. En substituant (IV.7) dans (IV.6) on trouve :

$$\dot{V}_1 = e_1 \dot{e}_1 = e_1 [f_1(X_1) + g_0(X_1) X_2 - \dot{\alpha}_1] = -K_1 e_1^2 \quad \text{IV.8}$$

Cela donne la commande virtuelle  $X_2$  :

$$X_2 = \frac{1}{g_0(X_1)} [-K_1 e_1 + \dot{\alpha}_1 - f_1(X_1)] \quad \text{IV.9}$$

Cette dernière sera la nouvelle référence désirée  $X_{2ref}$  du sous système qui suit.

### IV.2.3.2 2ème étape - Calcul de la deuxième commande virtuelle

On considère les deux premières équations du système définie en (IV. 1) :

$$\dot{X}_1 = f_1(X_1) + g_0(X_1) X_2$$

$$\text{Et : } \dot{X}_2 = f_2(X_1, X_2) + g_1(X_1, X_2) X_3$$

Où la nouvelle référence désirée  $\alpha_1$  sera la variable de commande pour le sous système précédent  $X_{2ref}$ . tel que :

$$X_{2ref} \triangleq \alpha_1 \quad \text{IV.10}$$

Et la nouvelle variable d'erreur :

$$e_2 = X_2 - \alpha_1 \quad \text{IV.11}$$

De la même manière, on définit la fonction de Lyapunov pour assurer la stabilité du sous système suivant :

$$\dot{X}_2 = f_2(X_1, X_2) + g_1(X_1, X_2) X_3 \quad \text{IV.12}$$

Ces fonctions dépendent forcément des états précédents du sous système définie par :

$$\dot{X}_1 = f_1(X_1) + g_0(X_1) X_2 \quad \text{IV.13}$$

On choisit comme fonction de Lyapunov étendue pour le sous système (IV.12) :

$$V_2 = V_1 + (1/2)e_2^2 = (1/2)(e_1^2 + e_2^2) \quad \text{IV.14}$$

Sa dérivée est donnée par :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_2 \dot{e}_2 \\ &= -K_1 e_1^2 + e_2 [f_2(X_1, X_2) + g_1(X_1, X_2) X_3 - \dot{\alpha}_1] \end{aligned} \quad \text{IV.15}$$

## Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

---

Afin d'assurer la stabilité de ce système d'après Lyapunov, il faut que  $\dot{V}_2$  soit négative. Pour cela on choisit  $\dot{V}_2$  sous la forme :

$$\dot{V}_2 = -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 \leq 0 \quad \text{IV.16}$$

Où  $K_2 > 0$  est un paramètre de conception.

En substituant (IV.16) dans (IV.15) on trouve :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= -K_1 e_1^2 - K_2 e_2^2 \\ &= -K_1 e_1^2 - e_2 [f_2(X_1, X_2) + g_1(X_1, X_2) X_3 - \dot{\alpha}_1] \end{aligned} \quad \text{IV.17}$$

Cela donne la commande virtuelle  $X_3$  :

$$X_3 = \frac{1}{g_1(X_1, X_2)} [-K_2 e_2 + \dot{\alpha}_1 - f_2(X_1, X_2)] \quad \text{IV.18}$$

Avec :

$$\dot{\alpha}_1 = \frac{\delta \alpha_1}{\delta x_1} = \frac{g_0(x_1) [-k_1 \dot{e}_1 + \ddot{\alpha}_0 - \dot{f}(x_1)] - [-k_1 e_1 + \dot{\alpha}_0 - f_1(x_1)] \dot{g}_0(x_1)}{g_0^2(x_1)} \quad \text{IV.19}$$

Cette dernière sera la nouvelle référence désirée  $X_{3ref}$  du sous système qui suit.

On pose  $X_{3ref} \triangleq \alpha_2$  et on continue jusqu'à la dernière expression du sous système (IV.1) où on atteindra le calcul de la loi de commande réelle.

### IV.2.3.3 La 3ème étape - Calcul de la loi de commande finale

Le système (IV.1) est maintenant considéré dans sa globalité. De la même façon, pour cette étape la référence à suivre sera [43] :

$$(X_n)_{d} \triangleq \alpha_{n-1} \quad \text{IV.20}$$

La variable d'erreur de régulation :

$$e_n = X_n - \alpha_{n-1} \quad \text{IV.21}$$

Sa dérivée est :

$$\dot{e}_n = f_n(X_1, X_2, \dots, X_n) + g_{n-1}(X_1, X_2, \dots, X_n) U - \dot{\alpha}_{n-1} \quad \text{IV.22}$$

Avec comme fonction de Lyapunov étendue :

$$V_n = V_1 + \dots + \frac{1}{2} e_n^2 = \frac{1}{2} (e_1^2 + \dots + e_n^2) \quad \text{IV.23}$$

## Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

La dérivée devient :

$$\begin{aligned} \dot{V}_n &= \dot{V}_1 + \dots + e_n \dot{e}_n \\ &= -K_1 e_1^2 + \dots + e_n [f_n(X_1, X_2, \dots, X_n) + g_{n-1}(X_1, X_2, \dots, X_n)U - \dot{\alpha}_{n-1}] \end{aligned} \quad \text{IV.24}$$

Dans cette dernière étape, on est arrivé à déduire la vraie loi de commande  $U$  qui permet d'atteindre les objectifs de conception pour le système global qui contrairement aux lois  $X_i$  qui sont des lois virtuelles. Un bon choix de celle-ci doit satisfaire. Pour un tel sous système, nous construisons d'abord la fonction de Lyapunov  $V_1$  sous une forme quadratique:

$$f_n(X_1, X_2, \dots, X_n) + g_{n-1}(X_1, X_2, \dots, X_n)U - \dot{\alpha}_{n-1} = -K_n e_n^2 \quad \text{IV.25}$$

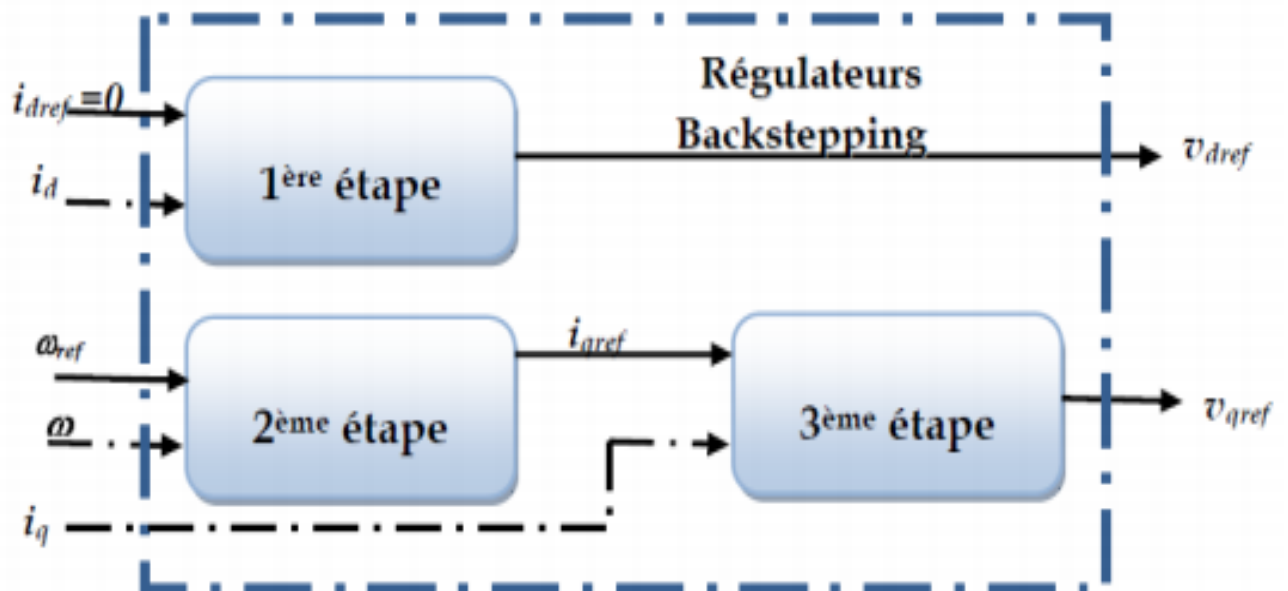
Où  $K_n > 0$  est un paramètre de conception.

$$U = \frac{1}{g_{n-1}(X_1, X_2, \dots, X_n)} [-K_n e_n + \dot{\alpha}_{n-1} - f_n(X_1, X_2, \dots, X_n)] \quad \text{IV.26}$$

Ce qui garantit la négativité de la dérivée de la fonction de Lyapunov étendue :

$$\dot{V}_n = -K_1 e_1^2 - \dots - K_n e_n^2 < 0$$

Nous avons ainsi défini la méthodologie de la commande Backstepping que nous allons mettre en application sur le MSAP.



**Figure IV.1** Structure interne du bloc régulateur Backstepping. [12]



## IV.2.4 Application du Backstepping à la commande du MSAP

Dans cette partie, nous présentons l'application de la commande Backstepping au moteur MSAP. Cette approche est conçue de telle façon à garder la même structure générale d'une commande vectorielle, tout en assurant une régulation et une limitation des courants [12].

Les modèles donnés en (II.42) et (II.45) peuvent être réécrits sous la forme suivante :

$$\begin{cases} \frac{di_d}{dt} = \frac{U_d}{L_d} - \frac{R_d}{L_d} \cdot i_d + \frac{L_q}{L_d} \cdot i_q \cdot \omega \\ \frac{di_q}{dt} = \frac{U_q}{L_q} - \frac{R_q}{L_q} \cdot i_q - \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d \cdot \omega - \frac{\phi_f}{L_q} \cdot \omega \\ \frac{d\Omega}{dt} = \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot i_q - \frac{C_t}{J} - \frac{f}{J} \cdot \Omega \end{cases} \quad (IV.27)$$

L'idée de base de la commande par Backstepping est de rendre le système bouclé en sous systèmes d'ordre un en cascade stable au sens de Lyapunov, ce qui lui confère des qualités de robustesse et une stabilité globale asymptotique.

L'objectif fixé est d'asservir la vitesse en choisissant comme sous système les expressions de  $\frac{di_d}{dt}$  et  $\frac{di_q}{dt}$  et comme variables intermédiaires les courants statoriques ( $i_d$ ,  $i_q$ )

A partir de ces variables on calcule ainsi les commandes en tension ( $V_d$ ,  $V_q$ ) nécessaire pour assurer la commande en vitesse du MSAP ainsi la stabilité du système global [12].

Les erreurs sont définies par les expressions suivantes :

$$\begin{cases} \varepsilon_d = i_d^* - i_d \\ \varepsilon_q = i_q^* - i_q \\ \varepsilon_\Omega = \Omega^* - \Omega \end{cases} \quad IV.28$$

Et Les dynamiques des erreurs sont données comme suit :

$$\begin{cases} \dot{\varepsilon}_d = \dot{i}_d^* - \dot{i}_d \\ \dot{\varepsilon}_q = \dot{i}_q^* - \dot{i}_q \\ \dot{\varepsilon}_\Omega = \dot{\Omega}^* - \dot{\Omega} \end{cases} \quad IV.29$$

Avec :

$$\begin{cases} i_d^* = 0 \\ i_q^* = 0 \end{cases}$$

➤ **Etape 01 : "boucle de vitesse"**

Du fait que l'objectif exige que l'erreur converge vers zéro, et exige aussi que le courant doit être régulé et limité, on utilise la fonction de Lyapunov V1 qui représente en quelque sorte, l'énergie.

L'équation de la vitesse ainsi sa dérivée s'écrivent comme suivant :

$$\begin{cases} v_1 = \frac{1}{2} \cdot \varepsilon_\Omega^2 \\ \dot{v}_1 = \dot{\varepsilon}_\Omega \cdot \varepsilon_\Omega \end{cases} \quad \text{IV.30}$$

On tient compte de cette condition :

$$\dot{v}_1 = -k_\Omega \cdot \varepsilon_\Omega^2 \quad \text{IV.31}$$

$$\dot{v}_1 = \varepsilon_\Omega \cdot \dot{\varepsilon}_\Omega = \varepsilon_\Omega * \left[ \dot{\varepsilon}_\Omega^* - \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot i_q^* + \frac{C_t}{J} + \frac{f}{J} \cdot \Omega \right] = -k_\Omega \cdot \varepsilon_\Omega^2 \quad \text{IV.32}$$

Avec :  $k_\Omega > 0$  pour assurer  $\dot{v}_1 < 0$ .

Afin que la dérivée du critère soit toujours négative, il faut que la dérivée de V1 prenne la forme ( $\dot{v}_1 = -k_\Omega \cdot \varepsilon_\Omega^2$ ) introduit par la méthode du Backstepping, d'où :

$$\dot{\varepsilon}_\Omega^* - \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot i_q^* + \frac{C_t}{J} + \frac{f}{J} \cdot \Omega = -k_\Omega \cdot \varepsilon_\Omega \quad \text{IV.33}$$

A partir de l'équation (IV.32) on aura :

$$i_q^* = -\frac{2 \cdot J}{3 \cdot p \cdot \phi_f} \left[ -k_\Omega \cdot \varepsilon_\Omega - \dot{\varepsilon}_\Omega^* - \frac{C_t}{J} - \frac{f}{J} \cdot \Omega \right] \quad \text{IV.34}$$

➤ **Etape 02 : contrôle des tensions**

❖ **La tension Ud**

Pour ce qui suit, l'assurance de stabilité et convergences de la composante  $i_q$  à la refer  $i_q^*$ , nous conduit à choisir la fonction de "Lyapunov" suivante:

## Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

---

$$v_2 = \frac{1}{2} \cdot (\varepsilon_d^2 + \varepsilon_q^2 + \varepsilon_\Omega^2) \quad \text{IV.35}$$

La dérivée de  $V_2$ , est :

$$\dot{V}_2 = \varepsilon_q \cdot \dot{\varepsilon}_q + \varepsilon_d \cdot \dot{\varepsilon}_d + \varepsilon_\Omega \cdot \dot{\varepsilon}_\Omega \quad \text{IV.36}$$

L'expression (IV.36) peut être développée de manière à avoir sa fonction dérivée :

$$\varepsilon_d \cdot \dot{\varepsilon}_d = \varepsilon_d \left[ -\frac{U_d}{L_d} + \frac{R_d}{L_d} \cdot id - \frac{L_q}{L_d} \cdot j_q \cdot \omega \right] = -k_d \cdot \varepsilon_d^2 \quad \text{IV.37}$$

A partir de l'équation (IV.37) on aura :

$$U_d = -L_d \left( -k_d \cdot \varepsilon_d - \frac{R_d}{L_d} \cdot id + \frac{L_q}{L_d} \cdot j_q \cdot \omega \right) \quad \text{IV.38}$$

### ❖ La tension $U_q$

$$\varepsilon_\Omega \cdot \dot{\varepsilon}_\Omega = \varepsilon_\Omega \left[ \dot{\Omega}^* \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot j_q^* + \frac{C_t}{J} + \frac{f}{J} \cdot \Omega \right] \quad \text{IV.39}$$

On ajoutant et soustrayant :

$$-\frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot j_q^* \quad \text{IV.40}$$

L'équation(IV.39) deviendra sous la forme suivante :

$$\varepsilon_\Omega \cdot \dot{\varepsilon}_\Omega = \varepsilon_\Omega \left[ \dot{\Omega}^* - \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot j_q^* + \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot \varepsilon_q + \frac{C_t}{J} + \frac{f}{J} \cdot \Omega \right] \quad \text{IV.41}$$

$$t_1 = \varepsilon_\Omega \left[ -\frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot j_q^* + \dot{\Omega}^* + \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot \varepsilon_q + \frac{C_t}{J} + \frac{f}{J} \cdot \Omega \right] \quad \text{IV.42}$$

$$= \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot \varepsilon_q \varepsilon_\Omega + \varepsilon_\Omega \cdot \left[ \dot{\Omega}^* - \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot j_q^* + \frac{C_t}{J} + \frac{f}{J} \cdot \Omega \right]$$

Donc :

$$t_1 = \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot \varepsilon_q \varepsilon_\Omega + \dot{V}_1 \quad \text{IV.43}$$

## Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

---

Et :

$$t_2 = \varepsilon_q \dot{\varepsilon}_q = \varepsilon_q \left[ -\frac{U_q}{L_q} + \frac{R_q}{L_q} \cdot i_q + \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d \cdot \omega + \frac{\phi_f}{L_q} \cdot \omega \right] \quad \text{IV.44}$$

Sachant que :

$$T = t_1 + t_2$$

$$T = -k_\Omega \cdot \varepsilon_\Omega^2 + \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot \varepsilon_q \varepsilon_\Omega + \varepsilon_q \left[ -\frac{U_q}{L_q} + \frac{R_q}{L_q} \cdot i_q + \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d \cdot \omega + \frac{\phi_f}{L_q} \cdot \omega \right] \quad \text{IV.45}$$

$$= -k_\Omega \cdot \varepsilon_\Omega^2 + \varepsilon_q \left[ -\frac{U_q}{L_q} + \frac{R_q}{L_q} \cdot i_q + \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d \cdot \omega + \frac{\phi_f}{L_d} \cdot \omega + \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot \varepsilon_\Omega \right] \quad \text{IV.46}$$

