

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la Recherche Scientifique

Université Abderrahmane Mira

Faculté de la Technologie



Département d'Automatique, Télécommunication et d'Electronique

Projet de Fin d'Etudes

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Automatique

Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

Thème

Commande par mode glissant adaptative appliquée sur un système éolien

Préparé par :

REBIAI Salah-Eddine

Dirigé par :

Mr H. LEHOUCHE

Examiné par :

Mr H.BELKAID

Mr H.HADDAR

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

Je remercie avant tout Dieu, le tout puissant, pour m'avoir donné, le courage, la patience, la volonté et la force nécessaire, pour affronter toutes les difficultés et les obstacles qui se sont hissés au travers de mon chemin, tout au long de ce travail.

Je tiens à exprimer mes remerciements les plus sincères et ma vive reconnaissance et gratitude à mon promoteur Mr LEHOUCHE Hocine pour son aide, sa patience, sa disponibilité et la confiance qu'il m'a toujours témoigné.

Mes remerciements vont aussi à Messieurs les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce modeste travail.

Je remercie également tous les professeurs de la spécialité Automatique et Informatique Industrielle, ainsi que les étudiants de la promotion 2021 pour cette agréable année que je viens de passer avec eux.

Merci à toute personne ayant contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce projet.

Dédicaces

Je dédie ce travail à mes chers parents, à mes frères et à ma sœur.

Salah-Eddine

Sommaire

Liste des Figures.....	VI
Liste des Tableaux.....	VII
Nomenclature	VIII
Introduction générale.....	1
Chapitre 1 : Principe de fonctionnement et modélisation d'une éolienne.....	3
1.1 Introduction	3
1.2 Définition de l'éolienne	3
1.3 Les différents types de systèmes éoliens	3
1.3.1 Selon la taille.....	3
1.3.2 Selon le principe de fonctionnement.....	4
1.4 Principales composantes d'une éolienne :	5
1.4.1 Fondation.....	6
1.4.2 Mât	6
1.4.3 Rotor.....	6
1.4.4 La cabine de dispersion.....	7
1.4.5 La nacelle	7
1.5 Principe de fonctionnement de l'éolien :	8
1.6 Aérodynamique	9
1.6.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	9
1.6.2 Puissance aérodynamique	10
1.6.3 Coefficient de puissance aérodynamique.....	11
1.6.4 Couple aérodynamique.....	13
1.7 Dispositif d'entraînement	13
1.8 Conclusion.....	17

Chapitre 2 : Commande par mode glissant adaptative du système éolien	18
2.1 Introduction	18
2.2 Stratégies de commande de la turbine éolienne.....	18
2.2.1 Caractéristique de la puissance d'éolienne de grande puissance	18
2.2.2 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (M.P.P.T).....	20
2.2.3 Configuration de la commande	21
2.3 Commande par mode de glissement.....	22
2.3.1 Principe de la commande par mode glissant.	22
2.3.2 Synthèse de la loi de commande par mode glissant.....	23
2.3.3 Phénomène de broutement (chattering).....	25
2.4 Commande par mode glissant adaptative	26
2.4.1 Principe de la commande	26
2.4.2 Commande adaptative basé sur la théorie de Lyapunov	26
2.4.3 Commande par mode glissant adaptatif appliqué à l'éolienne.....	27
2.5 Résultats de simulation.....	30
2.5.1 Profil du vent utilisé	30
2.5.2 Présence des incertitudes paramétriques et de perturbation.....	31
2.5.3 Le rendement.....	31
2.5.4 Résultats et discussion.....	32
2.6 Conclusion.....	35
Chapitre 3 : Commande robuste par mode glissant avec gain adaptatif du système éolien.....	37
3.1 Introduction	37
3.2 Formulation du problème	37
3.3 L'algorithme d'adaptation	39
3.4 Fonctionnement de l'algorithme d'adaptation.....	39
3.5 Résultats de simulation.....	40
3.5.1 Présence des incertitudes paramétriques et de perturbation.....	40

3.5.2 Résultats et discussion.....	40
3.6 Conclusion.....	44
Conclusion Générale	45
Annexe A : Paramètres de l'éolienne CART	47

Liste des Figures

Figure 1. 1 éolienne à axe horizontal et à axe vertical	4
Figure 1. 2 Eléments constituant une éolienne	6
Figure 1. 3 Éléments constituant la nacelle	7
Figure 1. 4 Conversion de l'énergie éolienne.....	9
Figure 1. 5 Principe d'extraction de l'énergie cinétique du vent	10
Figure 1. 6 Vitesse spécifique du rotor.....	11
Figure 1. 7 Coefficient de puissance $C_p(\lambda,\beta)$	12
Figure 1. 8 Schéma du dispositif d'entraînement à deux masses.....	14
Figure 1. 9 Modèle de l'arbre lent (première masse).....	16
Figure 1. 10 modèle de l'arbre rapide (deuxième masse)	17
Figure 2. 1 Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance...	19
Figure 2. 2 Coefficient de puissance	20
Figure 2. 3 Niveaux de commande d'une éolienne à vitesse variable et calage variable.....	21
Figure 2. 4 Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase	23
Figure 2. 5 Phénomène de chattering	25
Figure 2. 6 Schéma de principe de la commande adaptative.	26
Figure 2. 7 Profil du vent utilisé.....	31
Figure 2. 8 Vitesse de rotation de la turbine ω_t et la vitesse de référence ω_{t_ref} (rad/sec).....	32
Figure 2. 9 Vitesse de rotation de la génératrice ω_g	33
Figure 2. 10 Signal de commande (Couple électromagnétique)	33
Figure 2. 11 Puissance électrique P_{elec} et la puissance aérodynamique P_a (watts)	34
Figure 2. 12 Rendement aérodynamique et rendement électrique	34
Figure 3. 1 Vitesse de rotation de la turbine ω_t et la vitesse de référence ω_{t_ref} (rad/sec)	41
Figure 3. 2 Vitesse de rotation de la génératrice ω_g	41
Figure 3. 3 Signal de commande (Couple électromagnétique)	42
Figure 3. 4 Puissance électrique P_{elec} et la puissance aérodynamique P_a (watts).....	42
Figure 3. 5 Rendement aérodynamique et rendement électrique	43

Liste des Tableaux

Tableau 1-1 Classification des éoliennes	4
Tableau A-1 Caractéristiques de l'éolienne CART	47
Tableau A-2 Paramètres du modèle a deux masses	48
Tableau A-3 Coefficients de puissance de l'éolienne CART	48

Nomenclature

J_r	Inertie des masses du côté du rotor
J_g	Inertie des masses du côté de la génératrice
B_{ls}	Coefficient de torsion sur l'arbre lent
C_p	Coefficient de puissance
C_q	Coefficient de couple
K_r	Coefficient de frottements externes du rotor
K_g	Coefficient de frottements externes de la génératrice
K_{ls}	Coefficient de frottements sur l'arbre lent
T_a	Couple aérodynamique
T_{ls}	Couple de l'arbre lent
T_{hs}	Couple de l'arbre rapide
T_{em}	Couple électromagnétique de la génératrice
R	Rayon du rotor
S	Aire de la surface balayée par le rotor
ρ	Masse volumétrique de l'air
v	Vitesse du vent
ω_t	Vitesse du rotor
ω_{t_opt}	Vitesse du rotor optimale
ω_{t_ref}	Vitesse du rotor référence
ω_{ls}	Vitesse de l'arbre lent
ω_{hs}	Vitesse de la génératrice
n_g	Rapport de transmission du multiplicateur
λ	Vitesse spécifique
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimale
β	Angle de calage des pales
P_a	Puissance aérodynamique
P_{a_opt}	Puissance aérodynamique optimale
$\eta_{aéro}$	Rendement aérodynamique
$\eta_{élec}$	Rendement électrique
$Std(x)$	Écart-type de la grandeur x
\underline{x}	Vecteur x
\hat{x}	Estimée de x
\tilde{x}	Erreur d'estimation de x

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

L'énergie électrique, ces dernières décennies est devenue l'un des facteurs primordiaux dans la vie quotidienne de l'être humain, et ainsi la consommation mondiale ne cesse d'augmenter par la multiplicité des domaines d'activités et des besoins journaliers faisant appel à l'électricité. Une grande partie de cette énergie provient des énergies fossiles, causant ainsi des problèmes environnementaux. Cependant, la protection de l'environnement, et la raréfaction des énergies fossiles pousse le monde à se tourner massivement vers de nouvelles formes d'énergie dites "renouvelables". Beaucoup plus accessibles et très adaptées à la production décentralisée, les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne a été identifiée comme une des plus prometteuses des énergies renouvelables pour atteindre les objectifs de réduction des émissions de gaz à effet de serre.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Plusieurs solutions sont envisageables, comme l'utilisation de lois de commande avancées, qui permettent d'améliorer sensiblement les performances d'une éolienne à vitesse variable.

Le fonctionnement de l'éolienne se divise en quatre zones essentielles, suivant la vitesse du vent agissant sur le système, à l'intérieure desquelles les objectifs de commande sont différents. En effet, la zone I est définie à des vitesses du vent très petites et alors insuffisantes pour faire fonctionner l'aérogénérateur, dans ce cas l'éolienne est mise hors service. La zone II correspond à des vitesses de vent moyennes où la vitesse de rotation de l'éolienne est variable. La zone III est liée à des vitesses plus importantes où l'éolienne tourne à la vitesse nominale. En fin la zone IV liée aux vitesses de vent très grandes où la puissance captée par la turbine est limitée pour des raisons de sécurité du système.

Dans le cadre de ce travail, on se limitera à l'étude et la synthèse d'une commande par mode glissant adaptative de l'aérogénérateur dans la zone de fonctionnement II, où l'objectif est d'optimiser le rendement énergétique du système et donc de recueillir le maximum de puissance

éolienne. Ainsi cette commande doit être robuste en présence de bruits de mesure, des incertitudes sur les paramètres physiques, et des perturbations provenant du milieu extérieur, Pour ce faire, le mémoire est organisé en trois chapitres.

Le premier chapitre est divisé en deux parties, la première partie est consacrée à une description générale des éoliennes, et ses différents types, pour se restreindre par la suite à l'étude d'une éolienne à axe horizontale. La deuxième partie de ce chapitre porte sur la modélisation d'une éolienne à vitesse variable. Après avoir brièvement décrit le mécanisme de fonctionnement de celle-ci, on y présente le principe d'extraction de l'énergie du vent. Ensuite la modélisation du comportement aérodynamique et mécanique est ensuite explicitée, pour aboutir à un modèle global non linéaire à deux masses.

Le deuxième chapitre est consacré à la conception d'une commande par mode glissant adaptatif basée sur la théorie de Lyapunov pour l'éolienne, afin d'optimiser ses performances et son rendement par rapport à l'énergie cinétique du vent captée par la turbine, tout en respectant ses limites physiques

Dans le troisième chapitre nous allons élaborer une commande par mode glissant à gain adaptatif basée sur les travaux de [1] et de [2] permettant d'assurer une adaptation dynamique du gain de commande aussi faible que possible tout en étant suffisante pour contrecarrer les incertitudes et les perturbations.