Donc :

$$-\frac{U_q}{L_q} + \frac{R_q}{L_q} \cdot i_q + \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d \cdot \omega + \frac{\phi_f}{L_d} \cdot \omega + \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot \varepsilon_\Omega = -k_q \cdot \varepsilon_q \quad \text{IV.47}$$

A partir de l'équation (IV.46) on aura :

$$U_q = -L_q \left[ -k_q \cdot \varepsilon_q - \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot \varepsilon_\Omega - \frac{\phi_f}{L_d} \cdot \omega - \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d \cdot \omega - \frac{R_q}{L_q} \cdot i_q \right] \quad \text{IV.48}$$

- Et vers la fin les lois de commandes sont sous les formes suivantes :

$$\left\{ \begin{array}{l} i_q^* = -\frac{2 \cdot J}{3 \cdot p \cdot \phi_f} \left[ -k_\Omega \cdot \varepsilon_\Omega - \dot{\Omega}^* - \frac{C_t}{J} - \frac{f}{J} \cdot \Omega \right] \\ U_d = -L_d \left( -k_d \cdot \varepsilon_d - \frac{R_d}{L_d} \cdot i_d + \frac{L_q}{L_d} \cdot i_q \cdot \omega \right) \\ U_q = -L_q \left[ -k_q \cdot \varepsilon_q - \frac{3 \cdot p \cdot \phi_f}{2 \cdot J} \cdot \varepsilon_\Omega - \frac{\phi_f}{L_d} \cdot \omega - \frac{L_d}{L_q} \cdot i_d \cdot \omega - \frac{R_q}{L_q} \cdot i_q \right] \end{array} \right. \quad \text{IV.49}$$

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

## IV.2.5 Structure complète de la commande backstepping de la GSAP

À l'aide des étapes précédentes de la modélisation, on peut construire la structure complète de la commande backstepping de la GSAP. Le schéma bloc de simulation est illustré dans la (Figure IV.2) suivante :

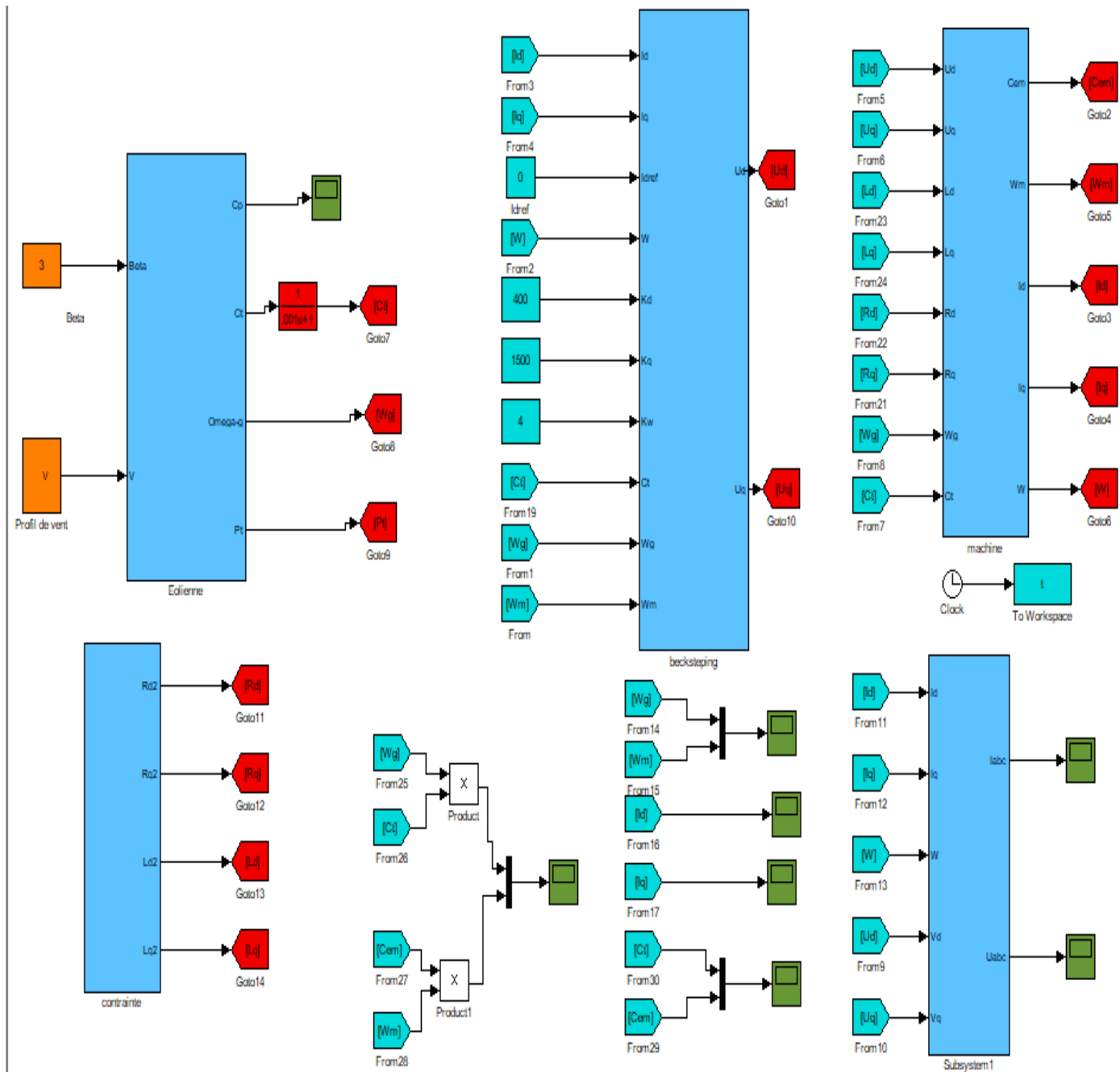


Figure IV.2. Structure de la commande de la GSAP par backstepping.

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

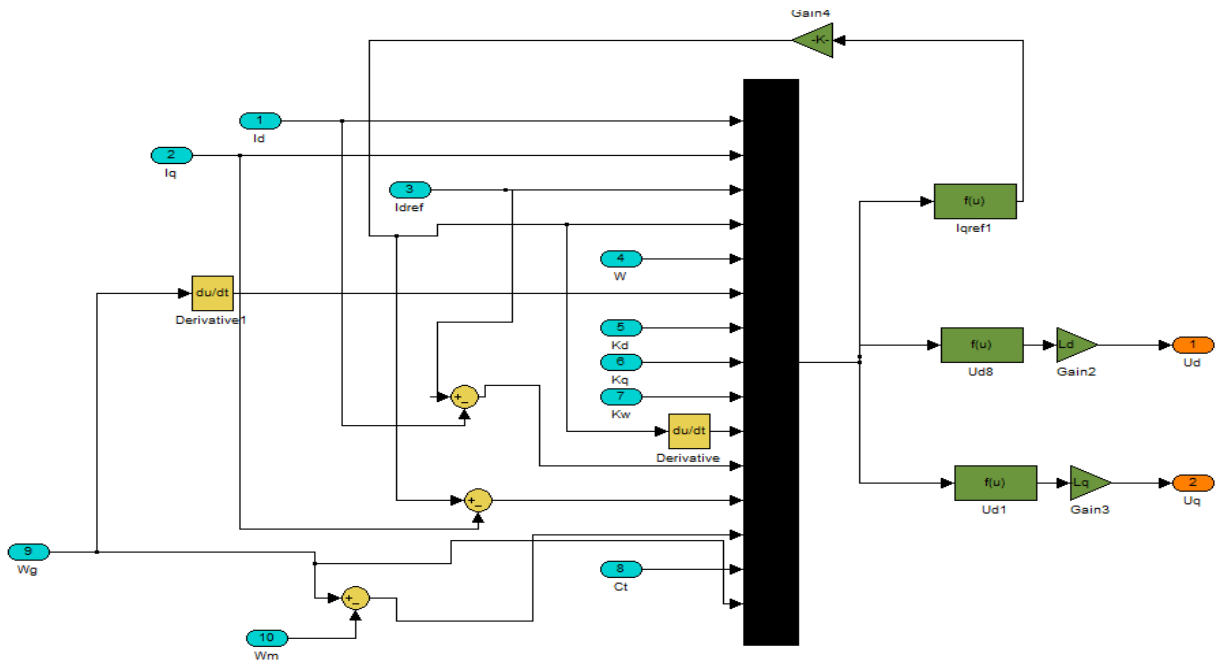


Figure IV.3 Schéma bloc de la commande backstepping.

## IV.2.6 Résultats de simulation et interprétation

Dans l'optique d'améliorer la commande vectorielle par la stratégie backstepping, et en vue de comparer les performances de ces deux commandes avec et sans contraintes, nous allons, comme dans le chapitre précédent, effectuer deux tests différents.

### IV.2.6.1 Test Sans application de contraintes

Dans ce cas-là, aucune contrainte n'est appliquée et les conditions idéales de fonctionnement sont réunies.

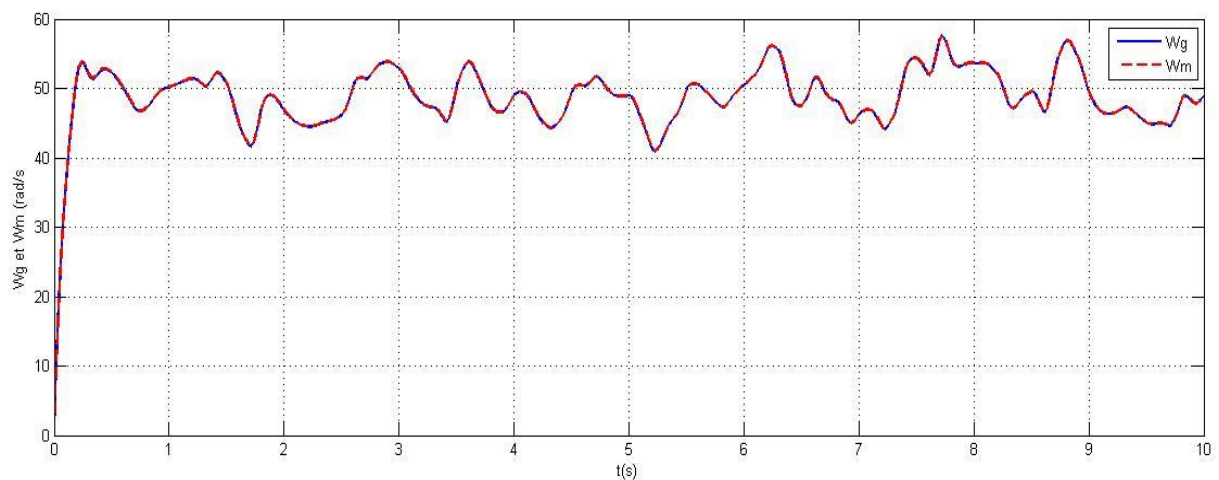
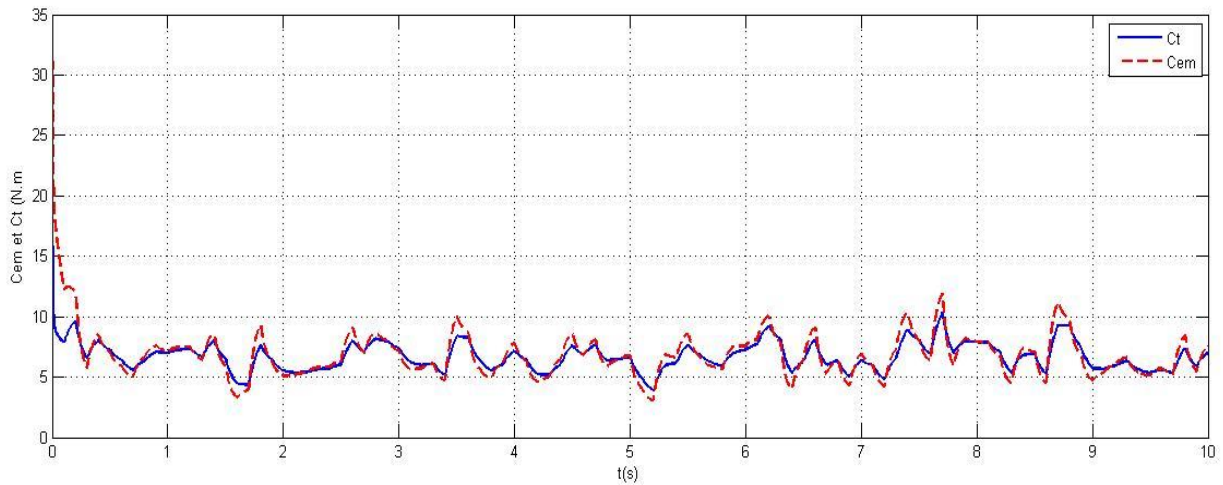
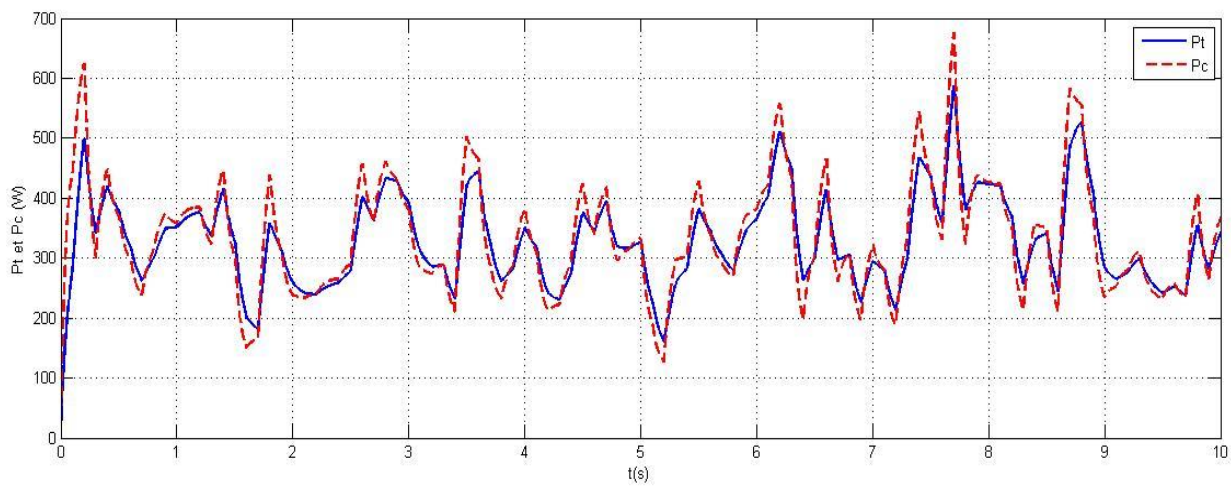


Figure IV.4. Vitesse de rotation  $W$  (rad/s)

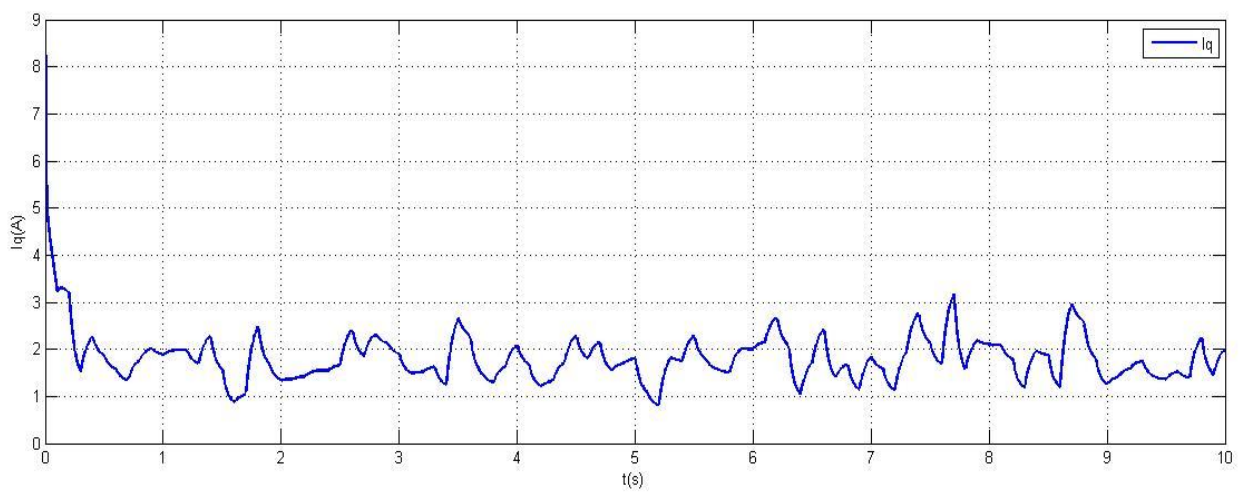
# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP



*Figure IV.5. Couples  $C_t$  et  $C_{em}$  (N.m).*



*Figure IV.6. Puissances générées  $P_c$  &  $P_t$  (Watt).*



*Figure IV.7. Courant  $I_q$  (A).*

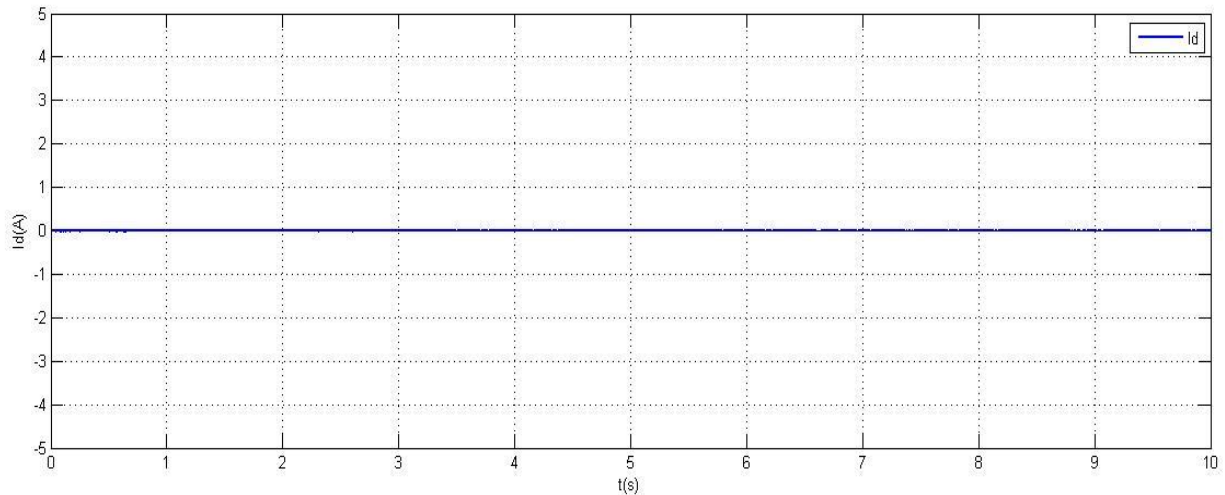


Figure IV.8. Courant  $I_d$  (A).

## IV.2.6.2 Test Avec application de contraintes

Lors de ce second test visant à tester la robustesse de la machine, des contraintes similaires à celles utilisées dans le chapitre précédent seront appliquées, à savoir :

- A  $t=2\text{sec}$  : Augmentation des résistances de 25% et des inductances de 7%.
- A  $t=4\text{sec}$  : Augmentation des résistances de 50% et des inductances de 14%.

Les résultats obtenus par cette simulation sont présentés par les figures ci-après, suivis de leurs interprétations :

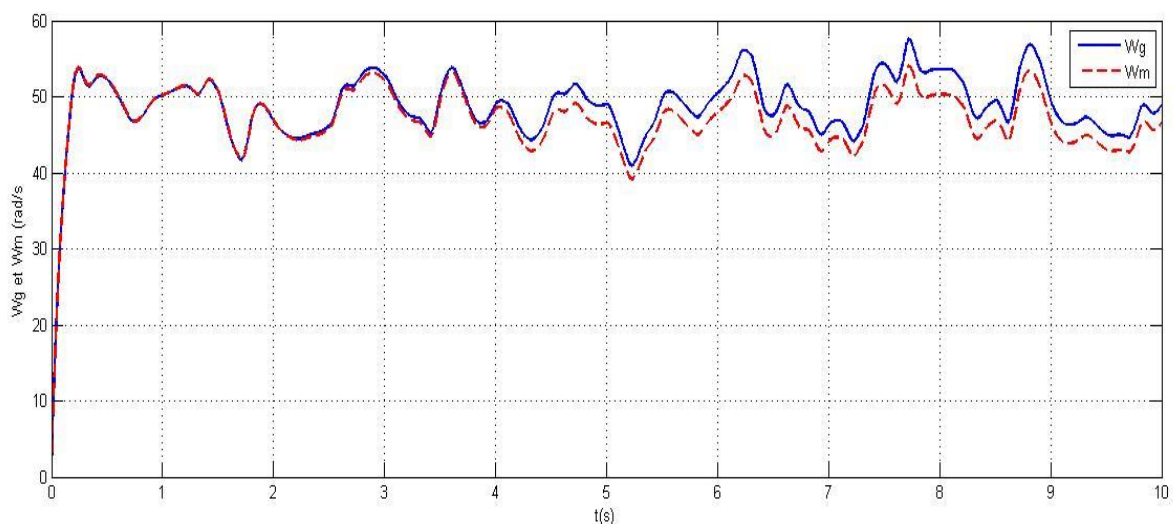
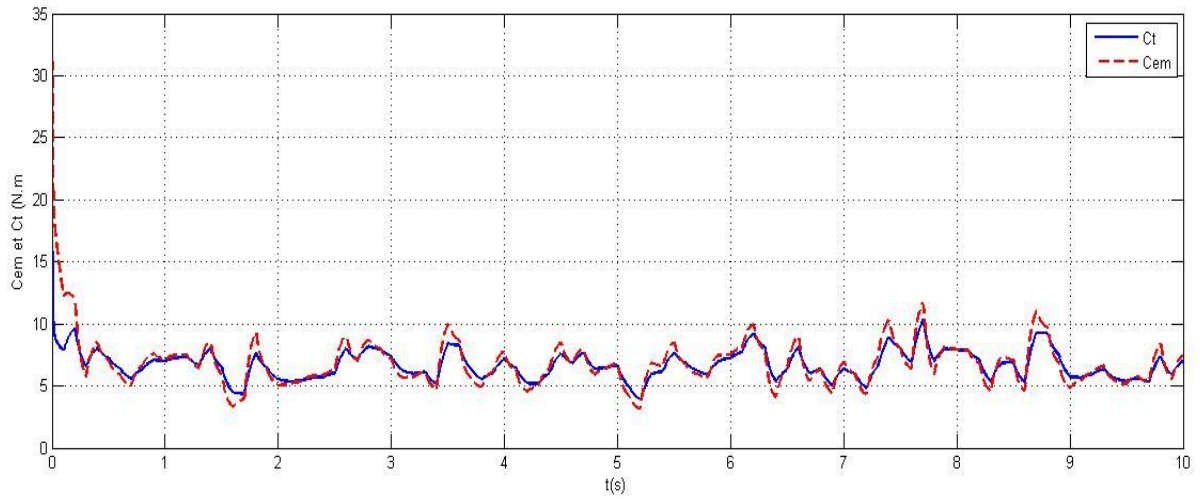


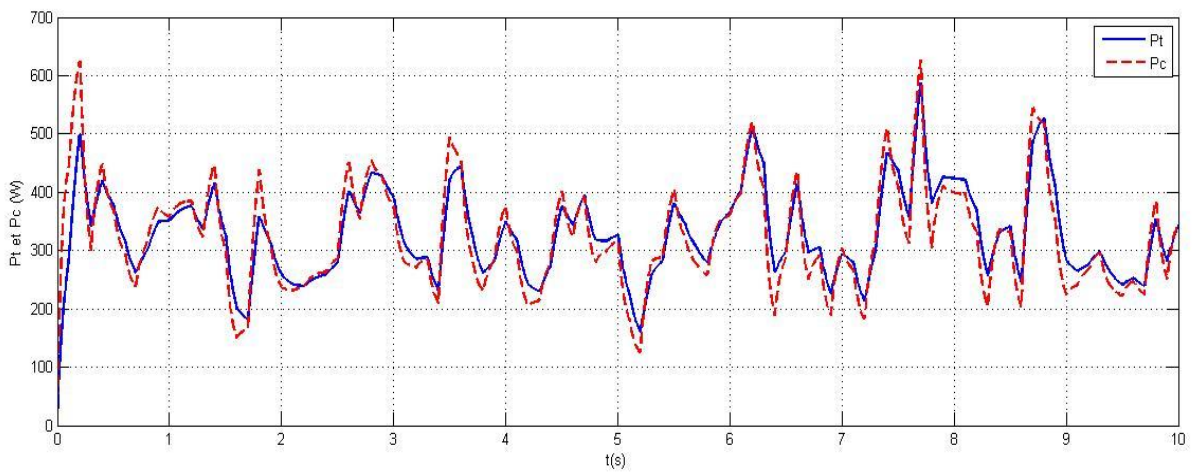
Figure IV.9. Vitesse de rotation  $W$  (rad/s) sous contraintes.



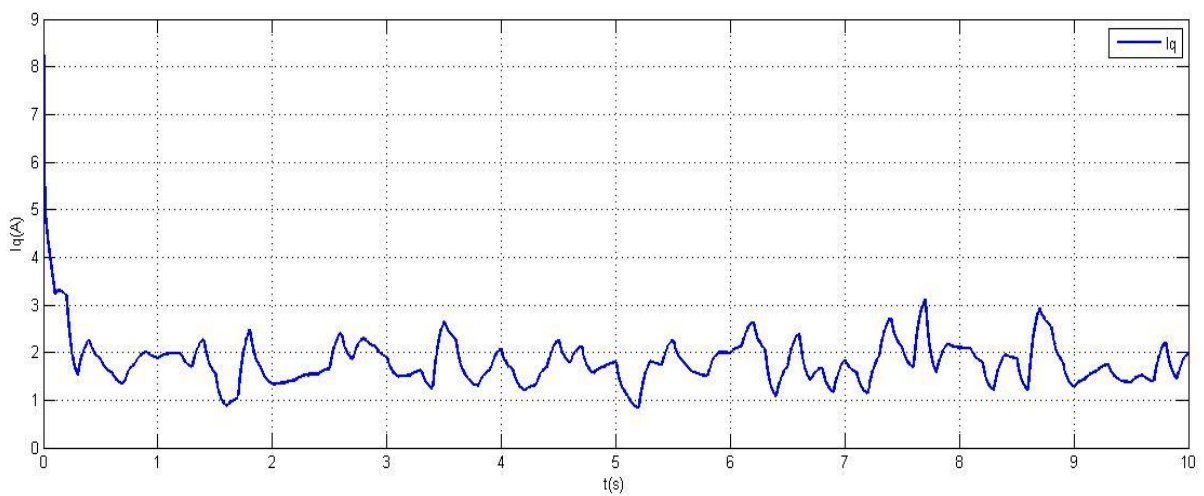
# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP



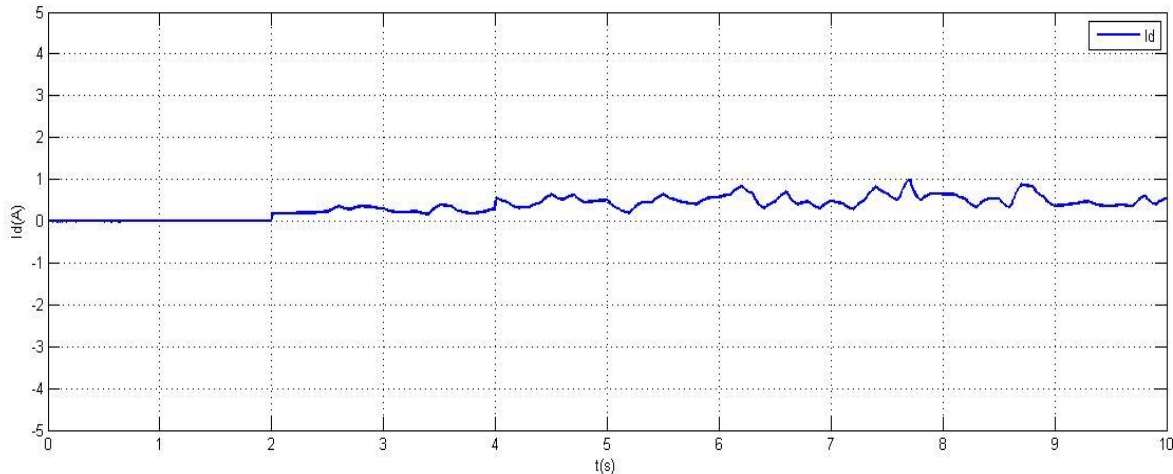
*Figure IV.10. Couples  $C_t$  et  $C_{em}$  sous contraintes.*



*Figure IV.11. Puissances générées sous contraintes*



*Figure IV.12. Courant  $I_q$  sous contraintes.*



*Figure IV.13. Courant Id sous contraintes*

## ❖ Interprétations :

On remarque que la vitesse (Fig.IV.4) suit parfaitement la consigne avant avoir appliqué les perturbations. Un décalage conséquent apparaît suite à l'application des contraintes.(Fig IV.9)

Pour la puissance (Fig.IV.11), on constate qu'elle est bonne sous les plus grandes contraintes à  $t=4s$ , contrairement à la commande vectorielle, avec laquelle la poursuite est mauvaise à partir de cet instant.

Le couple (Fig.IV.10) et le courant  $i_q$  (Fig.IV.12) ont d'assez bons résultats, et le courant  $i_d$  (Fig.IV.13), est perturbé mais légèrement moins qu'avec la commande vectorielle.

## IV.3La Logique floue

### IV.3.1 Historique de la commande floue

Les prémisses de la logique floue sont apparues dans les années 1940, avec les premières approches par des chercheurs américains du concept d'incertitude. LOTFI ZADEH automaticien de réputation internationale, professeur à l'université de Berkeley en Californie a publié en 1965 le premier article concernant une nouvelle méthode pour décrire les incertitudes non- probabilistes, ce qu'il appellera les ensembles flous [43].

En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par LOTFI ZADEH sur une chaudière à vapeur, matériel dont on connaît la complexité, introduisant ainsi la commande floue dans la régulation d'un processus industriel. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle la régulation de fours de cimenterie

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

---

réalisée par la société F.L.Smidt-Fuller. Grâce aux chercheurs Takagi et Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985.[44]

## IV.3.2 Les différentes applications de la logique floue

La logique floue est une technique utilisée en intelligence artificielle. Et parmi ces applications on trouve [48] :

- ✓ Utilisation dans des domaines aussi variés que l'automatisme (freins ABS),
- ✓ la robotique (reconnaissance de formes),
- ✓ la gestion de la circulation routière (feux rouges),
- ✓ le contrôle aérien,
- ✓ l'environnement (météorologie, climatologie, sismologie, analyse du cycle de vie).
- ✓ la médecine (aide au diagnostic).
- ✓ l'assurance (sélection et prévention des risques) et bien d'autres.

## IV.3.3 principe de la logique floue

Les systèmes flous sont des systèmes à base de connaissances construits à partir des opérateurs de la logique floue. Cette logique est basée sur l'imitation des aspects approximatifs et qualitatifs du raisonnement humain. Cette théorie était mal perçue à l'époque du fait que le mode de penser était plus strict et technique. De plus, le terme choisi « flou » n'a pas contribué à rendre son acceptation facile [49].

La technique de commande floue est souvent présentée comme une technique robuste capable de compenser quasi naturellement les incertitudes et / ou le manque de connaissances précises quant au processus à commander. Dans la majorité des applications des régulateurs flous, ce dernier est construit à partir de connaissances linguistiques fournies par un expert [49].

### IV.3.3.1 Théorie Des Ensembles Flous

Un ensemble flou  $A$  sur un univers de discours  $U$  est caractérisé par une fonction d'appartenance ( $x$ ) qui prend ses valeurs sur l'intervalle  $[0, 1]$ . Un ensemble flou est une généralisation d'un sous ensemble ordinaire qui sa fonction d'appartenance prend que les deux valeurs 0 ou 1. La fonction d'appartenance fournit une mesure du degré qu'un élément de  $U$  soit un élément d'un sous ensemble flou. En logique floue un élément peut résider dans plus qu'un ensemble à des degrés d'appartenances différents. Ceci ne peut se produire dans la théorie des ensembles ordinaires.

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

Un ensemble flou A dans U peut être représenté comme un ensemble de paires ordonnées de l'élément générique x et son niveau (degré) d'appartenance :  $A = \{(x, \mu_A(x))/x \in U\}$  [47].

## IV.3.3.2 Les fonctions d'appartenances

Pour le traitement numérique en logique floue, il est nécessaire d'associer pour chaque valeurs de la variable linguistique une fonction d'appartenance qui prend différentes formes suivantes [49]:

- fonction triangulaire : elle est définie par trois paramètres {a,b,c} :

$$\mu(x) = \max \left[ \min \left( \frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{d-c} \right), 0 \right] \quad \text{IV.50}$$

- fonction trapézoïde : elle est définie par quatre paramètres {a,b,c,d} :

$$\mu(x) = \max \left[ \min \left( \frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{d-x}{d-c} \right), 0 \right] \quad \text{IV.51}$$

- fonction gaussienne : elle est définie par deux paramètres {m,σ}

$$\mu(x) = \exp \left( -\frac{(x-m)^2}{2\sigma^2} \right) \quad \text{IV.52}$$

- fonction sigmoïdale : elle est définie par deux paramètres {a,c}

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(a(x-c))} \quad \text{IV.53}$$

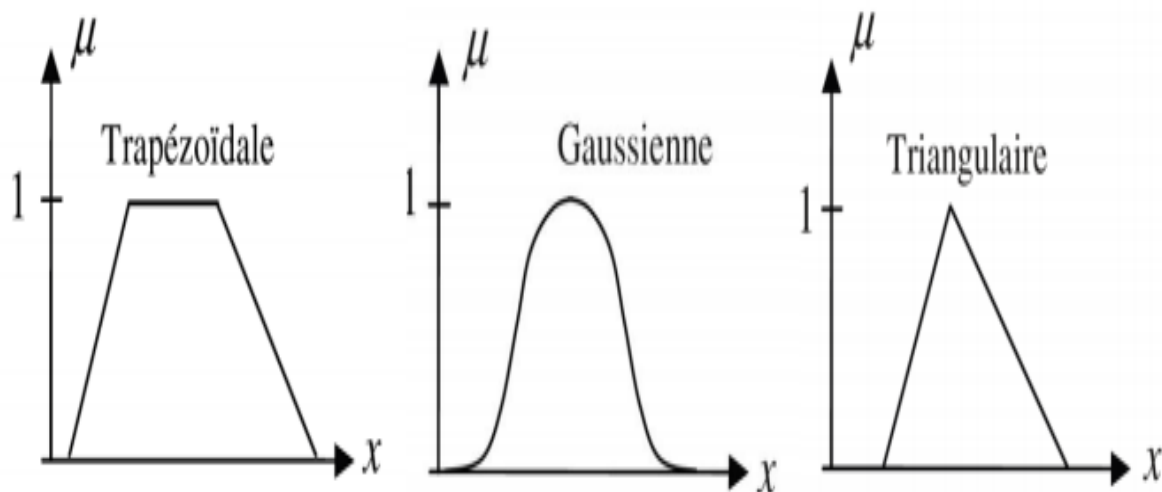


Figure IV.14 Différentes formes des fonctions d'appartenance [47].