Chapitre I

PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT ET MODELISATION D'UNE EOLIENNE

Chapitre 1 : Principe de fonctionnement et modélisation d'une éolienne

1.1 Introduction

Ce chapitre porte sur la définition de l'éolienne et sa conception, en présentant le principe de son fonctionnement, ainsi que ses constituants technologiques en se focalisant sur les éoliennes à axe horizontal et à vitesse variable.

Pour pouvoir par la suite présenter le modèle mathématique associé, issu des lois de la physique pour la partie mécanique et de la mécanique des fluides pour le comportement aérodynamique.

Le modèle présenté, et qui sera utilisé tout au long de ce travail, est le modèle à deux masses qui est général et qui peut être appliqué aux éoliennes de toute taille.

1.2 Définition de l'éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur. [3]

1.3 Les différents types de systèmes éoliens

On définit différentes classes de taille d'éoliennes. En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor.

1.3.1 Selon la taille

Dans le tableau suivant sont repris les dénominations de taille et les ordres de grandeur de puissances associées [4]

Echelle	Diamètre du rotor [m]	Puissance délivrée [MW]
Petite	Moins de 12	Moins de 40 KW
Moyenne	12 à 45	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 et plus	1 MW et plus

Tableau 1-1 Classification des éoliennes

1.3.2 Selon le principe de fonctionnement

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice on classe les éoliennes en deux types, les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal voir la figure 1.1. Que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice [5].



Eolienne à axe horizontal



Eolienne à axe vertical

Figure 1. 1 éolienne à axe horizontal et à axe vertical

➤ Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axes vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Les pylônes des éoliennes à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Cela permet de placer tout le dispositif de conversion de l'énergie (génératrice, multiplicateur...etc.) au pied de l'éolienne, facilitant ainsi les opérations de maintenance. De plus, il n'est pas nécessaire d'utiliser un dispositif d'orientation du rotor comme pour les éoliennes à axe horizontal.

Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement.

De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

Les deux types de structures d'éoliennes à axe vertical les plus répandues reposent sur les principes de traînée différentielle ou de la variation cyclique d'incidence.

➤ **Les éoliennes à axe horizontal**

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une turbine à trois pales profilées aérodynamiquement et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine. Le plus souvent, le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales [6].

Bien que les éoliennes à axe vertical aient l'avantage de fonctionner avec toutes les directions du vent, et elles peuvent s'avérer utiles pour capter des vents puissants. Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et permet donc un fonctionnement à faible vitesse de vent.

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde car, leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. C'est pour cela que notre choix est essentiellement porté sur l'étude d'une éolienne à axe horizontal.

1.4 Principales composantes d'une éolienne :

Le système éolien est généralement constitué des éléments principaux, montrés dans la Figure 1. 2.

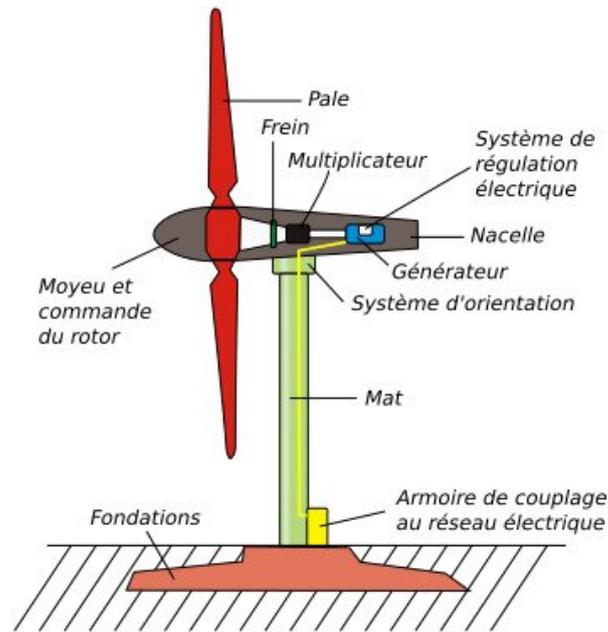


Figure 1. 2 Eléments constituant une éolienne

1.4.1 Fondation

La fondation est généralement conçue en béton. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.

1.4.2 Mât

Il est plus ou moins imposant selon la force de l'éolienne, est conçu en métal afin d'apporter une solidité à l'ensemble. Il supporte les principaux éléments de l'éolienne : la nacelle et le rotor. Certains mâts peuvent atteindre jusqu'à 100 mètres en hauteur, plus le rotor est haut plus le rendement de l'éolienne sera bon, les hélices n'étant plus gênées par aucun obstacle. Un mât solide permet une plus grande longueur de pale.

1.4.3 Rotor

Le rotor est composé du nez de l'éolienne et de l'hélice. L'hélice est généralement composée de trois pales. Les pales sont placées au-devant de la nacelle et reliées ainsi à elle. Les pales produisent une énergie mécanique qui est transformée en électricité par la nacelle. L'électricité produite par la nacelle est transportée par des câbles situés dans le mât jusqu'à une cabine de dispersion.

1.4.4 La cabine de dispersion

La cabine de dispersion située à la base de l'éolienne permet de se connecter au réseau électrique afin d'y injecter l'électricité produite pour la stocker si elle n'est pas directement utilisée ou pour la réinjecter plus tard sur le réseau si elle est fabriquée en surplus.

1.4.5 La nacelle

La nacelle est le moteur de l'éolienne. C'est à l'intérieur de cet équipement que se trouve le générateur d'électricité, qui permet de convertir l'énergie produite par le mouvement de l'hélice en électricité et le reste de la machinerie qui dirige les pales en fonction de la force du vent (frein, suivi du vent, mise au repos).

La nacelle supervise ainsi l'éolienne qui peut être arrêtée dès que le vent n'est pas suffisant ou au contraire trop puissant ou dans tout autre cas qui pourrait poser problème. Le transport de l'électricité produite par la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

Les différents composants d'une nacelle voir [4]. Sont représentés dans la figure 1.3

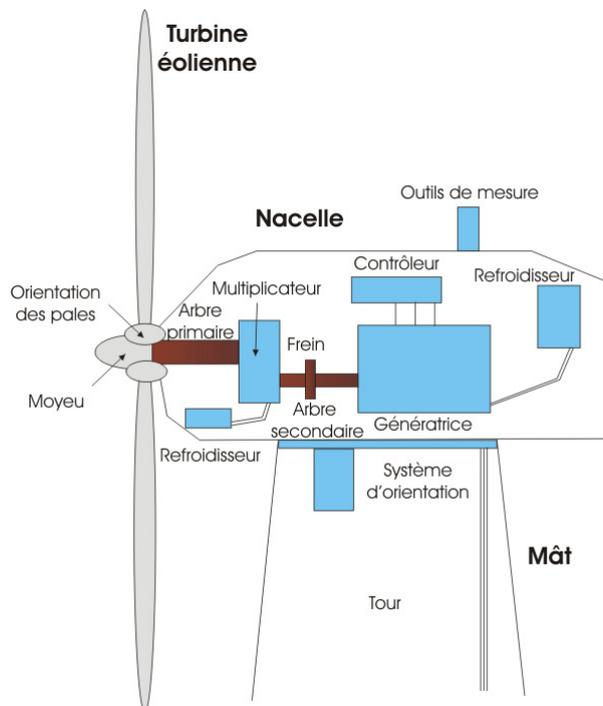


Figure 1.3 Éléments constituant la nacelle

- **Arbre de transmission** : reçoit le mouvement de rotation du moyeu afin d'entraîner la génératrice électrique.
- **Multiplicateur** : adapte la vitesse de rotation au fonctionnement de la génératrice (elle n'est pas nécessaire dans les petites éoliennes).
- **Frein** : sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance.
- **Génératrice** : peut-être un générateur à courant continu ou un alternateur, dans tous les cas elle transforme l'énergie mécanique que lui transmet le rotor, en énergie électrique.
- **Système de contrôle** : surveille le fonctionnement de l'éolienne, signale et commande l'arrêt de l'éolienne en cas de défaillance.
- **Anémomètre** : mesure en permanence la vitesse du vent qu'il va transmettre au système de contrôle de façon à démarrer ou arrêter l'éolienne. En général, une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s et est arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h).
- **Gouvernail** : est le système d'orientation pour les petites éoliennes, il sert à maintenir le rotor de l'éolienne dans l'axe horizontal face au vent afin de tirer le maximum d'énergie.

1.5 Principe de fonctionnement de l'éolien :

Le fonctionnement général de l'éolien est illustré par la figure 1.4 [7]. Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- La turbine extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique
- La génératrice convertit, enfin l'énergie mécanique en énergie électrique, transmise ensuite directement ou indirectement au réseau électrique.

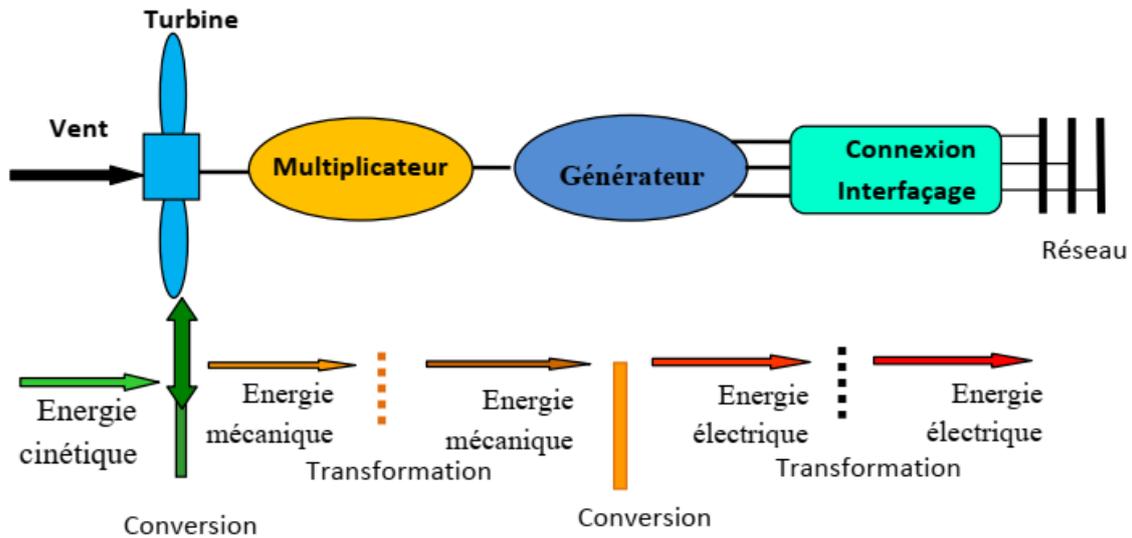


Figure 1. 4 Conversion de l'énergie éolienne

1.6 Aérodynamique

1.6.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent

Les pales de l'éolienne balaient le champ des vitesses du vent qui varie dans le temps et autour du disque rotorique, modifiant ainsi localement la pression et la vitesse de l'air.

Décrivons brièvement l'échange d'énergie entre le vent et l'aéroturbine.

Soit un tube d'air se déplaçant avec une vitesse v_{am} et une pression statique P_0 sur le rotor. La force du vent qui s'exerce sur la turbine est freinée graduellement. Sa vitesse décroît quand cette masse se rapproche du rotor, ce qui crée un élargissement du tube d'air. Ceci induit en amont une augmentation de la pression statique de l'air jusqu'à un maximum P_1 en face du rotor (figure 1.5)

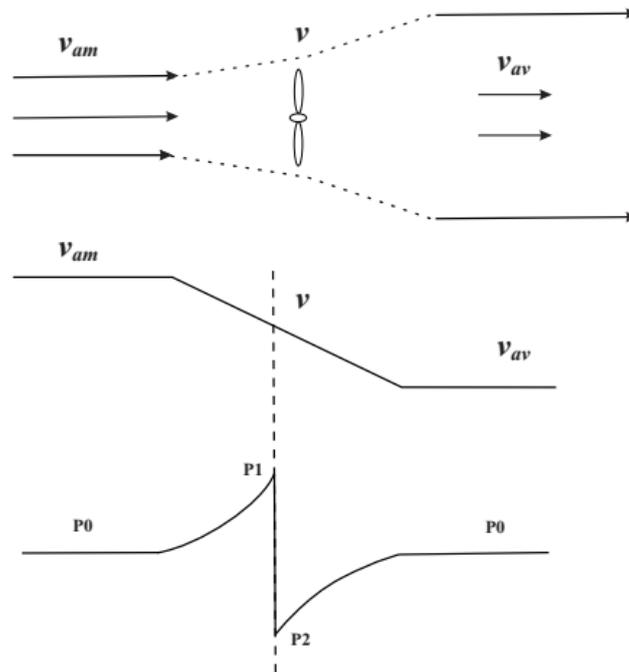


Figure 1. 5 Principe d'extraction de l'énergie cinétique du vent

Une partie de l'énergie cinétique du vent est transformée en énergie potentielle pour produire cette augmentation de la pression. La pression chute ensuite pour atteindre une valeur P2 en dessous de la pression atmosphérique sur la face arrière du rotor [8].

1.6.2 Puissance aérodynamique

La puissance aérodynamique P_a extraite par le rotor [9] en fonction du coefficient de puissance C_p est donnée par:

$$P_a = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p \quad (1.1)$$

Le paramètre C_p est sans dimension, il exprime la capacité de la turbine à extraire de l'énergie du vent. Ce paramètre caractéristique de l'éolienne est une fonction de la vitesse spécifique et du calage β . Il est appelé coefficient de puissance, on a la vitesse spécifique :

$$\lambda = \frac{w_t R}{v} \quad (1.2)$$

$w_t R$ désigne la vitesse tangentielle du bout de la pale, R étant le rayon de l'aire balayée par le rotor (figure 1.6).

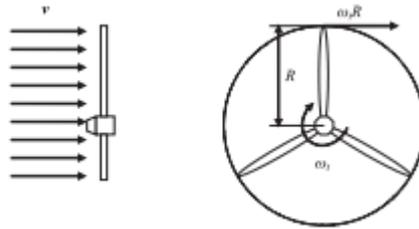


Figure 1. 6 Vitesse spécifique du rotor

La puissance aérodynamique P_a est ainsi une fonction non linéaire de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation du rotor et de l'angle de calage :

$$P_a = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (1.3)$$

Avec :

- $S = \pi R^2$, l'aire de la surface balayée par le rotor.
- ρ la masse volumétrique de l'air.

1.6.3 Coefficient de puissance aérodynamique

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ dépend du nombre de pales du rotor et de leurs formes géométriques et aérodynamiques (longueur, profil des sections) [10]. Celles-ci sont conçues en fonction des caractéristiques d'un site, puissance nominale souhaitée, type de régulation (en pitch ou par décrochage) et du type de fonctionnement (à vitesse fixe ou variable).

$C_p(\lambda, \beta)$ peut être obtenu, par exemple, par des essais en soufflerie. Il se présente sous la forme d'une fonction non linéaire de λ et β , décrite par une famille de polynômes ou des splines. La limite supérieure théorique du coefficient de puissance $C_{p,max}$ est fournie par la loi de Betz [9]

$$C_{p,max} = \frac{16}{27} \approx 0.5926 \quad (1.4)$$

En pratique, les frottements et la force de traînée réduisent cette valeur à environ 0.5 pour les éoliennes de grande taille. On peut aussi calculer une expression analytique de $C_p(\lambda)$ pour différentes valeurs de β . Une seule interpolation par rapport à β est alors suffisante. Pour un angle de calage β donné, l'expression analytique généralement utilisée est une régression polynômiale [9]:

$$C_p(\lambda) = \sum_{i=0}^{n_c} a_i \lambda^i \quad (1.5)$$

Winkelman [11] et Abdin [12] proposent une forme sinusoïdale, qui a été reprise par El Aïmani dans [13]. Heier [14] suggère une expression plus complexe

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\left(\frac{-c_5}{\lambda_i} \right)} + c_6 \lambda \quad (1.6)$$

Où

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (1.7)$$

Le coefficient de puissance de l'éolienne considérée dans cette étude est donné dans la figure 1.7.

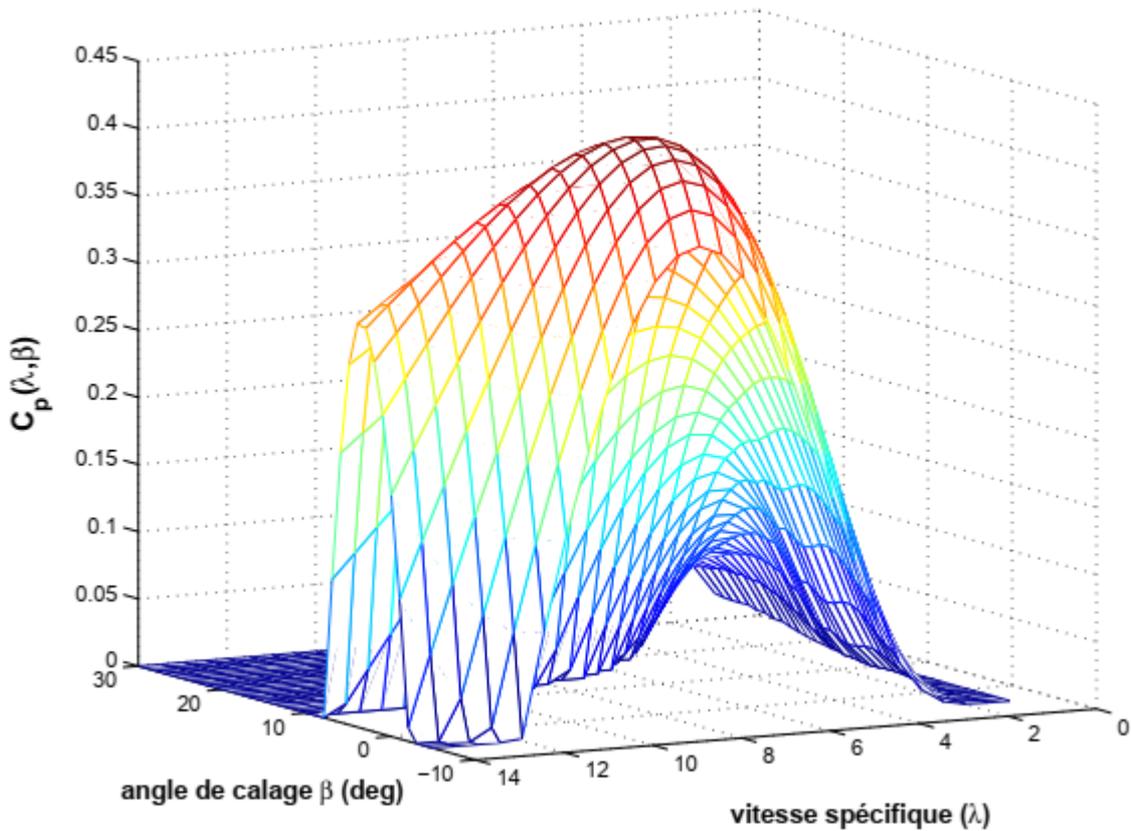


Figure 1.7 Coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$

1.6.4 Couple aérodynamique

L'énergie cinétique du vent capturée par l'aéroturbine se transforme en énergie mécanique qui se traduit par un couple moteur T_a faisant tourner le rotor à une vitesse w_t . En termes de puissance, on peut écrire

$$P_a = T_a w_t \quad (1.8)$$

Ou encore

$$T_a = \frac{P_a}{w_t} \quad (1.9)$$

En substituant l'expression (1.3) de P_a dans (1.9) et en tenant compte de (1.2), on peut réécrire l'expression du couple aérodynamique sous la forme

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_q(\lambda, \beta) \quad (1.10)$$

Où

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (1.11)$$

$C_q(\lambda, \beta)$ est le coefficient du couple aérodynamique

Ce coefficient est utile pour estimer la valeur du couple en différents points de fonctionnement. Comme C_p , il dépend de la vitesse du vent v , de la vitesse de rotation de la turbine ω_t et de l'angle de calage β . Il est aussi exprimé, le plus souvent, en fonction de λ et β .

1.7 Dispositif d'entraînement

Le dispositif d'entraînement est destiné à transformer la vitesse de rotation lente du côté rotor en une vitesse de rotation rapide du côté générateur. Ceci permet d'utiliser des générateurs de taille plus compacte. On peut lui associer un modèle à deux masses ou un modèle à une masse uniquement.

Dans notre travail, nous allons utiliser le modèle à deux masses pour le dispositif d'entraînement, qui est très employé dans la littérature [9]. Son schéma est illustré sur la figure 1.8.