### IV.3.3.3 Les opérateurs de la logique floue

Comme dans la théorie des ensembles classiques, on définit l'intersection( $\cap$ ), l'union( $\cup$ ) des ensembles flous ainsi que le complémentaire ( $\bar{\phantom{x}}$ ) d'un ensemble flou. Ces relations sont traduites par les opérateurs 'et', 'ou' et 'non'. De nouvelles fonctions d'appartenance liées à ces opérateurs sont établies. [47]

• **L'intersection :**

$$x \in A \cap B \Leftrightarrow x \in \mu_{A \cap B} \quad | \quad \mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \text{IV.54}$$

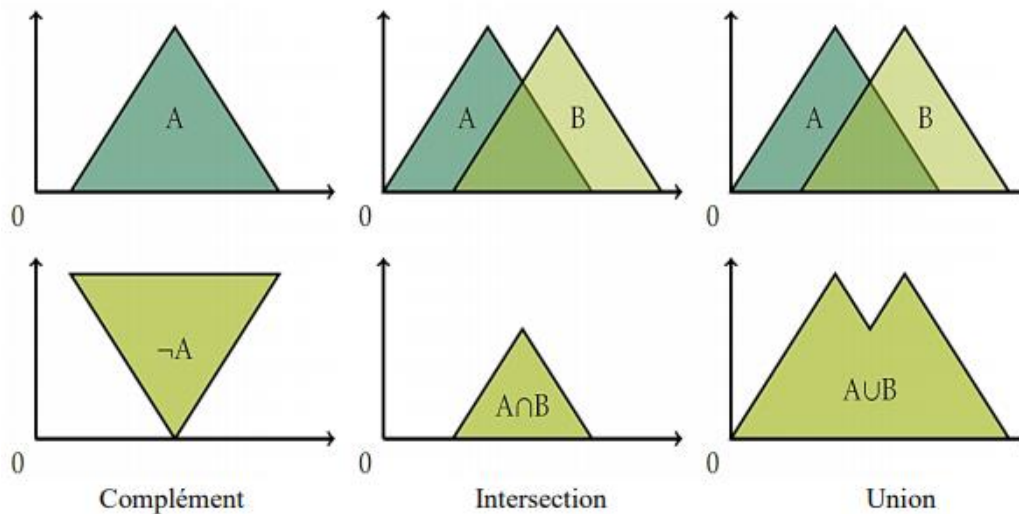
• **L'union :**

$$x \in A \cup B \Leftrightarrow x \in \mu_{A \cup B} \quad | \quad \mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)] \quad \text{IV.55}$$

• **Le complément (négation) :**

$$\forall x \in X, \mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad \text{IV.56}$$

La figure () résume ces opérations, de façon graphique.

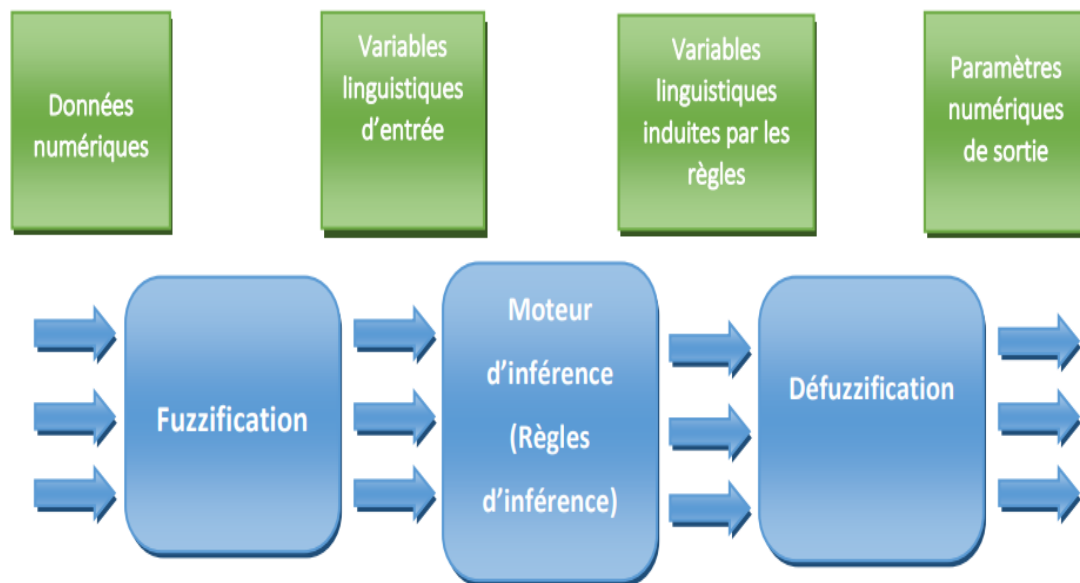


*Figure IV.15 Exemple d'opérations sur des ensembles flous. [47]*

L'intersection floue de deux ensembles flous peut être définie d'une façon plus générale par une opération binaire sur l'intervalle unitaire, c'est-à-dire une fonction de la forme suivante,  $T: [0, 1] \times [0, 1] \rightarrow [0, 1]$ . Pour que la fonction  $T$  soit qualifiée pour assurer une intersection floue, elle doit vérifier quelques propriétés. Des fonctions connues par le nom t-normes (normes triangulaires) possèdent ces propriétés. Similairement, des fonctions appelées t-conormes peuvent être utilisées pour l'union floue.

## IV.3.4 Système de commande Flou

Un système flou est donc formé de trois étapes comme indiqué sur la Figure () La première, l'étape de fuzzification transforme les valeurs numériques en degrés d'appartenance aux différents ensembles flous de la partition. La seconde étape concerne le module d'inférence, qui est constitué de deux blocs, le moteur d'inférence et la base des règles. Enfin, l'étape de défuzzification qui permet d'inférer une valeur nette (précise), utilisable en commande par exemple, à partir du résultat de l'agrégation des règles [50].



*Figure IV.16 Schéma synoptique du système flou. [47]*

### IV.3.4.1 Règles Floues

Une règle linguistique se met sous la forme SI...ALORS.... Et s'exprime de la manière suivante: [47]

- SI (un ensemble de conditions est satisfait).
- ALORS (un ensemble d'actions doit être exécuté).

Une règle est composée de deux parties :

- Partie antécédente appelée prémisse ou condition qui est exprimée par SI.... Donne la description du système.
- Partie conséquente (conclusion) qui est exprimée par ALORS...

## Un exemple de règle floue :

SI vitesse est lente ALORS arrêt est court.

La variable vitesse peut avoir une plage de valeurs entre 0 et 220 km/h. On peut inclure des sous-ensembles flous (très lent, lent, moyenne, rapide, très rapide) pour modifier cette règle. Chaque sous-ensemble flou représente une valeur linguistique pour la variable.

### IV.3.4.2 La fuzzification

La fuzzification transforme la grandeur physique d'entrée en une grandeur floue, utilisée pour activer les règles qui sont exprimées par des variables linguistiques associées à des ensembles flous. Il existe deux types de fuzzificateur généralement utilisés à savoir : La fuzzification singleton et la fuzzification non-singleton [49].

### IV.3.4.3 Le moteur d'inférence

Le moteur d'inférence floue transforme, à l'aide des techniques de raisonnement flou, la partie floue issue de la fuzzification en une nouvelle partie floue. En fait, le moteur d'inférence combine les règles floues, en utilisant le principe de la logique floue, pour effectuer une transformation à partir des ensembles flous dans l'espace d'entrée vers des ensembles flous dans l'espace de sortie [49].

➤ Pour le réglage par logique floue, on utilise en générale une des méthodes suivantes :

- **Méthode d'inférence max-min (méthode de Mamdani)**

La méthode d'inférence max-min est réalisée, au niveau de la condition l'opérateur « ET » par la formulation du minimum.

La conclusion dans chaque règle, introduite par « ALORS », lie le facteur d'appartenance de la prémisse avec la fonction d'appartenance de la variable de sortie est réalisé par la formation du minimum. Enfin l'opérateur « OU » qui lie les différentes règles est réalisé par la formation du maximum [49].

- **Méthode d'inférence max-produit (méthode de Larsen)**

La méthode d'inférence max-produit est réalisée, au niveau de la condition, l'opérateur « ET » par la formation du produit. La condition dans chaque règle, introduite par « ALORS » est réalisée par la formation du produit. L'opérateur « OU », qui lie les différentes règles, est réalisé par la formation du maximum [49].

- **Méthode de Sugeno**

L'opérateur « ET » est réalisé par la formation du minimum, la conclusion de chaque règle floue a une forme polynomiale. La sortie est égale à la moyenne pondérée de la sortie de chaque règle floue [49].

#### IV.3.4.4 La défuzzification

La sortie issue de l'inférence est une grandeur floue. Donc pour pouvoir définir la loi de commande, le régulateur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification jouant le rôle de convertisseur de la commande floue en valeur physique nécessaire pour l'état du processus [49].

La défuzzification définit la loi de commande du régulateur logique flou, elle réalise donc la conversion inverse de la fuzzification (conversion digitale/analogique) [48].

Les méthodes de défuzzification les plus utilisées sont [48] :

- Méthode par valeur maximale.
- Méthode par valeur moyenne des maxima.
- Méthode par centre de gravité.
- Méthode des hauteurs pondérées.

- **Méthode du maximum :**

Cette stratégie génère une commande qui représente la valeur maximale de la fonction d'appartenance résultante issue de l'inférence. Cependant, cette méthode présente un certain inconvénient lorsqu'il existe plusieurs valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale [45].

- **Méthode de la moyenne des maxima :**

Cette méthode génère une commande qui représente la valeur moyenne de toutes les valeurs pour lesquelles la fonction d'appartenance résultante est maximale [45].

- **Méthode du centre de gravité :**

Cette méthode est la plus utilisée dans les contrôleurs flous, elle génère le centre de gravité  $y$  de la fonction d'appartenance issue de l'inférence. L'abscisse du centre de gravité peut être déterminée à l'aide de la relation suivante [45]:



$$\bar{y} = \frac{\int y \mu_B(y) dy}{\int \mu_B(y) dy} \quad \text{IV.57}$$

L'intégrale au dénominateur donne la surface, tandis que l'intégrale au numérateur correspond au moment de la surface.

La détermination du centre de gravité nécessite une envergure de calcul assez importante, surtout pour l'exécution en temps réel. De ce fait, cette méthode est la plus coûteuse en temps de calcul.

- **Méthode des hauteurs pondérées :**

Au fond, cette méthode n'est rien d'autre qu'un cas particulier de la méthode du centre de gravité. Dans ce cas, on choisit des fonctions d'appartenance pour la variable de sortie des barres (rectangles de largeurs étroites), et on aboutit à une simplification notable de la détermination de l'abscisse du centre de gravité [45].

L'abscisse du centre de gravité se calcule alors à l'aide de la relation suivante :

$$y = \frac{\sum_{k=1}^M \mu_B^k(\bar{y}^k) \bar{y}^k}{\sum_{k=1}^M \mu_B^k(\bar{y}^k)} \quad \text{IV.58}$$

Où :  $\bar{y}^k$  dénote le centre de gravité de l'ensemble flou  $B^k$

M : nombre de règles

L'équation ci-dessus est facile à utiliser. Cependant, son inconvénient réside dans le fait qu'elle n'utilise pas la forme entière de la fonction d'appartenance. Elle n'utilise que le centre  $\bar{y}^k$  du support de la fonction d'appartenance de la conclusion, et ceci sans tenir compte du fait que la fonction d'appartenance soit étroite ou large [49].

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

## IV.3.5 Application de régulateur par logique floue sur la commande backstepping

Afin de simplifier la description des inférences, on utilise une matrice d'inférence (tableau IV.1).

$e \backslash \Delta e$	NG	EZ	PG
NG	NG	NG	EZ
EZ	NG	EZ	PG
PG	EZ	PG	PG

Table IV.1 matrice d'inférences

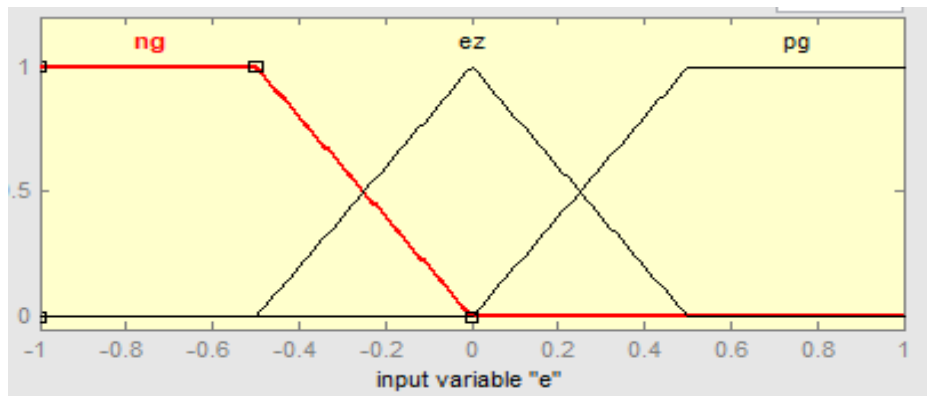


Figure IV.17 Représentation de la fonction d'appartenance de l'erreur.

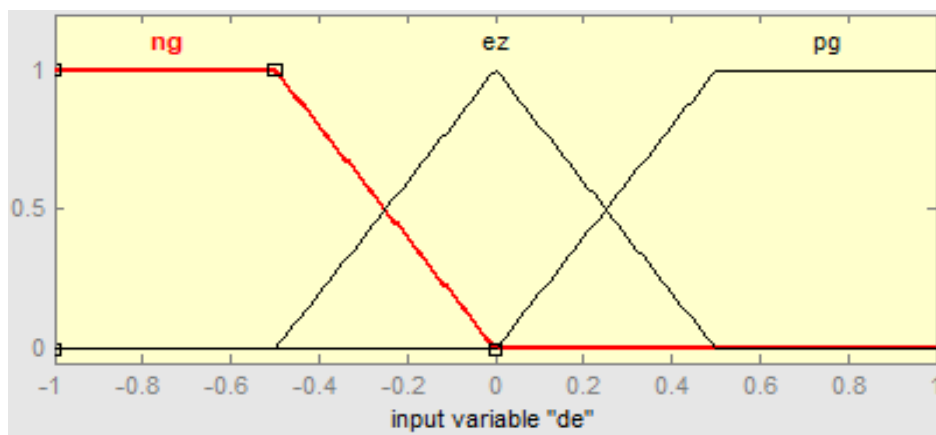


Figure IV.18 Représentation de la fonction d'appartenance de la variation d'erreur.

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

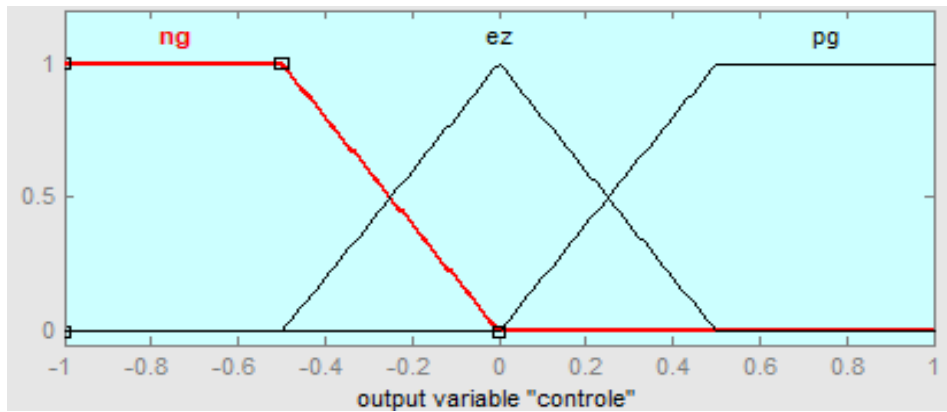


Figure IV.19 Fonction d'appartenance du contrôle.

## IV.3.6 Structure complète de la commande bacstepping-fuzzy de la GSAP

La figure (IV.20) illustre le schéma de simulation sur MATLAB de la commande backstepping-fuzzy.