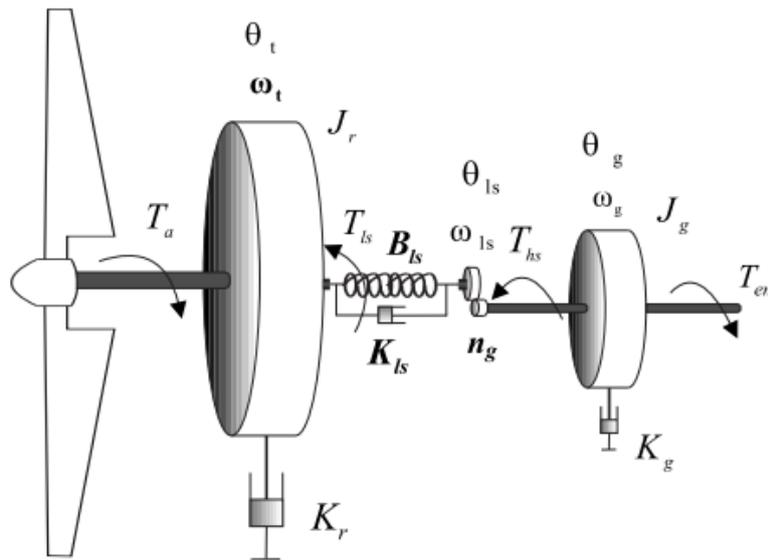


Figure 1. 8 Schéma du dispositif d'entraînement à deux masses

	Signification	Unité
J_r	inertie des masses du côté du rotor	[kg.m ²]
J_g	inertie des masses du côté de la génératrice	[kg.m ²]
B_{ls}	coefficient de torsion sur l'arbre lent	[Nm/rad/s]
K_r	coefficient de frottements externes du rotor	[Nm/rad/s]
K_g	coefficient de frottements externes de la génératrice	[Nm/rad/s]
K_{ls}	coefficient de frottements sur l'arbre lent	[Nm/rad]
T_{ls}	couple de l'arbre lent	[Nm]
T_{hs}	couple de l'arbre rapide	[Nm]
T_{em}	couple électromagnétique de la génératrice	[Nm]
ω_t	vitesse du rotor	[rad/s]
ω_{ls}	vitesse de l'arbre lent	[rad/s]
ω_{hs}	vitesse de la génératrice	[rad/s]
n_g	rapport de transmission du multiplicateur	Sans unité

Les hypothèses relatives à ce modèle sont :

- tous les modes flexibles sont localisés dans l'élément flexible de l'arbre lent,
- l'arbre rapide est infiniment rigide,
- les modes flexibles des pales sont supposés suffisamment élevés pour être négligés.

Les inerties du multiplicateur et de l'arbre lent sont intégrées à celle du rotor. L'ensemble est représenté par J_r .

A cause de sa taille immense, le rotor peut être modélisé par une seule masse. En effet, l'inertie de la turbine est sensiblement égale à celle des pales. Selon Vihriälä [15], l'inertie du moyeu peut être négligée car elle représente 1% de l'inertie totale de la turbine.

L'inertie de l'arbre rapide associé à la génératrice est représentée par J_g . Les torsions des pales, moyeu, multiplicateur et de l'arbre lent sont regroupées dans un coefficient d'élasticité global représenté sur l'arbre lent ; [16]. La torsion de l'axe de la turbine, en termes de constante de raideur, peut être calculée analytiquement connaissant sa forme géométrique et les propriétés des matériaux la constituant grâce aux lois de la résistance des matériaux [9].

Les frottements visqueux sur les roulements du dispositif d'entraînement sont pris en compte par les coefficients K_r et K_g .

Hormis quelques travaux qui supposent que seul l'arbre rapide est flexible, la majorité des auteurs considèrent un arbre lent flexible et un arbre rapide parfaitement rigide [9],

Cependant, on peut dans tous les cas ramener les coefficients de frottement et d'élasticité sur un seul arbre. Dans la suite de ce document, on désigne par J_r et J_g les inerties du rotor et de la génératrice respectivement.

La dynamique du rotor est caractérisée par une équation différentielle du premier ordre

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - K_r \omega_t \quad (1.12)$$

D'où

$$\omega_t = \frac{1}{J_r s + K_r} (T_a - T_{ls}) \quad (1.13)$$

Le couple de l'arbre lent T_{ls} résulte des effets de frottements et de torsion générés par les écarts entre la vitesse angulaire du rotor ω_t et celle de l'arbre lent ω_{ls} d'une part et entre la position angulaire θ_t et celle de l'arbre lent θ_{ls} d'autre part.

$$T_{ls} = B_{ls}(\theta_t - \theta_{ls}) + K_{ls}(\omega_t - \omega_{ls}) \quad (1.14)$$

Ce qui me permet d'établir le modèle du bloc de la première masse et l'arbre lente

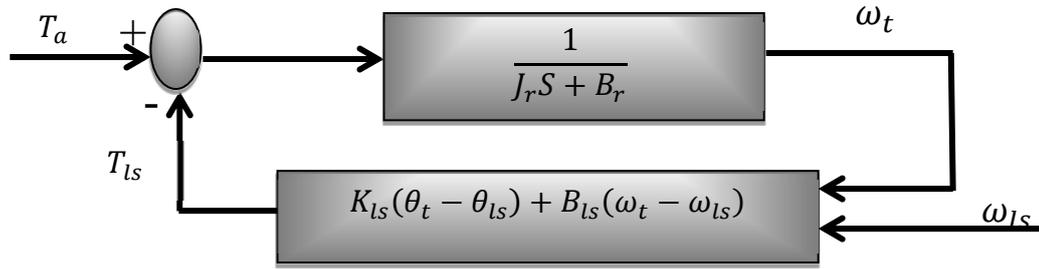


Figure 1. 9 Modèle de l'arbre lent (première masse)

Le couple et la vitesse de cet arbre sont transmis via le multiplicateur de vitesse de rapport n_g pour produire un couple sur l'arbre rapide.

Car la vitesse et la position angulaire du générateur sont

$$\begin{cases} \theta_g = n_g * \theta_{ls} \\ \omega_g = n_g * \omega_{ls} \end{cases} \quad (1.15)$$

En pratique, le multiplicateur induit des pertes (0.5% de la puissance nominale) [9]. Dans le cas où ces pertes sont prises en compte, le couple de l'arbre rapide fait apparaître le rendement du multiplicateur n_g .

$$T_{hs} = \eta_g \frac{T_{ls}}{n_g} \quad (1.16)$$

Pour un multiplicateur idéal, on a donc

$$n_g = \frac{T_{ls}}{T_{hs}} = \frac{\omega_g}{\omega_{ls}} = \frac{\theta_g}{\theta_{ls}} \quad (1.17)$$

Le générateur est entraîné par le couple de l'arbre rapide T_{hs} et freiné par le couple électromagnétique T_{em} et les frottements visqueux. Sa dynamique est

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - K_g \omega_g \quad (1.18)$$

D'où :

$$\omega_g = \frac{1}{J_g S + K_g} (T_{hs} - T_{em}) \quad (1.19)$$

D'où le modèle de l'arbre rapide (deuxième masse) peut être représenté comme suit :

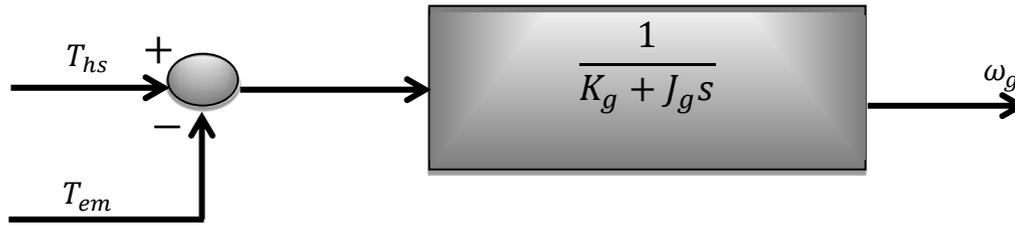


Figure 1. 10 modèle de l'arbre rapide (deuxième masse)

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté tout d'abord des notions générales sur l'éolienne, ses différents types. Ensuite nous nous sommes focalisés à l'étude d'une éolienne à axes horizontal, dont on a présenté les principaux composant la constituant. Après avoir brièvement décrit le mécanisme de fonctionnement de celle-ci, on a expliqué le principe de conversion aérodynamique du vent.

La modélisation de cette éolienne est illustrée dans la deuxième partie de ce chapitre. En effet, le modèle mathématique associé, issu des lois de la physique pour la partie mécanique et de la mécanique des fluides pour le comportement aérodynamique est élaboré, pour aboutir à un modèle global non linéaire à deux masses. Ce modèle sera utilisé dans le reste de ce travail.

Chapitre II

COMMANDE PAR MODE GLISSANT ADAPTATIVE D'UN SYSTEME EOLIEN

Chapitre 2 : Commande par mode glissant adaptative du système éolien

2.1 Introduction

Dans ce chapitre est présenté la conception d'une commande pour l'éolienne, afin d'optimiser ses performances et son rendement par rapport à l'énergie cinétique du vent captée par la turbine, tout en respectant ses limites physiques.

Nous allons présenter une commande robuste qui est basée sur les modes glissants adaptative. Elle s'appuie sur un contrôleur en mode glissant robuste et dynamique pour le contrôle de systèmes incertains non linéaires [17] [1].

En effet, le contrôle par mode glissant est une approche robuste, non linéaire et efficace, puisqu'il procure aux systèmes dynamiques une propriété d'insensibilité aux incertitudes. En raison de l'utilisation d'une fonction discontinue et d'un gain de contrôle élevé [18] ce qui aggrave le principal inconvénient de la commande en mode glissant, le phénomène du chattering. Une solution consiste à utiliser la commande adaptative basé sur la théorie de Lyapunov ce qui permet l'utilisation d'un gain petit et la minimisation ce phénomène.

2.2 Stratégies de commande de la turbine éolienne

2.2.1 Caractéristique de la puissance d'éolienne de grande puissance

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones [13] (figure 2.1)

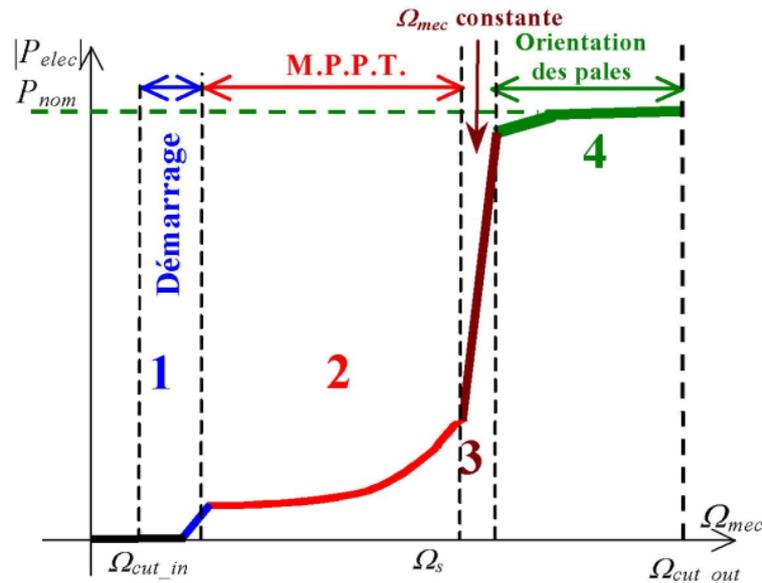


Figure 2. 1 Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance

Quatre zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées :

- Zone 1 : C'est la zone de démarrage de la machine, elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{cut_in}
- Zone 2 : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent est appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu constant à sa valeur minimale, c'est à dire $\beta = 2^\circ$. Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.
- Zone 3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- Zone 4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control.
- Au-delà de la vitesse Ω_{cut_in} un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

2.2.2 Techniques d'extraction du maximum de la puissance (M.P.P.T)

Comme on l'a déjà mentionné dans le chapitre 1, le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est une fonction non linéaire de la vitesse spécifique λ et de l'angle de calage β , cette fonction possède un seul maximum $C_{p_max} = C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt})$.

Pour maximiser la capture de l'énergie du vent, ces deux variables doivent être maintenues à leurs valeurs optimales afin d'assurer la valeur maximale de C_p . On fixe donc l'angle de calage à sa valeur optimale. La vitesse spécifique définie par :

$$\lambda = \frac{\omega_t R}{v} \quad (2.1)$$

La vitesse spécifique dépend à la fois de la vitesse du vent v et de la vitesse de l'aéroturbine ω_t . Comme la vitesse du vent est une entrée non commandable, ω_t doit varier constamment pour suivre les fluctuations de v afin de maintenir le rapport (2.1) à sa valeur optimale λ_{opt} .

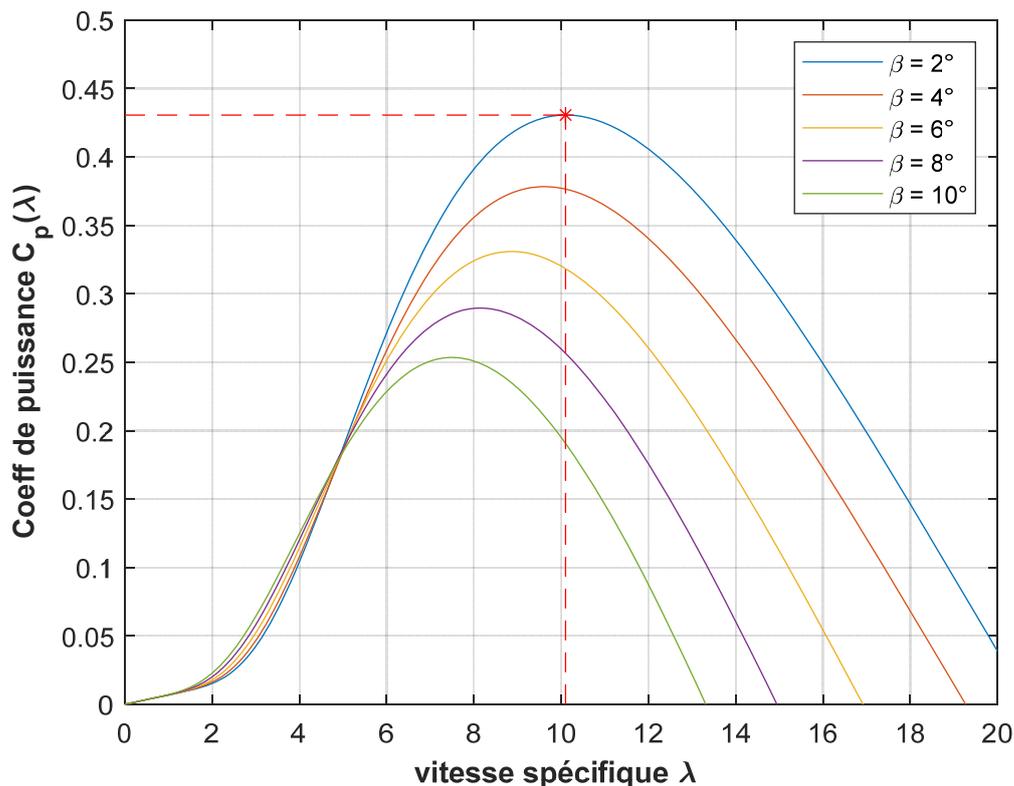


Figure 2.2 Coefficient de puissance

Cependant, cette optimisation doit être réalisée en minimisant les efforts mécaniques sur les différentes parties de l'éolienne. Ces deux objectifs s'avèrent contradictoires : en effet, afin de garder la vitesse spécifique constante, la vitesse du rotor doit suivre exactement la turbulence du vent, ce qui nécessite une variation rapide et des amplitudes importantes de ω_t et par conséquent l'augmentation des efforts de commande et des charges subies par l'éolienne. Il est alors nécessaire de réaliser un compromis [9].

2.2.3 Configuration de la commande

Les constantes de temps du système électrique sont beaucoup plus faibles que celles des autres parties de l'aérogénérateur. Ceci permet de dissocier la commande de la génératrice de celle de l'aéroturbine et de définir ainsi deux niveaux de commande [9] [10]

1. Un module de commande de niveau 1 qui est appliqué à la génératrice électrique via les convertisseurs de puissance ainsi que le dispositif de calage.
2. Un module de commande de niveau 2 qui fournit les entrées β^* et T_{em}^* du module du niveau 1

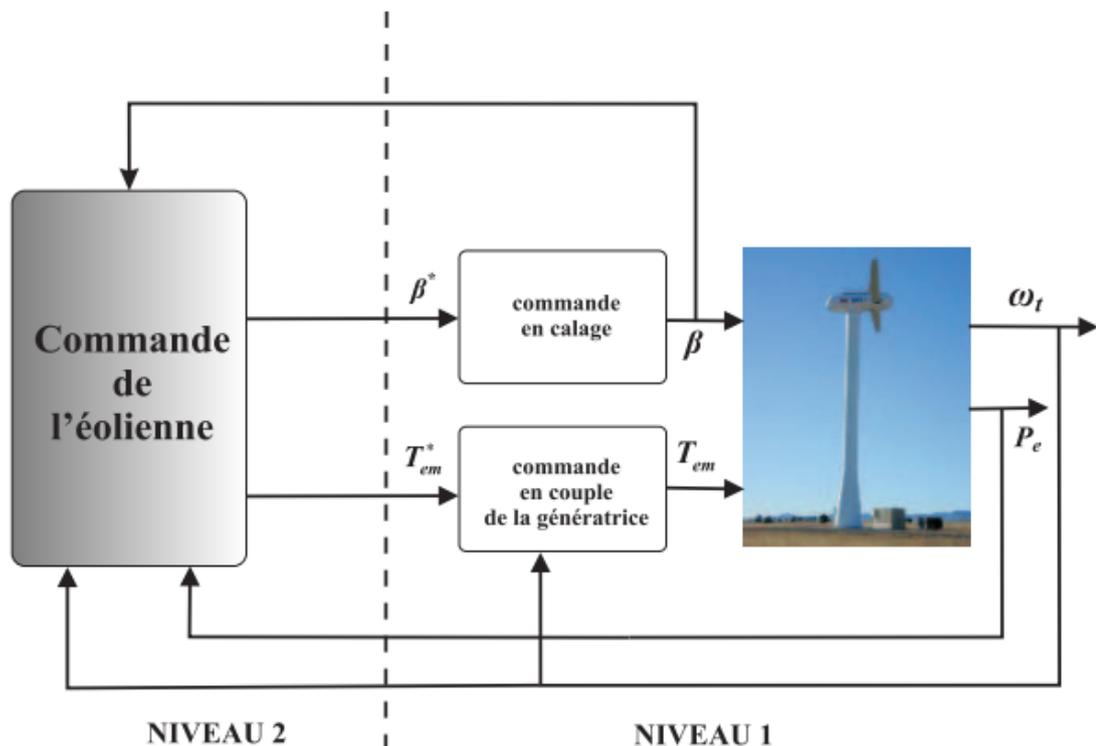


Figure 2. 3 Niveaux de commande d'une éolienne à vitesse variable et calage variable

La commande de niveau 2 de l'aérogénérateur peut donc être réalisée sans modéliser la partie électrique [9] [10].

2.3 Commande par mode de glissement

La commande par mode glissant est un contrôle de type non linéaire, qui a été introduit initialement pour le contrôle des systèmes à structure variable. Ses principaux avantages sont la garantie de la stabilité et de la robustesse pour de larges variations des paramètres du système, de l'entrée et des perturbations sur le système. De plus, étant donné sa flexibilité en ce qui concerne la synthèse, la commande par mode glissant est relativement facile à mettre en œuvre par rapport à d'autres types de commande non linéaires. Ces propriétés font que cette loi de commande est adaptée à de nombreuses applications industrielles.

2.3.1 Principe de la commande par mode glissant.

Dans la commande des systèmes à structure variable par mode de glissement, la trajectoire d'état est amenée vers une surface. Puis à l'aide de la loi de commutation, elle est obligée de rester au voisinage de cette surface. Cette dernière est appelée surface de glissement et le mouvement le long de laquelle se produit, est appelé mouvement de glissement [19]

La trajectoire dans le plan de phase est constituée de trois parties distinctes [20]

- Le mode de convergence (MC) : c'est le mode durant lequel la variable à régler se déplace à partir de n'importe quel point initial dans le plan de phase, et tend vers la surface de commutation S . Ce mode est caractérisé par la loi de commande et le critère de convergence.
- Le mode de glissement (MG) : c'est le mode durant lequel la variable d'état a atteint la surface de glissement et tend vers l'origine du plan de phase. La dynamique de ce mode est caractérisée par le choix de la surface de glissement.
- Le mode du régime permanent (MRP) : ce mode est ajouté pour l'étude de la réponse du système autour de son point d'équilibre (origine du plan de phase), il est caractérisé par la qualité et les performances de la commande.

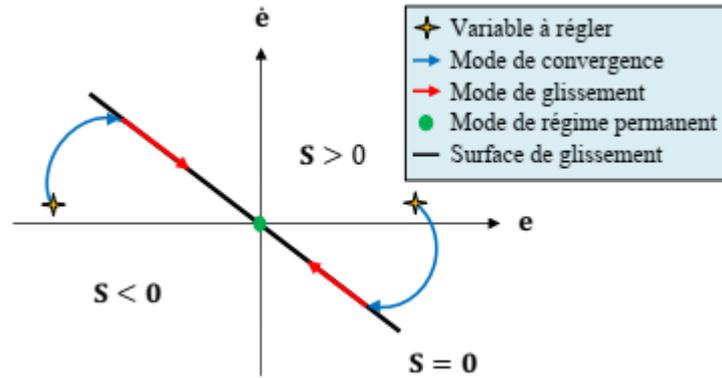


Figure 2. 4 Différents modes pour la trajectoire dans le plan de phase

2.3.2 Synthèse de la loi de commande par mode glissant

La synthèse de la commande par mode glissant se fait en trois étapes :

- Choix de la surface de glissement qui représente la dynamique désirée.
- Etablir la condition de convergence.
- Déterminer la loi de commande qui aura pour rôle de garantir le maintien et le glissement le long des trajectoires du système sur cette surface.

2.3.2.1 Choix de la surface de glissement

Soit le système affine, mono entrée mono sortie (SISO), décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}^n &= f(x, t) + g(x, t)u + d(t) \\ y &= x \end{cases} \quad (2.2)$$

Ou $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T \in \mathbb{R}^n$ est le vecteur d'état du système supposé mesurable. f et g sont deux fonctions non linéaires. $d(t)$ est une perturbation externe bornée, c.à.d., $|d(t)| \leq D$. u et y sont l'entrée et la sortie du système respectivement.