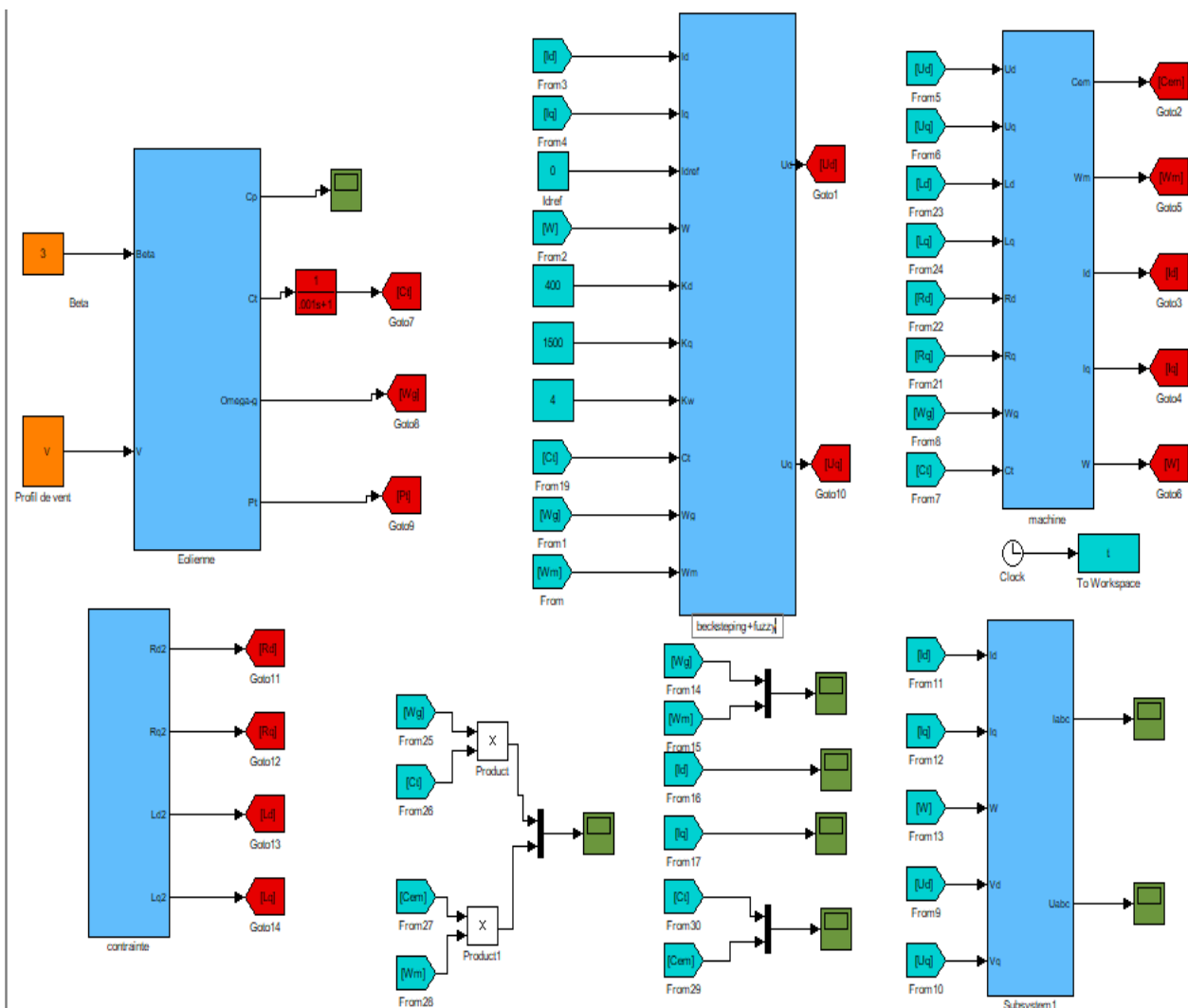


Figure IV.20 Structure de la commande de la GSAP par backstepping-fuzzy.

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

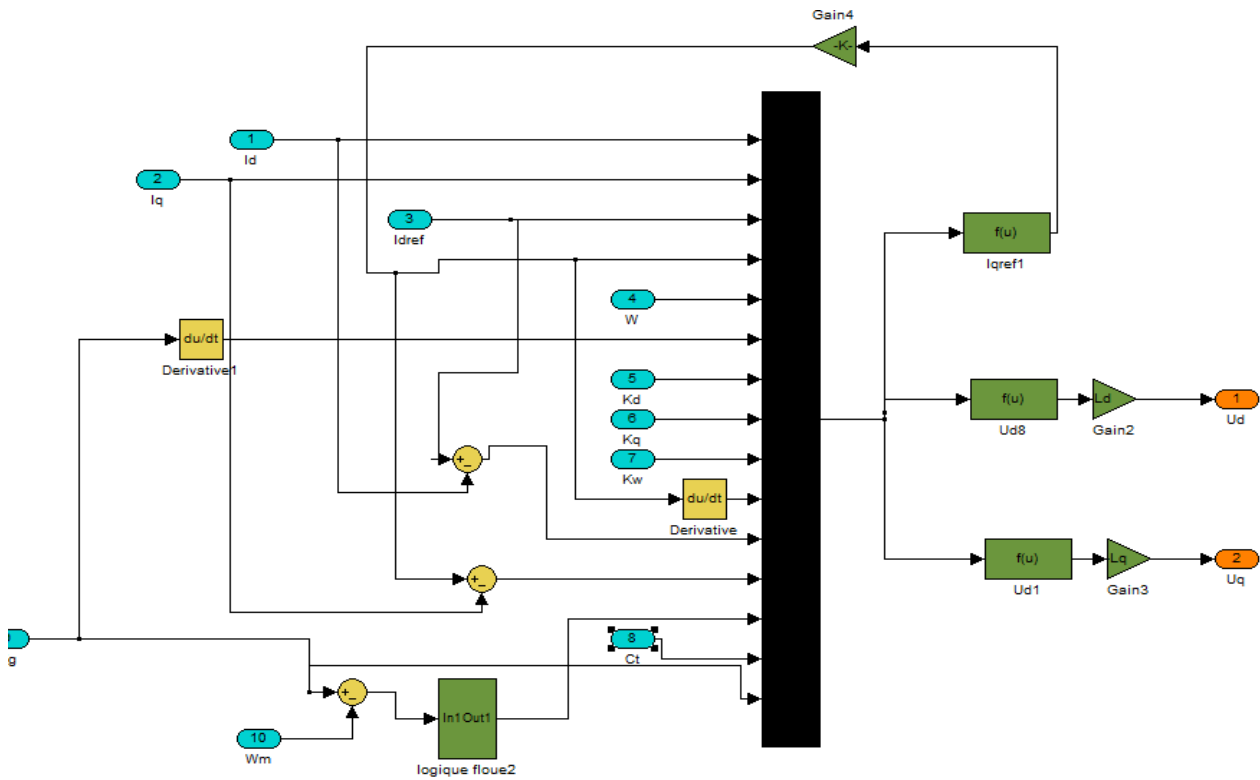


Figure IV.21 Structure interne de la commande backstepping-fuzzy.

## IV.3.7 Résultats de simulation et interprétation

### IV.3.7.1 Test Sans application de contraintes

Dans ce cas-là, aucune contrainte n'est appliquée et les conditions idéales de fonctionnement sont réunies.

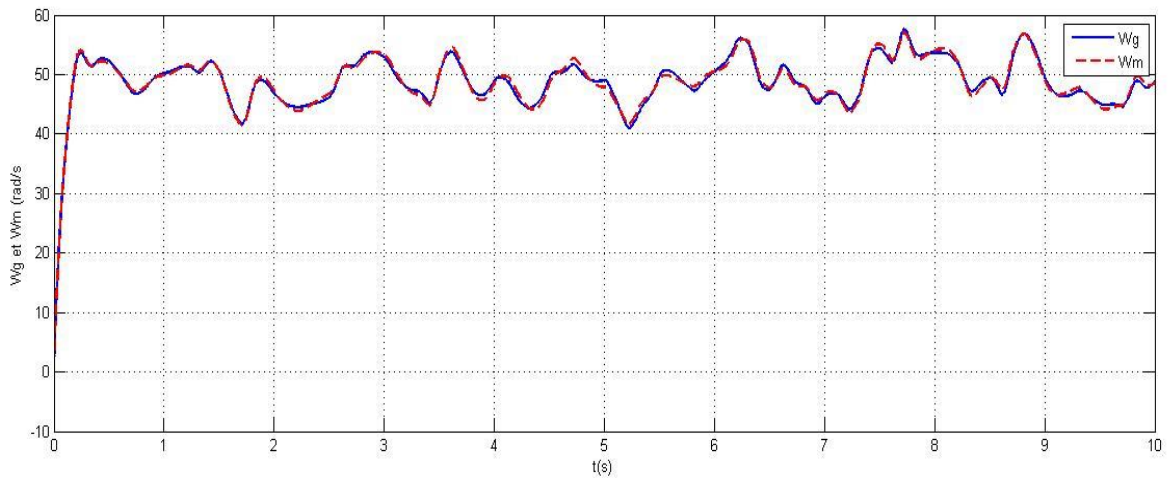
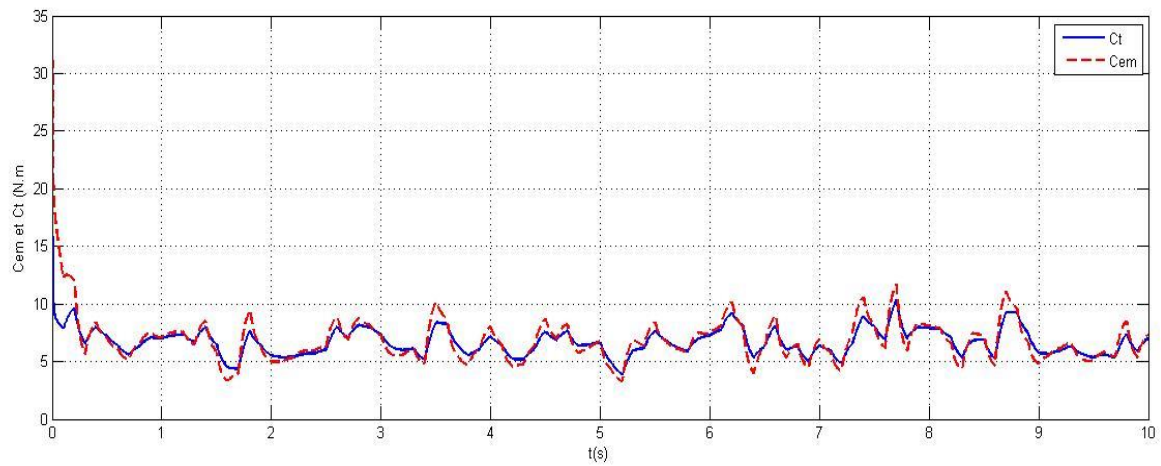
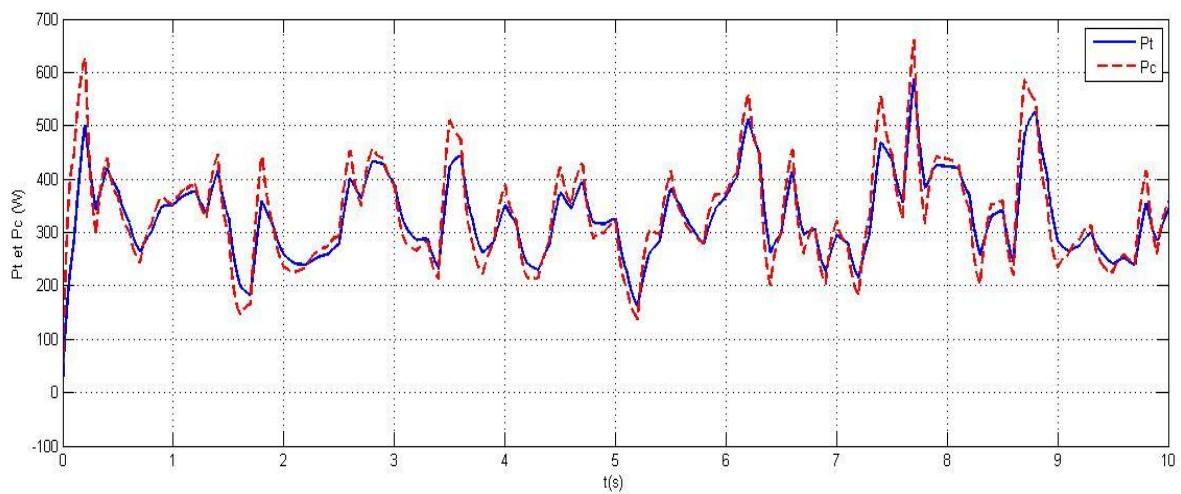


Figure IV.22 Vitesse de rotation  $W$  (rad/s).

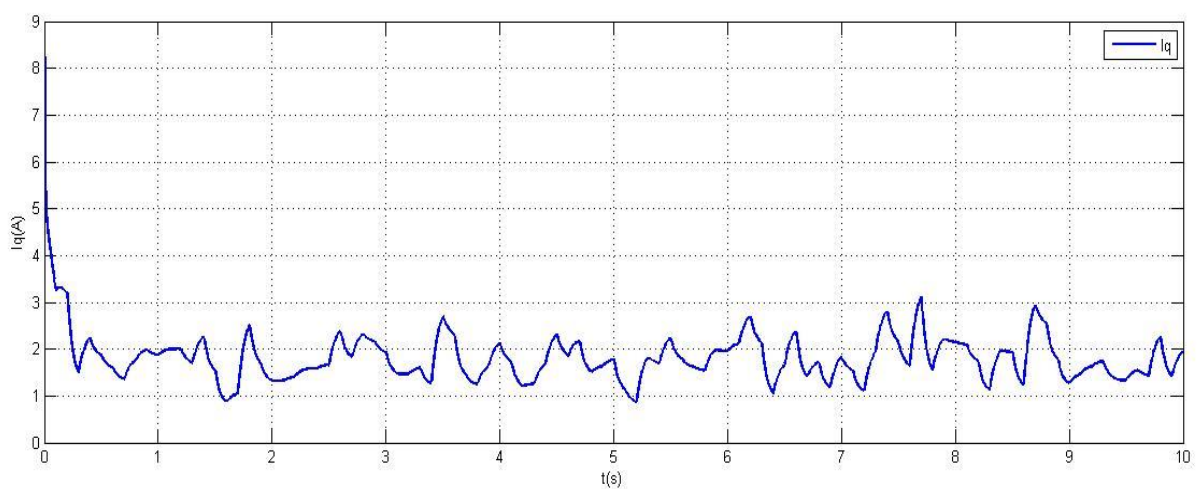
# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP



*Figure IV.23 Couples  $C_t$  et  $C_{em}$  (N.m).*



*Figure IV.24 Puissances générées (Watt).*



*Figure IV.25 Courant  $I_q$ (A).*

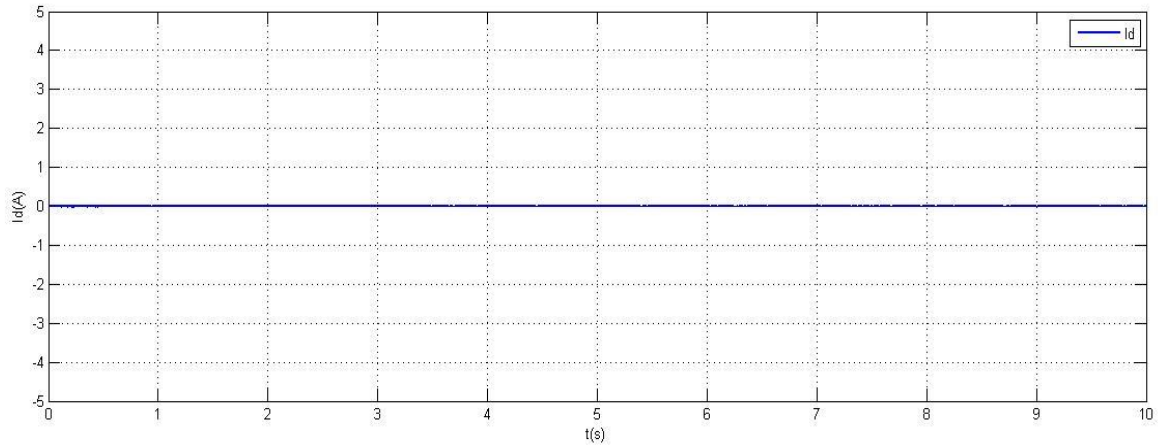


Figure IV.26 Courant  $I_d$ (A).

## IV.3.7.2 Test Avec application de contraintes

Lors de ce second test visant à tester la robustesse de la machine, des contraintes similaires à celles utilisées dans le chapitre précédent seront appliquées, à savoir :

- A  $t=2\text{sec}$  : Augmentation des résistances de 25% et des inductances de 7%.
- A  $t=4\text{sec}$  : Augmentation des résistances de 50% et des inductances de 14%.