Remarque 2.1: Pour garantir la commandabilité du système, la fonction g doit être inversible, c.à.d. $g(x, t) \neq 0, \forall t \in \mathbb{R}, x \in \mathbb{R}^n$.

Soit $x_d(t)$ la consigne désirée et $e(t)$ l'erreur de poursuite définie par :

$$e = x - x_d(t) \quad (2.3)$$

Définition 2.1 : (Surface de Slotine) [17] La surface de glissement sur laquelle les objectifs de commande sont réalisés est définie par :

$$s = \left(\lambda + \frac{d}{dt}\right)^{r-1} e \quad (2.4)$$

Où r : le degré relatif du système c'est-à-dire le nombre de fois qu'il faut dériver e (ou bien la sortie dans le cas d'une référence constante) pour que u apparaisse.

2.3.2.2 Condition d'existence du mode de glissement (attractivité)

L'étude de l'existence du mode de glissement est basée sur la deuxième méthode de Lyapunov dont une fonction définie positive est considérée comme suit :

$$V = \frac{1}{2} s^2 \quad (2.5)$$

Afin de garantir l'attractivité de la surface $s(t, x) = 0$, il faut que la fonction \dot{V} doit être définie négative, qui peut être traduit mathématiquement par :

$$\dot{V} = s\dot{s} < 0 \quad (2.6)$$

Cette condition signifie que les trajectoires du système convergent asymptotiquement vers la surface de glissement $s(t, x) = 0$ puis restent dans un voisinage de cette surface.

Remarque 2.2 : Pour une convergence en temps fini, la condition (2.6) qui ne garantit qu'une convergence asymptotique vers la surface de glissement est remplacée par une condition plus restrictive dite de η -attractivité [17], donnée par :

$$s\dot{s} < -\eta|s| \quad (2.7)$$

2.3.2.3 Détermination de la loi commande

Afin d'assurer l'attractivité et l'invariance de la surface de glissement, on doit définir une loi de commande sous la forme suivante [7]

$$U = U_{eq} + U_n \quad (2.8)$$

Telle que U_{eq} est la commande équivalente définie par **Utkin** correspond à la commande du système nominale permettant de satisfaire la condition d'invariance $\dot{s}(x) = 0$

$$U_{eq} = - \left[\frac{\partial s}{\partial x} g(x) \right]^{-1} \frac{\partial s}{\partial x} f(x) \quad (2.9)$$

Et

$$U_n = -K \operatorname{sign}(S) \quad (2.10)$$

Avec

$$\operatorname{sign}(s) = \begin{cases} -1, & s < 0 \\ 1, & s > 0 \\ \in [-1,1] & s = 0 \end{cases} \quad (2.11)$$

2.3.3 Phénomène de broutement (chattering)

L'utilisation de la fonction sign signifie que la commande U_n commute entre deux valeurs $\pm k$. La discontinuité appliquée à cette commande peut entraîner des oscillations de haute fréquence de la trajectoire du système autour de la surface de glissement pendant le régime glissant, ce qui cause le phénomène de broutement (chattering en anglais).

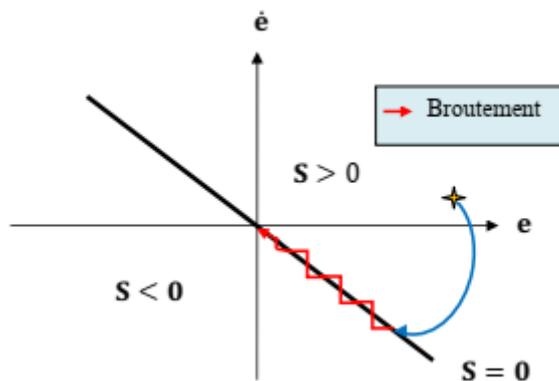


Figure 2. 5 Phénomène de chattering

Plusieurs techniques ont été proposées pour réduire ou éliminer ce phénomène. Parmi ces techniques la solution proposée par [17]. Elle consiste à approximer la commande discontinue par la fonction saturation tel que :

$$\operatorname{sat}(s) = \begin{cases} -1, & s < -\varepsilon \\ 1, & s > \varepsilon \\ \frac{s}{\varepsilon} & |s| \leq \varepsilon \end{cases} \quad (2.12)$$

2.4 Commande par mode glissant adaptative

2.4.1 Principe de la commande

Dans la conception de commande conventionnelle (non adaptative), la structure du contrôleur (par exemple, le placement des pôles) est choisie en premier, et les paramètres du contrôleur sont ensuite calculés sur la base des paramètres connus du modèle.

En commande adaptative, la différence majeure est que les paramètres du modèle sont inconnus, donc les paramètres du régulateur doivent être fournis par une loi d'adaptation. En conséquence, la conception de la commande adaptative est plus impliquée. avec les besoins supplémentaires de choisir une loi d'adaptation et de prouver la stabilité du système avec adaptation.

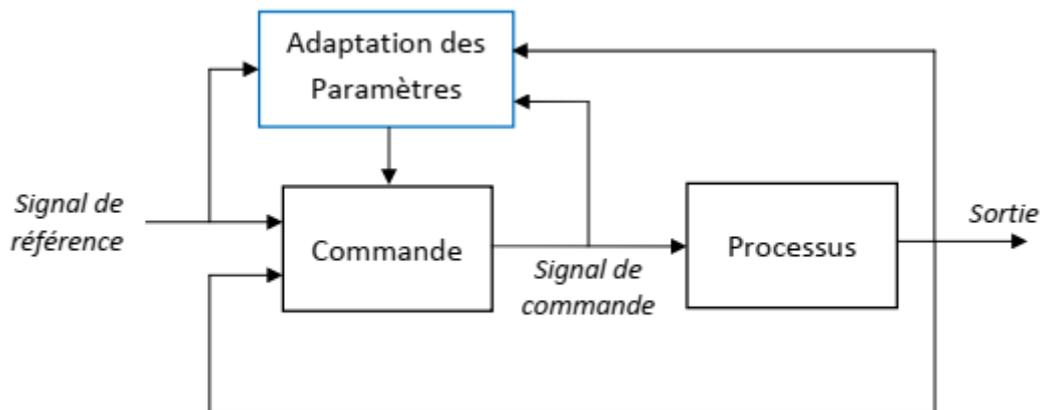


Figure 2. 6 Schéma de principe de la commande adaptative.

2.4.2 Commande adaptative basé sur la théorie de Lyapunov

L'idée principale de l'utilisation de la fonction de Lyapunov dans la commande adaptative, consiste à calculer une loi de commande et une loi de mise à jour des paramètres, afin de garantir que la dérivée d'une certaine fonction, définie positive bien choisie, est négative

La conception d'un contrôleur adaptatif comprend généralement les trois étapes suivantes : [17]

- choisir une loi de commande contenant des paramètres variables.
 - choisir une loi d'adaptation pour ajuster ces paramètres
 - analyser les propriétés de convergence du système de contrôle résultant.
-

2.4.3 Commande par mode glissant adaptatif appliqué à l'éolienne

Les équations du modèle vu dans le premier chapitre système sont

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - T_{ls} - K_r \omega_t \quad (2.13)$$

$$T_{ls} = B_{ls}(\theta_t - \theta_{ls}) + K_{ls}(\omega_t - \omega_{ls}) \quad (2.14)$$

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - T_{em} - K_g \omega_g \quad (2.15)$$

Pour simplifier la représentation, nous l'écrivons sous la forme d'état, en choisissant le vecteur d'état :

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{bmatrix}, \quad u_1 = T_a \text{ et } u_2 = T_{em} \quad (2.16)$$

En introduisant la dérivée de T_{ls} à partir de l'équation (2.14), nous obtenons

$$\dot{T}_{ls} = B_{ls} \left(\omega_t - \frac{\omega_g}{n_g} \right) + K_{ls} \left(\dot{\omega}_t - \frac{\dot{\omega}_g}{n_g} \right) \quad (2.17)$$

En remplaçant les valeurs de $\dot{\omega}_t$ et $\dot{\omega}_g$ dans (2.17) par leur valeur à partir de (2.13) et (2.15), nous obtenons la représentation :

$$\begin{bmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_r}{J_r} & 0 & -\frac{1}{J_r} \\ 0 & -\frac{K_g}{J_g} & \frac{1}{n_g J_g} \\ B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r} & \frac{K_{ls} K_g}{J_g n_g} - \frac{B_{ls}}{n_g} & -\frac{K_{ls}}{n_g^2 J_g} - \frac{K_{ls}}{J_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{J_r} \\ 0 \\ \frac{K_{ls}}{J_r} \end{bmatrix} T_a + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{J_g} \\ \frac{K_{ls}}{n_g J_g} \end{bmatrix} T_{em} \quad (2.18)$$

En remplaçons dans (2.18) par (2.16), le modèle du système s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -a_{11} & 0 & -a_{13} \\ 0 & -a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & -a_{32} & -a_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} \\ 0 \\ b_{13} \end{bmatrix} u_1 + \begin{bmatrix} 0 \\ -b_{22} \\ b_{23} \end{bmatrix} u_2 \quad (2.19)$$

Avec :

$$a_{11} = \frac{K_r}{J_r}, \quad a_{13} = \frac{1}{J_r}, \quad a_{22} = \frac{K_g}{J_g}, \quad a_{23} = \frac{1}{n_g J_g}, \quad a_{31} = B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r}, \quad a_{32} = -\frac{K_{ls} K_g}{J_g n_g} + \frac{B_{ls}}{n_g}$$

$$a_{33} = \frac{K_{ls}}{n_g^2 J_g} - \frac{K_{ls}}{J_r}, \quad b_{11} = \frac{1}{J_r}, \quad b_{13} = \frac{K_{ls}}{J_r}, \quad b_{22} = \frac{1}{J_g}, \quad b_{23} = \frac{K_{ls}}{n_g J_g}$$

2.4.3.1 Choix de la loi de commande

Dans la première étape nous allons synthétiser une commande par mode glissant qui permet de répondre aux spécifications désirées, quant au comportement du système à commander.

Définissons l'erreur de commande

$$\mathbf{e} = \boldsymbol{\omega}_t - \boldsymbol{\omega}_{t\,opt} = \mathbf{x}_1 - \mathbf{x}_{1d} \quad (2.20)$$

Pour le choix de la surface de glissement sur laquelle les objectifs de commande sont réalisés, nous utiliserons la surface de Slotine (définition (2.1)).

En appliquant la procédure, il est facile de vérifier que la commande apparait pour la première fois dans la dérivée seconde \ddot{x}_1 c'est-à-dire le degré relatifs $r = 2$. En remplaçons dans (2.4), nous obtenons :

$$S = \lambda e + \dot{e} \quad (2.21)$$

Ou $\lambda > 0$.

Nous choisissons la fonction candidate de Lyapunov suivante :

$$V_1(x) = \frac{1}{2 a_{13} b_{23}} S^2 \quad (2.22)$$

Calculons le dérivé de la fonction $V_1(x)$

$$\dot{V}_1(x) = \frac{1}{a_{13} b_{23}} S \dot{S} \quad (2.23)$$

Calculons la dérivé de la surface de glissement

$$\begin{aligned} \frac{1}{a_{13} b_{23}} \dot{S} = & -u_2 - \frac{a_{31}}{b_{23}} x_1 + \frac{a_{32}}{b_{23}} x_2 + \frac{a_{33}}{b_{23}} x_3 - \frac{b_{13}}{b_{23}} u_1 - \frac{a_{11}}{a_{13} b_{23}} \dot{x}_1 \\ & + \frac{b_{11}}{a_{13} b_{23}} \dot{u}_1 + \frac{1}{a_{13} b_{23}} (\lambda \dot{e}_1 - \ddot{x}_{1d}) \end{aligned} \quad (2.24)$$

On peut récrire (2.24) sous forme compacte :

$$\frac{1}{a_{13} b_{23}} \dot{S} = -u_2 + \underline{Y}^T \underline{a} \quad (2.25)$$

Avec :

$$\underline{Y}^T = [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad u_1 \quad \dot{x}_1 \quad \dot{u}_1 \quad \lambda \dot{e}_1 - \ddot{x}_{1d}]$$

$$\underline{a}^T = \left[-\frac{a_{31}}{b_{23}} \quad \frac{a_{32}}{b_{23}} \quad \frac{a_{33}}{b_{23}} \quad -\frac{b_{13}}{b_{23}} \quad -\frac{a_{11}}{a_{13}b_{23}} \quad \frac{b_{11}}{a_{13}b_{23}} \quad \frac{1}{a_{13}b_{23}} \right]$$

En remplaçant dans la formule (2.23) de $\dot{V}_1(x)$, nous obtenons :

$$\dot{V}_1(x) = \frac{1}{a_{13} b_{23}} S \dot{S} = S(-u_2 + \underline{Y}^T \underline{a}) \quad (2.26)$$

Afin d'assurer l'attractivité de la surface $\dot{V}_1(x) \leq 0$, nous choisissons la commande

$$u_2 = \underline{Y}^T \underline{a} + K \text{sign}(S) \quad (2.27)$$

(2.26) devient alors :

$$\dot{V}_1(x) = -K |S| \leq 0 \quad (2.28)$$

2.4.3.2 Détermination de loi d'adaptation

Dans la première partie nous avons supposé que nous disposions des valeurs exactes du vecteur \underline{a} . Mais en réalité nous ne nous disposons que de leurs estimés $\hat{\underline{a}}$. Donc la loi de commande (2.27) s'écrit :

$$u_2 = \underline{Y}^T \hat{\underline{a}} + K \text{sign}(S) \quad (2.29)$$

En remplaçant la commande (2.29) dans (2.26), la dérivé de la fonction de Lyapunov candidate choisie devient :

$$\dot{V}_1(x) = -K |S| - S \underline{Y}^T (\hat{\underline{a}} - \underline{a}) = -K |S| - S \underline{Y}^T \tilde{\underline{a}} \quad (2.30)$$

Avec l'erreur d'estimation paramétrique.

$$\tilde{\underline{a}}(t) = \hat{\underline{a}}(t) - \underline{a} \quad (2.31)$$

Nous remarquons que le signe de (2.30) est indéterminé. Et aucune conclusion ne peut être tirée quant à la stabilité du système.

Afin d'avoir $\dot{V}_1(x) \leq 0$, on doit se débarrasser du terme $S \underline{Y}^T \tilde{\underline{a}}$, pour cela nous définissons alors une nouvelle fonction de Lyapunov, en ajoutant à la fonction initiale donnée par l'équation (2.22), un terme quadratique en fonction de l'erreur d'estimation

$$V_2(x) = \frac{1}{2 a_{13} b_{23}} S^2 + \frac{1}{2} \tilde{\underline{a}}^T P^{-1} \tilde{\underline{a}} \quad (2.32)$$

Avec : P matrice défini positif qui va représenter le gain d'adaptation.

la dérivé de cette fonction devient :

$$\dot{V}_2(x) = S(-u_2 + \underline{Y}^T \underline{a}) + \underline{\hat{a}}^T P^{-1} \underline{\tilde{a}} \quad (2.33)$$

En remplaçons la commande u_2 par (2.29), (2.33) s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \dot{V}_2(x) &= -K |S| - S \underline{Y}^T \underline{\tilde{a}} + \underline{\hat{a}}^T P^{-1} \underline{\tilde{a}} \\ &= -K |S| + (-S \underline{Y}^T + \underline{\hat{a}}^T P^{-1}) \underline{\tilde{a}} \end{aligned} \quad (2.34)$$

Afin d'assurer que $\dot{V}_2(x) = -K |S| \leq 0$, nous devons annuler le deuxième terme

$$-S \underline{Y}^T + \underline{\hat{a}}^T P^{-1} = 0 \quad (2.35)$$

Alors nous obtenons la loi d'adaptation :

$$\underline{\hat{a}} = P \underline{Y}^T S \quad (2.36)$$

Le contrôleur résultant, constitué de loi de commande (2.29) augmenté de la loi d'adaptation (2.36) est:

$$\begin{cases} u_2 &= \underline{Y}^T \underline{\hat{a}} + K \text{sign}(S) \\ \underline{\hat{a}} &= P \underline{Y}^T S \end{cases} \quad (2.37)$$

2.5 Résultats de simulation

Dans le but de tester la commande que nous proposons, les simulations ont été réalisées dans les conditions suivantes :

2.5.1 Profil du vent utilisé

Pour effectuer les différentes simulations de notre système, nous avons besoin d'un profil de vent reflétant au maximum la réalité de ce qu'on peut trouver sur un site éolien.

Le profil du vent utilisé est un tableau de valeurs d'une moyenne de 7 m/sec, d'une période de 10 min et d'une intensité de turbulence de 25%, la Figure 2. 7, illustre ce profil en fonction du temps.

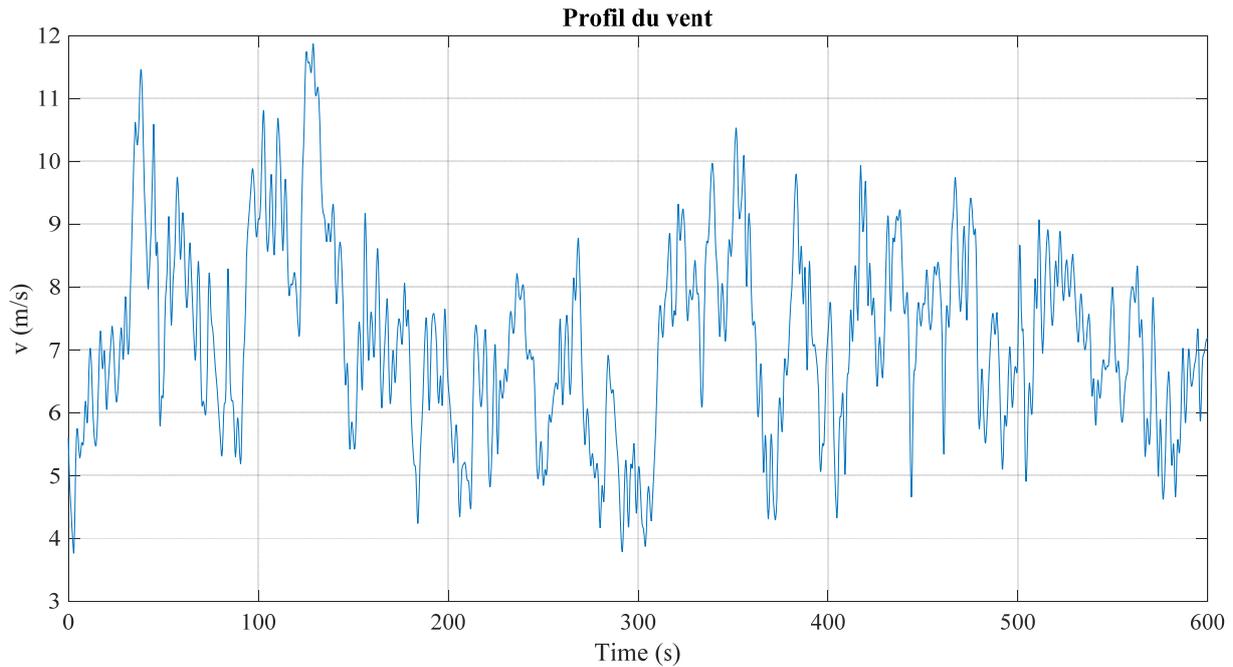


Figure 2. 7 Profil du vent utilisé

2.5.2 Présence des incertitudes paramétriques et de perturbation

Certains paramètres de modèle peuvent changer de valeur soit par saut (comme le cas du coefficient de torsion B_{1s}), soit par dégradation avec le temps (comme le cas coefficient de frottement visqueux K_{1s} et du rendement du multiplicateur n_g). Ceci s'est traduit dans notre travail sous forme d'incertitudes sur ces paramètres. Ces dernières sont aussi mises en œuvre pour tenir compte des dynamiques négligées, elles sont données par la formule :

$(m = m_0 \pm \Delta m)$ [9]. En effet :

- le paramètre n_g est conçu avec une incertitude de 10%.
- le paramètre K_{1s} est conçu avec une incertitude de 20%
- le paramètre B_{1s} avec une incertitude de 50%

Ainsi qu'une perturbation sur le signal de commande sous forme d'un saut a été introduite à partir de $t = 300s$.