Les résultats obtenus par cette simulation sont présentés par les figures ci-après, suivis de leurs interprétations :

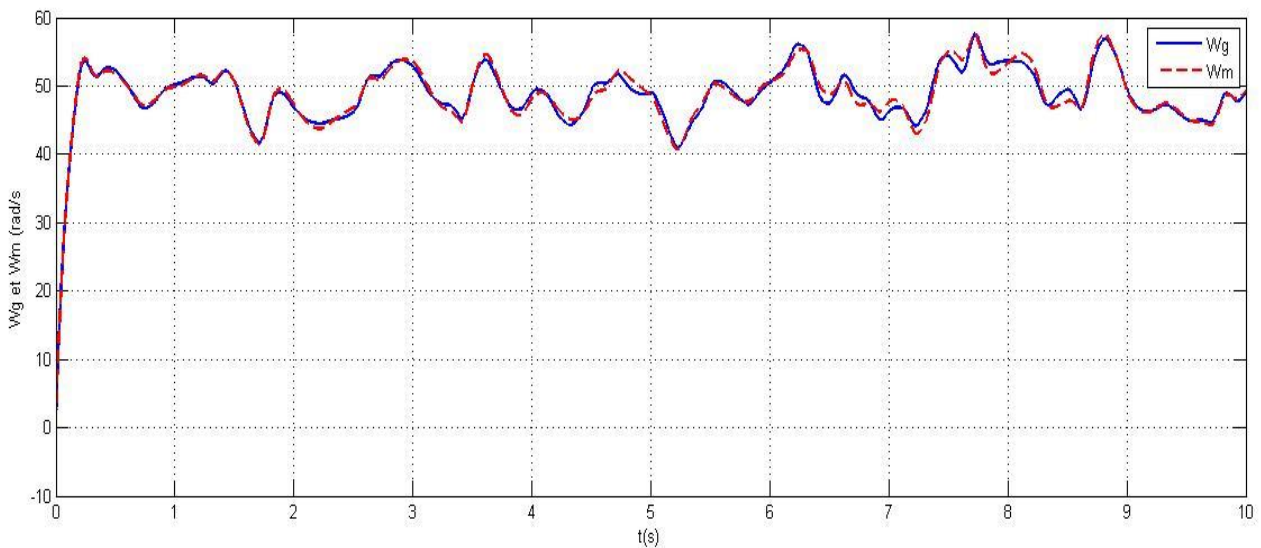
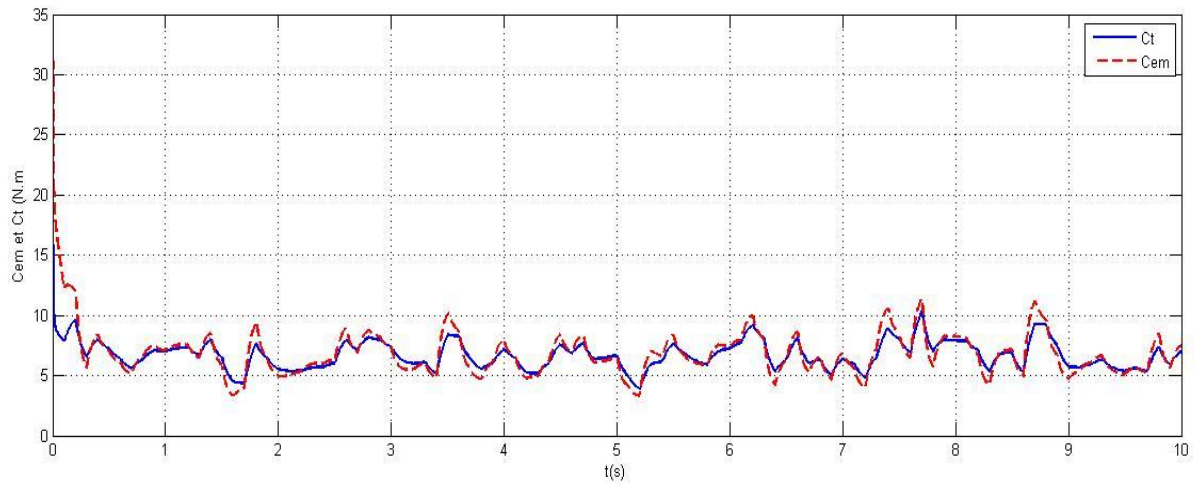
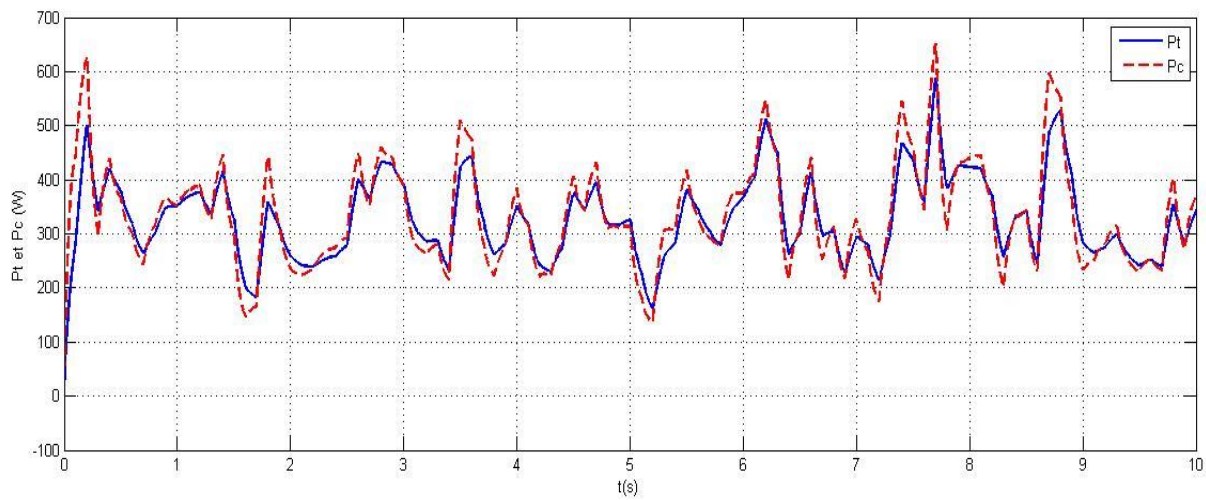


Figure IV.27 Vitesse de rotation  $W$  (rad/s) sous contraintes.

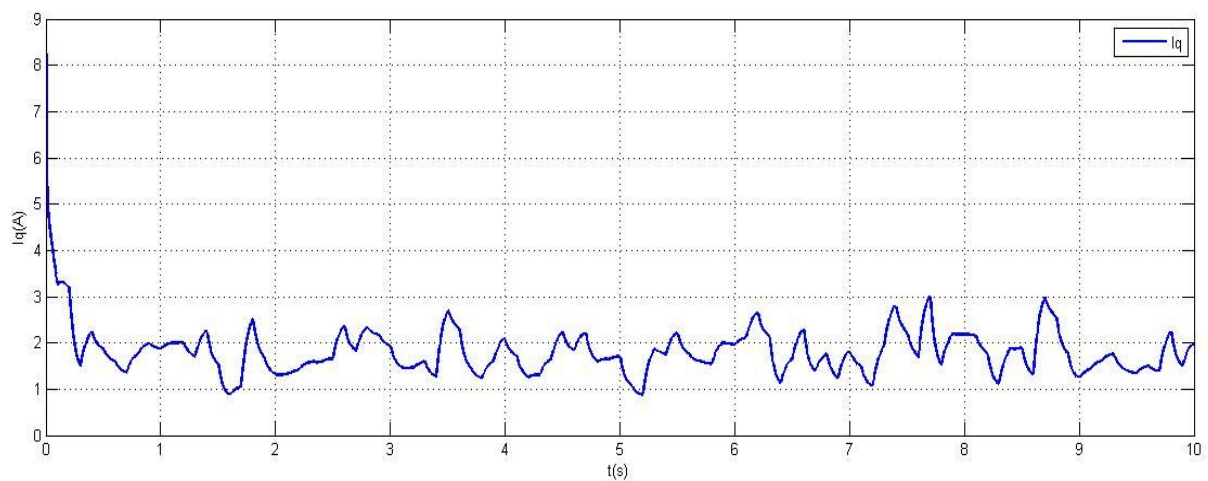
# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP



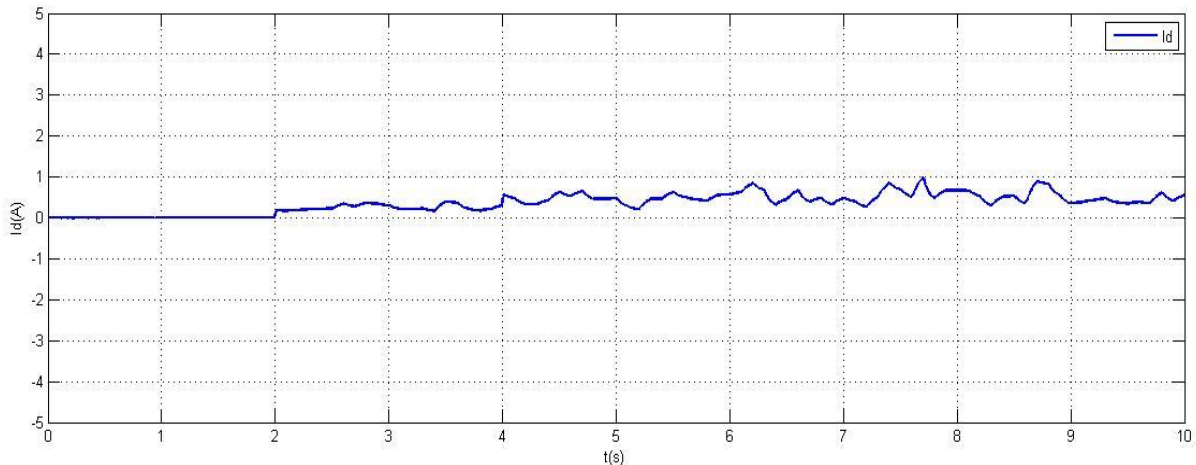
*Figure IV.28 Couples  $C_t$  et  $C_{em}$  sous contraintes.*



*Figure IV.29 Puissances générées sous contraintes.*



*Figure IV.30 Courant  $I_q$  sous contraintes.*



*Figure IV.31 Courant  $I_d$  sous contraintes.*

## ❖ Interprétation

En ce qui concerne la vitesse (Fig IV.22), on remarque de très bons résultats en absence de contrainte. Lorsque les contraintes sont appliquées (Fig IV.27) on observe des améliorations des résultats par rapport aux deux commandes prétendantes.

La courbe de la puissance (Fig IV.29) présente de très bons résultats malgré l'application des contraintes ; ce qui est également le cas pour le couple électromagnétique (Fig IV.28) et le courant  $i_q$ (Fig IV.30).

Le courant  $i_d$  (Fig. IV.31) est certes perturbé, mais bien moins que pour les cas précédents.

## IV.4 Etude comparative entre la commande vectorielle, la commande backstepping et la commande backstepping-fuzzy

Cette étude comparative a pour objet de mettre en avant les différences et l'efficacité de chacune des commandes traitées dans ce mémoire, à savoir :

- La commande vectorielle (par régulateur PI).
- La commande backstepping
- La commande floue (backstepping-fuzzy)

La structure finale de la commande backstepping-fuzzy de la GSAP est représentée dans la figure ci-après.



# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

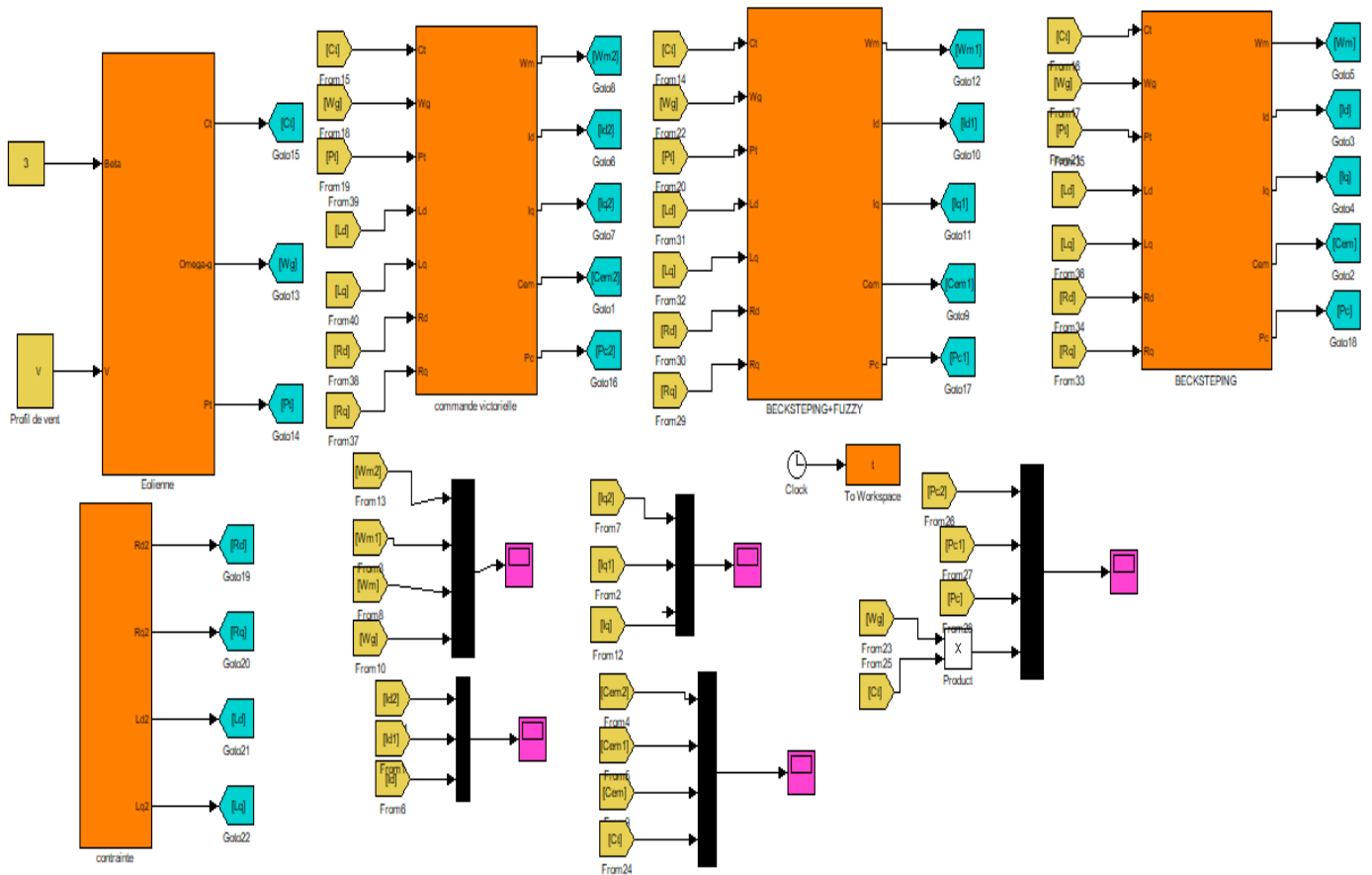


Figure IV.32 Structure finale de la commande backstepping-fuzzy de la GSAP (comparaison)

## IV.4.1 Résultats de simulation et interprétation

Comme indiqué précédemment, deux tests ont été effectués :

- **Test 01 : Sans application de contraintes.**

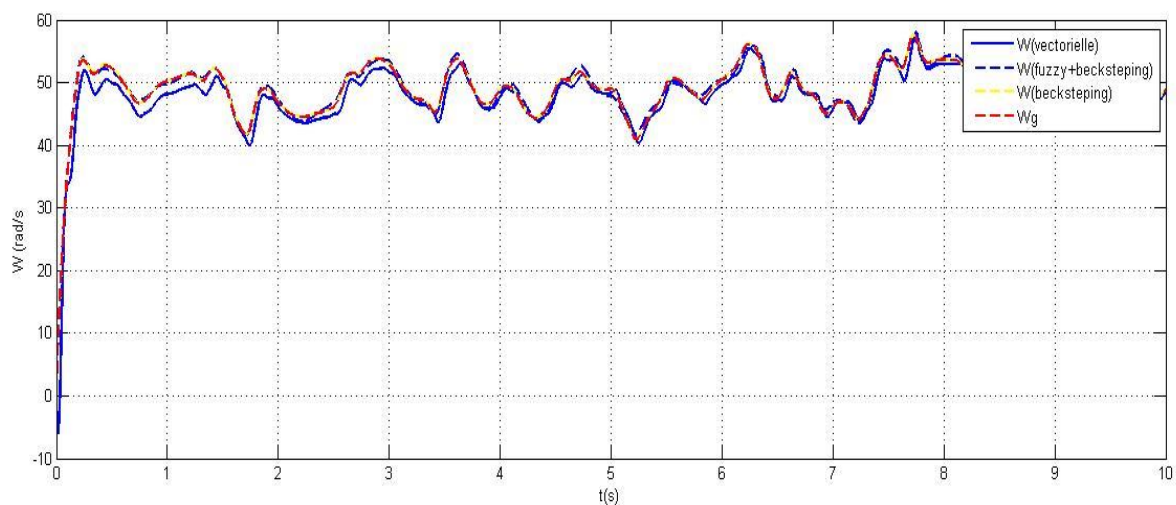


Figure IV.33 Vitesse de rotation  $W$  (rad/s).

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

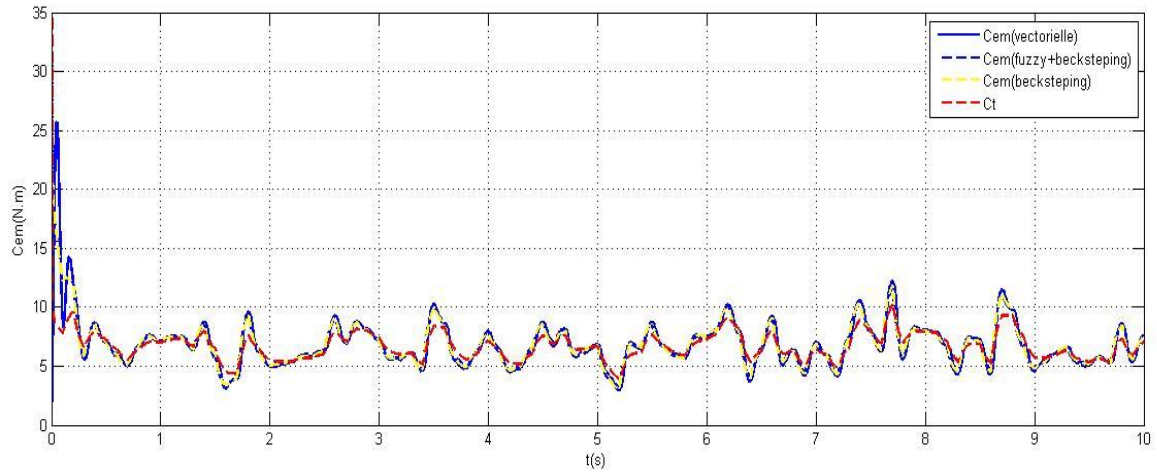


Figure IV.34 Couples  $C_t$  et  $C_m$  (N.m).

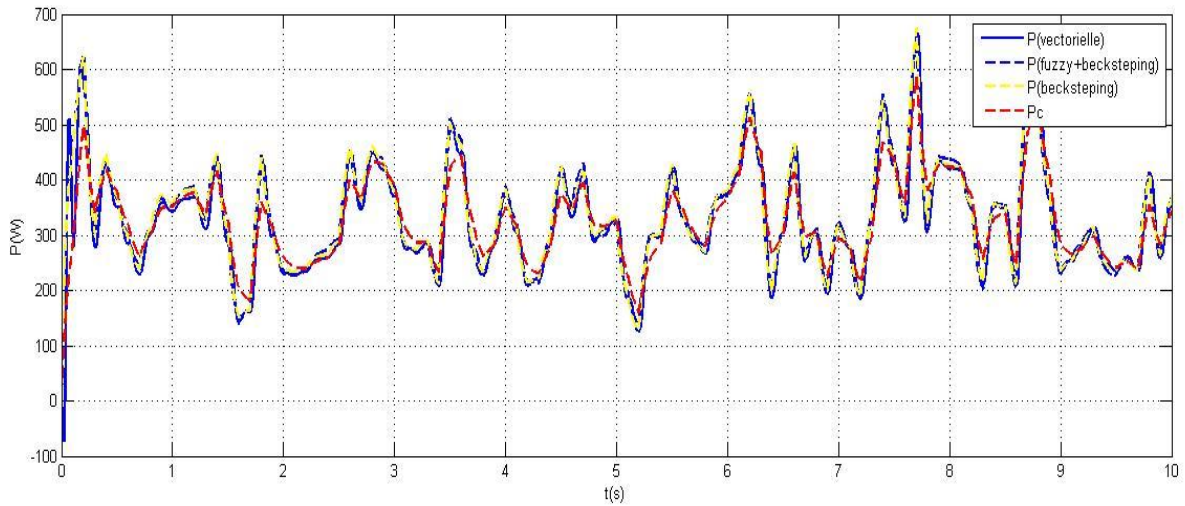


Figure IV.35 Puissances générées (Watt).

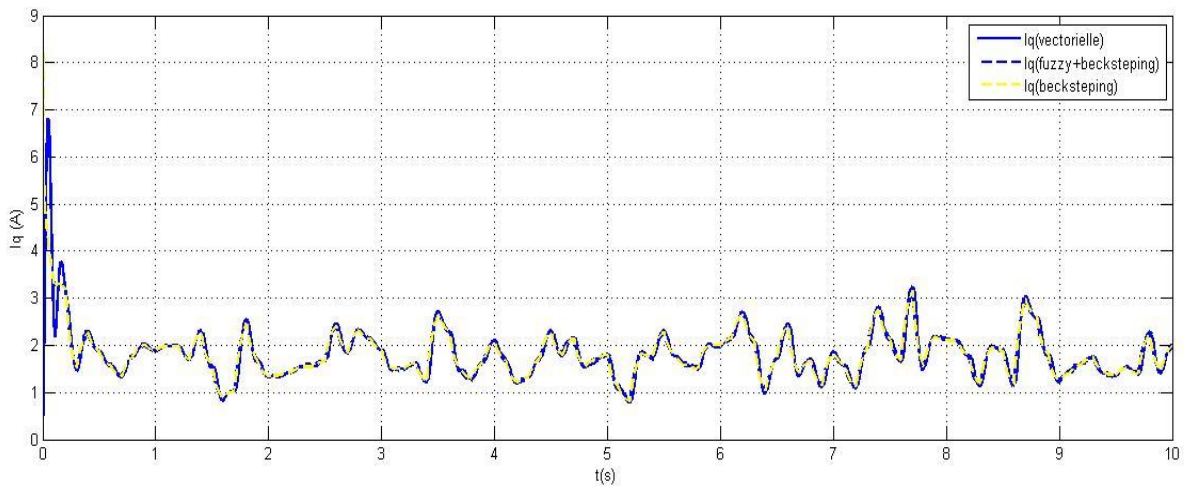


Figure IV.36 Courant  $I_q$  (A).

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

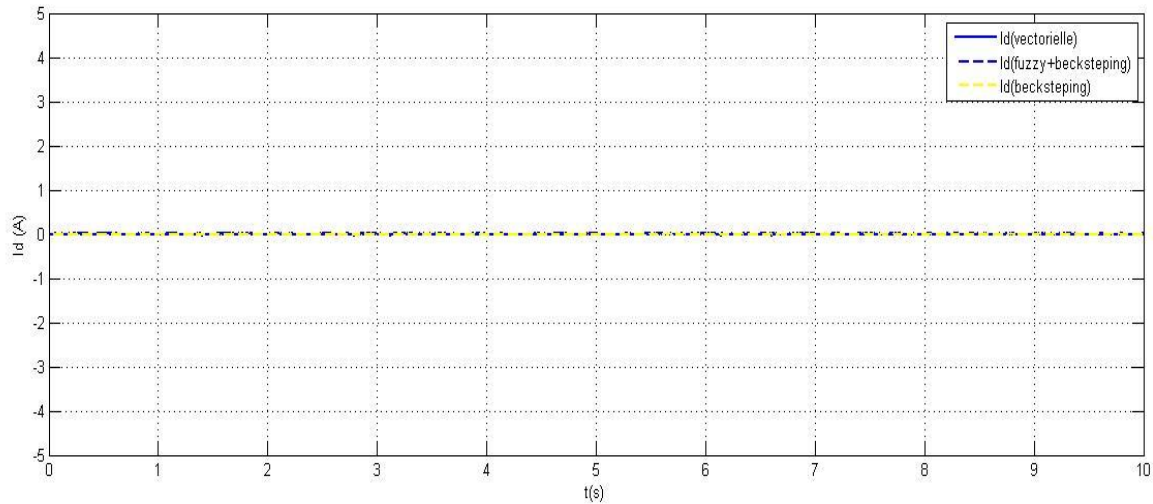


Figure IV.37 Courant  $I_d$  (A).

## ▪ Test 02 : Avec application de contraintes

Ce dernier test est le plus intéressant car il permet d'effectuer une comparaison de robustesse vis-à-vis des contraintes de toutes les commandes que nous avons étudiées.

Pour rappel, les contraintes sont appliquées à la 2ème seconde puis à la 4ème seconde :

- A  $t=2\text{sec}$  : Augmentation des résistances de 25% et des inductances de 7%.
- A  $t=4\text{sec}$  : Augmentation des résistances de 50% et des inductances de 14%.

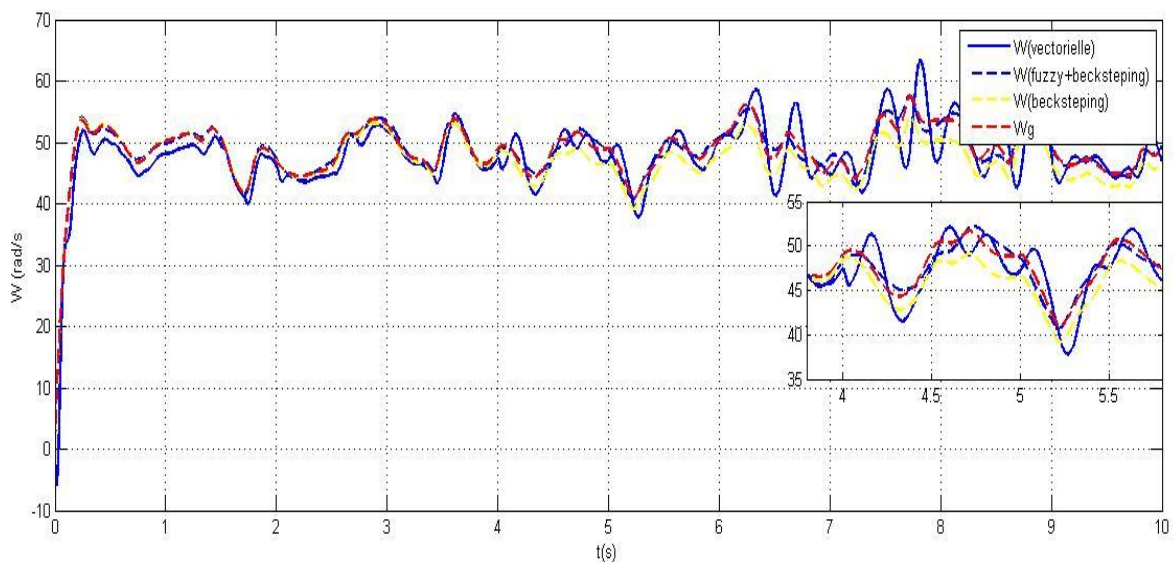


Figure IV.38 Vitesse de rotation  $W$  (rad/s) sous contraintes.

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

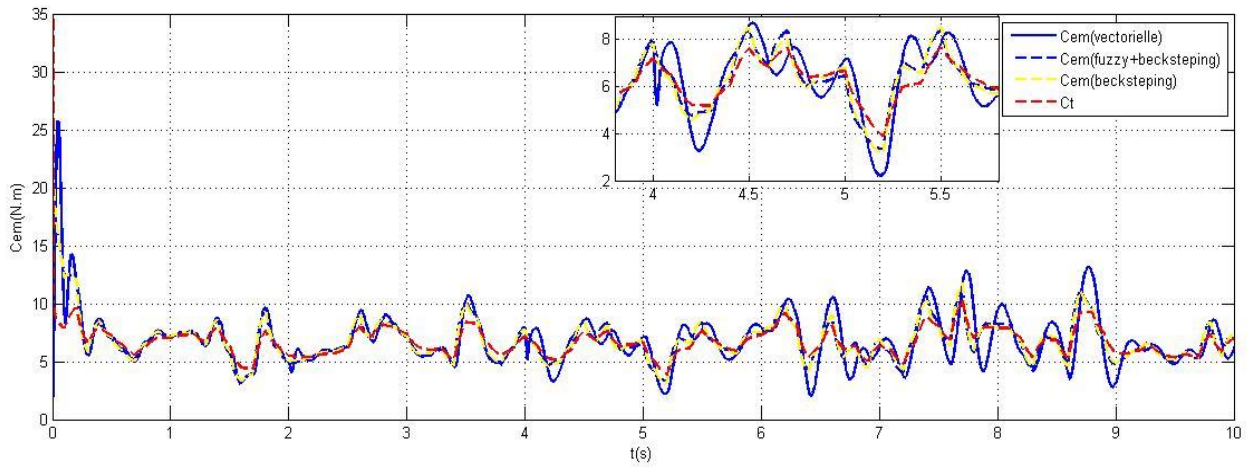


Figure IV.39 Couples  $C_t$  et  $C_m$  sous contraintes.

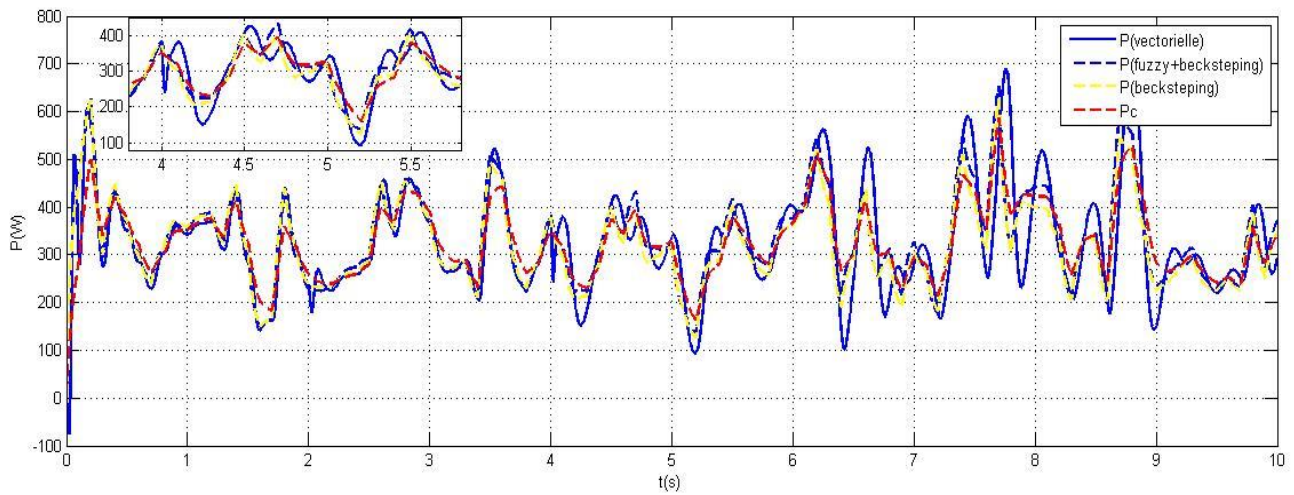


Figure IV.40 Puissances générées sous contraintes.

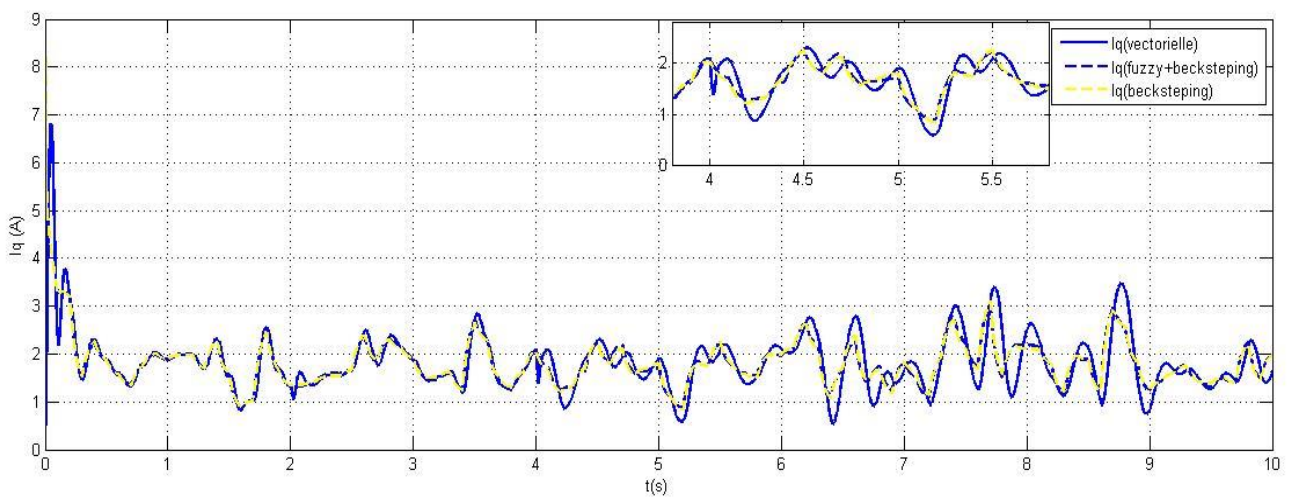


Figure IV.41 Courant  $I_q$  sous contraintes.

# Commande Backstepping-fuzzy d'une MSAP

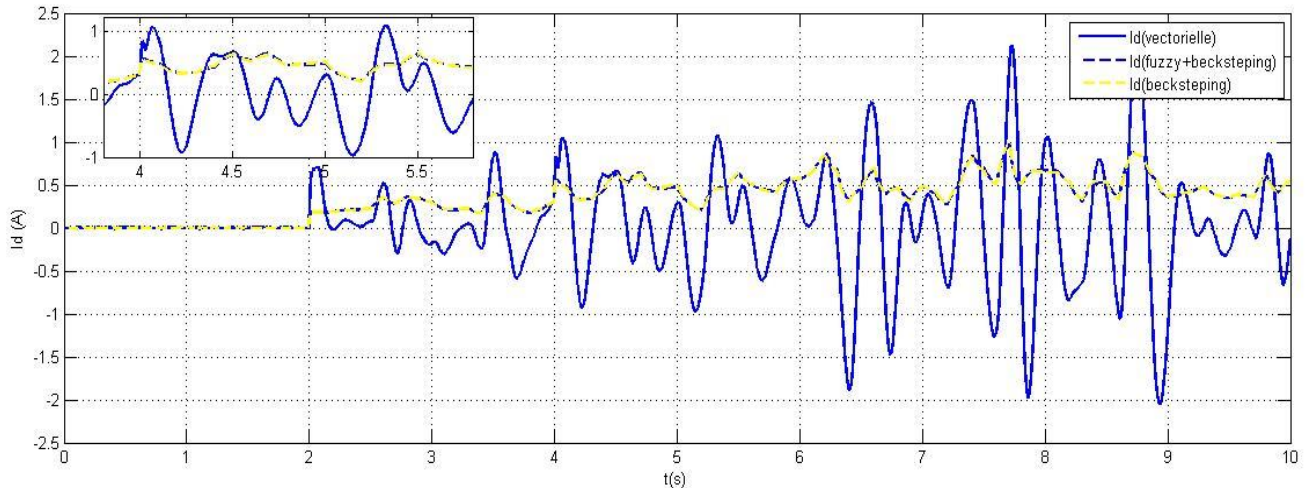


Figure IV.42 Courant  $I_d$  sous contraintes

## ❖ Interprétations

On remarque que les grandeurs issues de la commande Backstepping sont les plus performantes en absence de contraintes comparativement à la commande vectorielle et l'association Backstepping-Fuzzy.

Lorsque on applique les contraintes, d'abord à la 2ème seconde puis à la 4ème secondes, on constate que c'est la combinaison commande Backstepping-Fuzzy qui est la meilleure par rapport à la commande vectorielle et à la commande Backstepping.

## IV.5 Conclusion

Durant ce chapitre, nous avons essayé de réaliser une modélisation et une simulation similaire à celle d'un système réel subissant des contraintes au fil du temps.

Pour que ce système puisse résister au mieux aux incertitudes structurées, nous avons, dans un premier lieu, mis en œuvre une commande Backstepping qui donne de bien meilleurs résultats par rapport à ceux de la commande vectorielle.

Afin d'ajuster encore plus les résultats de simulation, nous avons ajouté un régulateur de type fuzzy qui a permis d'avoir de très bons résultats, à savoir un meilleur suivi de consigne sous contrainte ainsi qu'une meilleure souplesse en termes de régulation.

Enfin, une étude comparative entre les diverses commandes faite dans ce mémoire (commande vectorielle, backstepping, backstepping-fuzzy) à été effectuée, montrant ainsi que la combinaison backstepping-fuzzy est de loin la plus robuste.

# ***CONCLUSION GENERALE***

## Conclusion générale :

L'objectif principal de notre étude est d'améliorer les résultats de simulation d'une machine synchrone à aimants permanent dédiée à une éolienne. Nous avons d'abord eu recours à la commande vectorielle qui présente des résultats plutôt limités en termes de poursuite de consigne en présence de contrainte. Afin de remédier aux imperfections de la commande vectorielle, nous avons songé à de nouvelles techniques intelligentes de commandes notamment la commande par la méthode de backstepping ainsi que celle de la logique floue (association backstepping-fuzzy). Ces commandes intelligentes ont fait preuve d'excellents résultats notamment en termes de souplesse et de régulation.

Pour ce faire on a subdivisé ce travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre comporte un état de l'art sur les énergies renouvelables, à savoir la définition ainsi que les principes des fonctionnements de chaque énergie. Nous nous sommes ensuite focaliser sur l'énergie éolienne, notamment les différents types d'éolienne, les différentes composantes d'éoliennes. Enfin nous avons mis en avant les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

Dans le second chapitre, nous avons commencé par modéliser les différents composants de la partie mécanique de l'aérogénérateur, à savoir : la turbine, le multiplicateur de vitesse ainsi que l'arbre de la génératrice, puis nous avons établi le modèle mathématique de la GSAP dans un référentiel biphasé en se basant sur le modèle de Park, simplifiant ainsi la commande de la machine.

Le troisième chapitre, était consacré à la commande vectorielle de la machine synchrone à aimant permanent qui permet de l'assimiler à une machine à courant continu à excitation séparée. L'analyse des résultats obtenus dans ce chapitre montre cependant que le réglage de la vitesse par commande vectorielle manque de robustesse.

Dans le quatrième et dernier chapitre, nous avons mis en œuvre la commande non linéaire appelée Backstepping à laquelle nous avons ajouté par la suite un régulateur Fuzzy. Nous avons présenté l'aspect théorique de ces techniques de commande et exposé les étapes permettant leur dimensionnement, tout en assurant la stabilité globale du système non linéaire réglé. D'après l'étude comparative entre les diverses commande appliquées, il apparait que l'application de la combinaison Backstepping-fuzzy pour la commande GSAP a conduit à d'excellents résultats de simulations, ce qui montre l'efficacité de cette technique pour le suivi de la vitesse, du couple et de la puissance de référence ainsi que le rejet de perturbation.

Enfin, on peut envisager à la lumière de ce travail :

- ✚ Utilisation d'autres techniques de commande robuste telle que la commande par réseaux de neurones artificiels (RNA).
- ✚ L'étude d'autres méthodes non linéaires pour la commande d'une GSAP.
- ✚ L'association d'un système de stockage d'énergie.



# *Annexes*

**Paramètres de la machine :**

$R_d$	0.5 ( $\Omega$ )
$R_q$	0.5 ( $\Omega$ )
$L_d$	0.016 (H)
$L_q$	0.016 (H)
f	0.001 (N.s/rad)
P	17
$\varphi_f$	0.148(Wb)
R	1.05 (m)
S	$\Pi.R^2(m^2)$
J	0.021(Kg. $m^2$ )
G	1
$\rho$	1.2255 (Kg. $m^3$ )

**Paramètres des régulateurs :**

Les Courants ( $i_d, i_q$ )	$K_p = 0.5$
	$K_i = 15.625$
La vitesse	$K_p = 2.4$
	$K_i = 0.72655$
$K_d$	400
$K_q$	1500
$K_\Omega$	4
$K_e$	0.0001
$K_{de}$	0.00000000000001
$K_c$	198330

# *La Bibliographie*

- [1] : R.Amoura, «Modélisation et Commande d'un Aérogénérateur Synchrone à Aimants Permanents à Attaque Directe», Mémoire de Master Académique, Spécialité : MACHINE ELECTRIQUE, Université Mouloud MAMMERI de Tizi Ouzou.2013.
- [2] : M.Mayouf, «CONTRIBUTION A LA MODELISAYION DE L'AIROGENERATEUR SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS», Mémoire de magister en électrotechnique-option : énergies renouvelables, Université de Batna.2008.
- [3] : H.Mahdaoui, «Simulation et commande vectorielle MLI d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents GSAP», MEMOIRE DE MASTER EN ELECTROTECHNIQUE OPTIONM: COMMANDE DES MACHINES ELECTRIQUES, UNIVERSITE AHMED DRAIA ADRAR.2017.
- [4] : L.Allali, «Commande vectorielle de la génératrice synchrone à aimants permanents», Mémoire de Master Spécialité : GENIE ELECTRIQUE, UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI D'OUM EL BOUAGHI, 2016.
- [5] : M.Sadi, Z.Hamlat, «L'impact Des Energies Renouvelables Sur Le Réseau Electrique Ouest Algérien 220 KV», Mémoire de Master Spécialité : SYSTEME ENERGETIQUE, Université Tahar Moulay de Saïda, 2014.
- [6] :M.Traore,«GESTION DU SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE D'UNE ALIMENTATION PRIVÉE CONNECTE AU RESEAU», Mémoire de Master OPTION : Réseaux électriques, Université BADJI MOKHTAR-ANNABA, 2017.
- [7] : Observ'ER avec le C des ces partenaires « la production d'électricité d'origines renouvelable dans le monde » Quatrième inventaire, Edition 2012.
- [8] : M. Loucif: Synthèse de lois de commande non-linéaires pour le contrôle d'une machine asynchrone à double alimentation dédiée à un système aérogénérateur. Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat, faculté de technologie- Université Abou Bekrbelkid Tlemcen, 2016.
- [9] : Nouari Aissa, Akkouche Bellal, «COMMANDE D'UNE MSAP DÉDIÉE À UNE ÉOLIENNE PAR LA MÉTHODE DE BACKSTEPPING», Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj-Bouira, 2018.
- [10] : Y.Bouanani, N.Ourdani, «Contribution à la commande d'une génératrice asynchrone à double alimentation», Mémoire de Master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia, 2015.

- [11] : Dione Fatou, «Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents», Mémoire de Master-OPTION : ELECTROTECHNOQUE INDUSTRIELLE, Université d'Annaba, 2018.
- [12] N.Senhadji, A.Chalabi, COMMANDE DU MOTEUR SYNCHRONE A AIMANTS PERMANENTS PAR BACKSTEPPING, Mémoire de Master en Génie Electrotechnique et Electronique, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen. 2015.
- [13] M.Oubidar, S.Bendaoud. Machine Synchrone/Asynchrone, Projet de fin d'étude en ingénierie, Université du québec en Abitibi-Témiscamingue, 2010.
- [14] M.S.Mahgoun. Application De La Commande H $\infty$  Aux Systèmes Linéaires Perturbés, Mémoire de Magister, Université ferhat abbas-Setif (UFAS), 2012.
- [15] H.Aid, W.Aina. Synthèse De Lois de Commande Non-Linéaires Pour Un Entraînement Electrique A Vitesse Variable Basé Sur Un Moteur Synchrone A Aimants Permanents, Mémoire de Master, Université abou bekr belkaid, Tlemcen, 2013.
- [16] M. Ounnadi, « Elaboration d'un model en régime dynamique d'une machine à aimant permanent», mémoire de Magister en électrotechnique université de Tizi-Ouzou, 2011.
- [17] M. E. Bendib, «Conception d'une machine à aimant permanent a flux axial » Mémoire de Magister en électrotechnique, Université de Batna 2011.
- [18] M.D.Bidart. Commande Coopérative Des Systèmes Mono convertisseurs Multi machines Synchrones, Thèse de Doctorat, L'Institut national polytechnique de Toulouse (INP Toulouse), 2011.
- [19] M.BardaBendaha, «Identification des paramètres d'une machine synchrone à aimant permanent en vue d'une intégration dans des simulateurs en temps réel », Mémoire de Magistère en Electronique, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran 04/02/2015.
- [20] S.Hamecha, «Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent», Mémoire de Magister en électrotechnique, université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou 2013.
- [21] F. Meibody-Tabar, « Machines synchrones à aimants permanents alimentées par onduleurs de tension ; modélisation, commande et segmentation de puissance », Thèse Doctorat .Habilitation à Diriger des Recherches, Nancy, janvier 2000.
- [22] M.Koteich. Commande Vectorielle Sensorless Des Moteurs Brushless De Mini-Drones,

[23][https://lh3.googleusercontent.com/proxy/DrfJHzbEnXo9CtzW-Zd5D\\_i6Quh-wEWOEzhTnTaoUhmJ\\_YtRiMA9Yd67djAbHDgQ0NJY-uPE-077JCUxhzv0NRdsweZ34C8W5LLvUz4DAPGC0ktLo\\_pjNa9cCmc1pJN2oFJdPyX1BwTesQ](https://lh3.googleusercontent.com/proxy/DrfJHzbEnXo9CtzW-Zd5D_i6Quh-wEWOEzhTnTaoUhmJ_YtRiMA9Yd67djAbHDgQ0NJY-uPE-077JCUxhzv0NRdsweZ34C8W5LLvUz4DAPGC0ktLo_pjNa9cCmc1pJN2oFJdPyX1BwTesQ). Consulté le 12 octobre 2020.

[24]<https://angelique-delahaye.eu/wp-content/uploads/2597/prix-panneau-solaire-photovoltaique-monocristallin-5e488c64ced2a.jpg>. Consulté le 18 octobre 2020.

[25][https://lepetitjournal.com/sites/default/files/inline-images/custom\\_5b1e753c402d3.jpg](https://lepetitjournal.com/sites/default/files/inline-images/custom_5b1e753c402d3.jpg). Consulté le 29 octobre 2020.

[26][https://france3regions.francetvinfo.fr/image/er3T8ezAUX8BJ7pUwLExDTTnvlc/600x526/regions/2020/06/09/5edf2f9bdcd71\\_schema-600x526-3111805.png](https://france3regions.francetvinfo.fr/image/er3T8ezAUX8BJ7pUwLExDTTnvlc/600x526/regions/2020/06/09/5edf2f9bdcd71_schema-600x526-3111805.png). Consulté le 07 décembre 2020.

[27][https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/image\\_article/Parc-eolien-Logan-Colorado.jpg](https://www.connaissancedesenergies.org/sites/default/files/image_article/Parc-eolien-Logan-Colorado.jpg). Consulté le 15 décembre 2020.

[28]<https://i.pinimg.com/originals/d4/20/62/d42062a455225a42caeadb97541f1181.jpg>. Consulté le 22 décembre 2020.

[29] H.Abdellauoi , « Etude expérimentale de la position rotorique d'un moteur synchrone à aimant permanent par variable électrique », Mémoire de Magister en électrotechnique université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou.2011.

[30] Z.Latreche, S.Boufenar, «Dimensionnement et Modélisation de la machine synchrone à aimant permanent», Mémoire de Master en Électrotechnique, Option : Machines électriques. Université Mohamed Seddik Ben Yahia, jjel. 2019.

[31] J. A. Farooq, “ Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de la localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à aimants permanents”, Thèse de doctorat, Université de Technologie de Belfort-Montbellard, 2008.

[32] Jean-Paul Louis ; ‘Modélisation des Machines Electriques en vue de leur commande’. Presses de LAVOISIER, France, 2004.

[33] Jean-Paul Louis ; ‘Modélisation des Machines Electriques en vue de leur commande’. Presses de LAVOISIER, France, 2004.

[34] A. Abdelli, << Optimisation Multicritères d'une chaine éolienne passive >>, Thèse de Doctorat en Electrotechniques, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.

[35] [https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/TP\\_Tip\\_speed\\_ratio\\_diff\\_eoliennes.gif](https://energieplus-lesite.be/wp-content/uploads/2019/03/TP_Tip_speed_ratio_diff_eoliennes.gif). Consulté le 12 octobre 2020.

[36] L.Leclercq, « Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », thèse de doctorat de l'université de Lille, n° d'ordre : 3563, UFRR IEEEA Décembre 2004.

[37] S. El Aimani « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Cohabité avec L'université des sciences et technologies de Lille 1 (USTL), 06 décembre 2004.

[38] S.R.Guda, « Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation ». Thèse de master de l'université de Bozeman, Montana. Juillet 2005.

[39] Mirecki A. « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance ». Thèse présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat préparée au Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique Industrielle de IENSEEIH, Unité Mixte de Recherche CNRS No 5828, 2005.

[40] N. Siebert « Développement de méthodes pour la prédiction de la production éolienne régionale », thèse de doctorat de l'école des mines de Paris, 2008, France.

[41] A.Dahbi, « Étude des performances et commande d'une machine synchrone à aimants permanents utilisée dans les éoliennes », Mémoire de Magister en Electrotechnique Option : Commande électrique. UNIVERSITE FERHAT ABBAS, SETIF UFAS (ALGERIE) Faculté de Technologie. 2012.

[42]: Shahnazari, M.; Vahedi, A. "Improved Dynamic Average Modeling of Synchronous Machine with Diode Rectified Output" Vol 4 (issue 6) pg 1248-1258 Nov-Dec 2009.

[43] : R.Benyahia Hamidi et A.Ben Besekri, « Commande d'une Eolienne basée sur les modèles Flou de Takagi-Sugeno », Mémoire de Master Académique, Spécialité : Automatique et informatique industrielle, Université Djilali Bounaama Khemis Miliana. 2019.

[44] Kherkhare Abdelkrim. "Commande floue en poursuite et stabilisation des systèmes non linéaires incertains". Université Ferhat Abbas — Setif, 2010.

[45] A.Tlemçani « Contribution à l'application des commandes adaptatives par les systèmes flous à une machine synchrone à aimants permanents alimentée par un convertisseur multicellulaire série », THESE Présentée au Laboratoire de Commande des Processus En vue

de l'obtention du titre de Docteur, Spécialité : Génie Electrique Option Automatique, Ecole Nationale Polytechnique.2007.

[46] L.Hassane, R.Kacimi «Commande intelligente neuronale d'une GSAP soumise a des incertitudes et des perturbations externes», Mémoire de Master Académique, Spécialité : électromécanique, Université Akli Mohand Oulhadj Bouira. 2020.

[47] A.BERRABAH, O.HAMZA, «Commande par logique floue d'une machine synchrone à aimant permanent», Mémoire de Master Académique, DOMAINE : GENIE ELECTRIQUE, EFILIERE : ELECTROTECHNIQUE, OPTION : COMMANDE ELECTRIQUE UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA. 2018.

[48] A.Ferroudj, «Commande Non-Linéaire de la MSAP Sans Capteur de Vitesse. Apport des Méthodes de L'intelligence Artificielle», Mémoire de Master Académique, En Electrotechnique, Option: Electronique de Puissance, Université UNIVERSITE DE BATNA. 2011.

[49] I.Laghouag, «Commande par logique floue type -2- appliquée à la machine asynchrone», Mémoire de Master Académique, FILIERE : ELECTRONIQUE, OPTION : Contrôle Industriel, Université Mohamed Boudiaf - M'SILA.2016.

[50] A. Khemis, «Application du logique flou type-2 intervalle à la commande adaptative de la machine asynchrone », Mémoire de Magister, Université Mohamed Khider -Biskra, 10/04/2011.