2.5.3 Le rendement

Le rendement aérodynamique $\eta_{aéro}$ est défini comme le rapport entre l'énergie aérodynamique extraite par l'éolienne pendant la durée de la simulation et l'énergie aérodynamique maximale

disponible qui correspond à un fonctionnement de l'éolienne avec un coefficient de puissance optimal pendant toute la durée de la simulation.

$$\eta_{aéro} = \frac{\int_{t_{ini}}^{t_{fin}} P_a dt}{\int_{t_{ini}}^{t_{fin}} P_{a_opt} dt} \quad (2.38)$$

Avec :

$$P_{a_opt} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 C_{p_opt} v^3 \quad (2.39)$$

Le rendement électrique $\eta_{élec}$ est égal au rapport entre l'énergie électrique produite pendant la durée de la simulation et l'énergie aérodynamique maximale disponible.

$$\eta_{élec} = \frac{\int_{t_{ini}}^{t_{fin}} P_{élec} dt}{\int_{t_{ini}}^{t_{fin}} P_{a_opt} dt} \quad (2.40)$$

2.5.4 Résultats et discussion

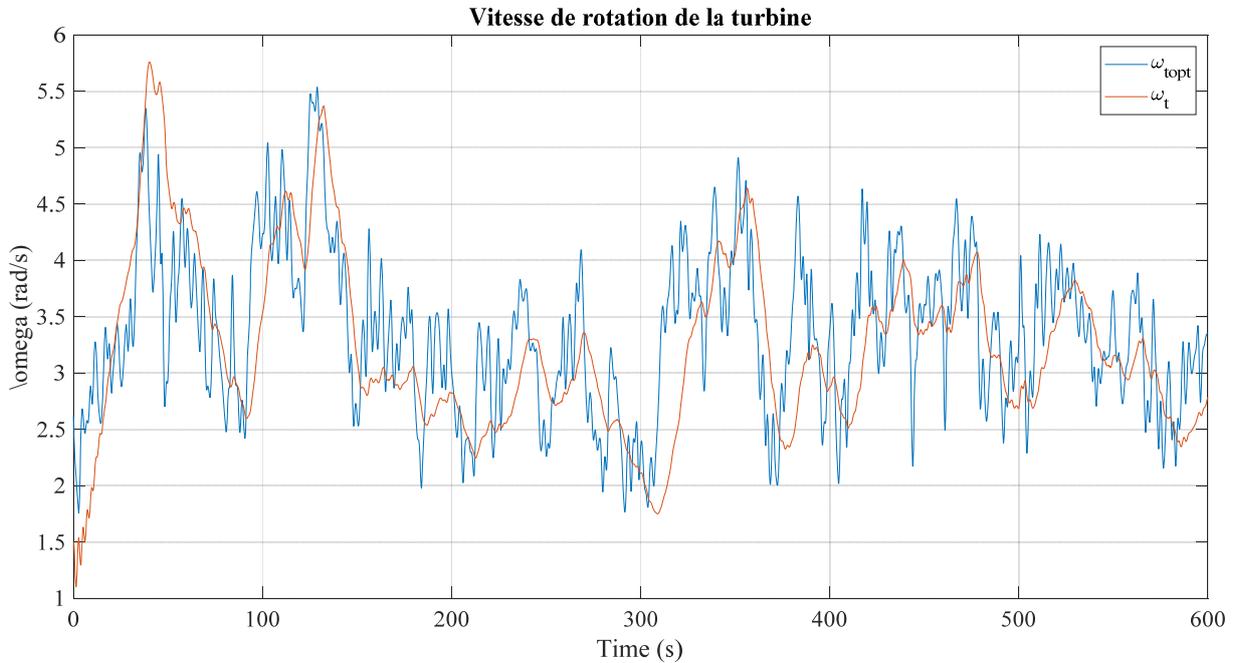


Figure 2. 8 Vitesse de rotation de la turbine ω_t et la vitesse de référence ω_{t_ref} (rad/sec)

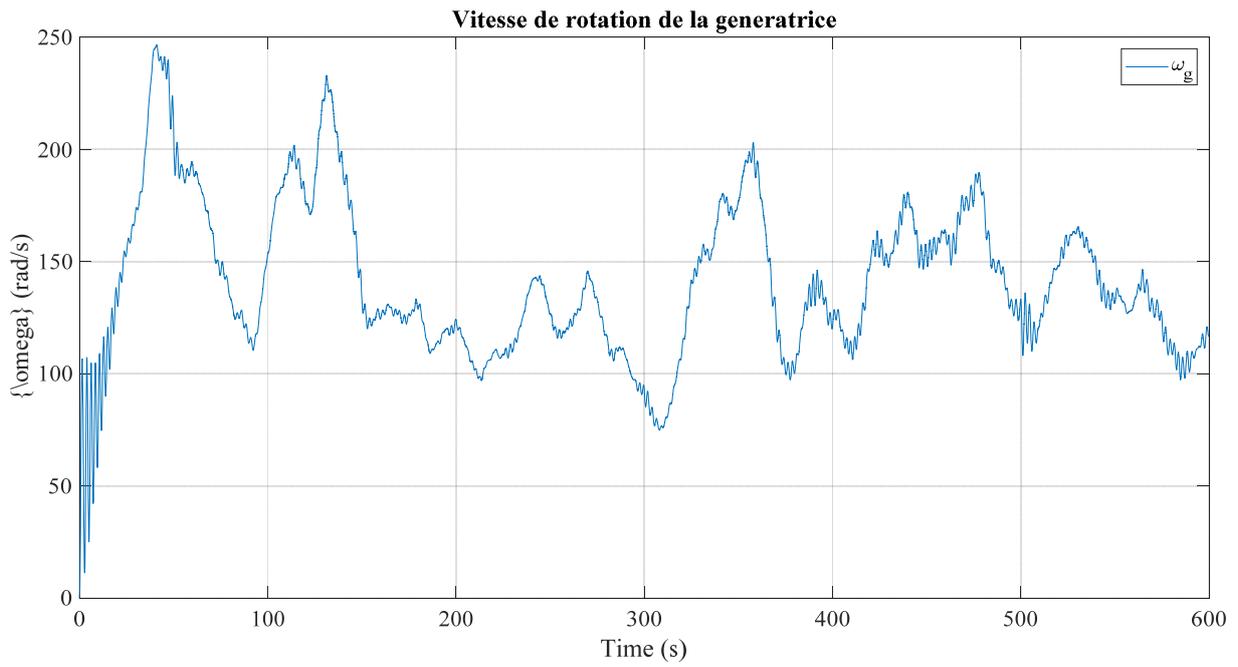


Figure 2. 9 Vitesse de rotation de la génératrice ω_g

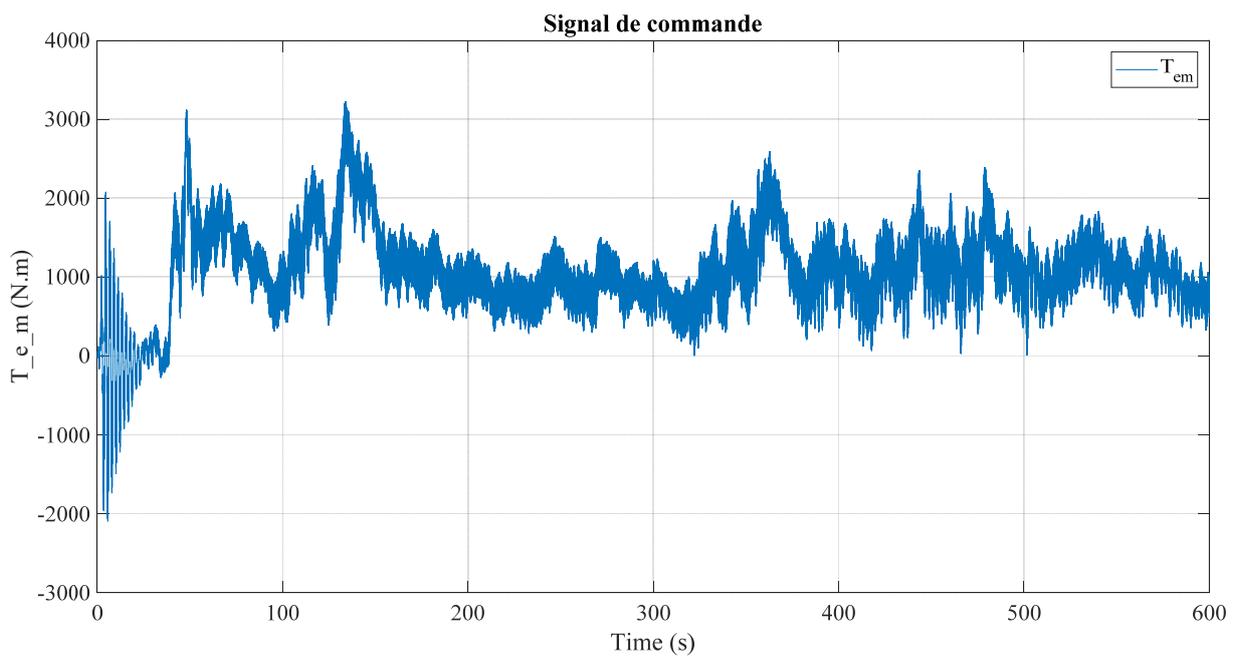


Figure 2. 10 Signal de commande (Couple électromagnétique)

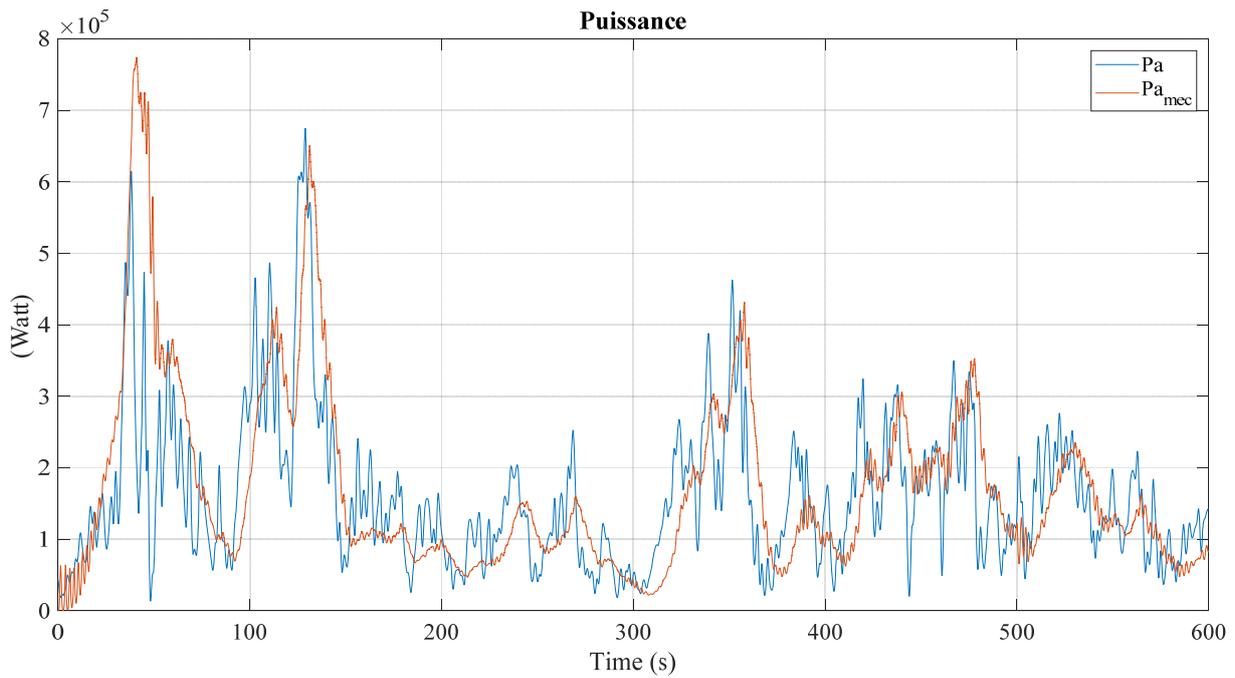


Figure 2. 11 Puissance électrique P_{elec} et la puissance aérodynamique P_a (watts)

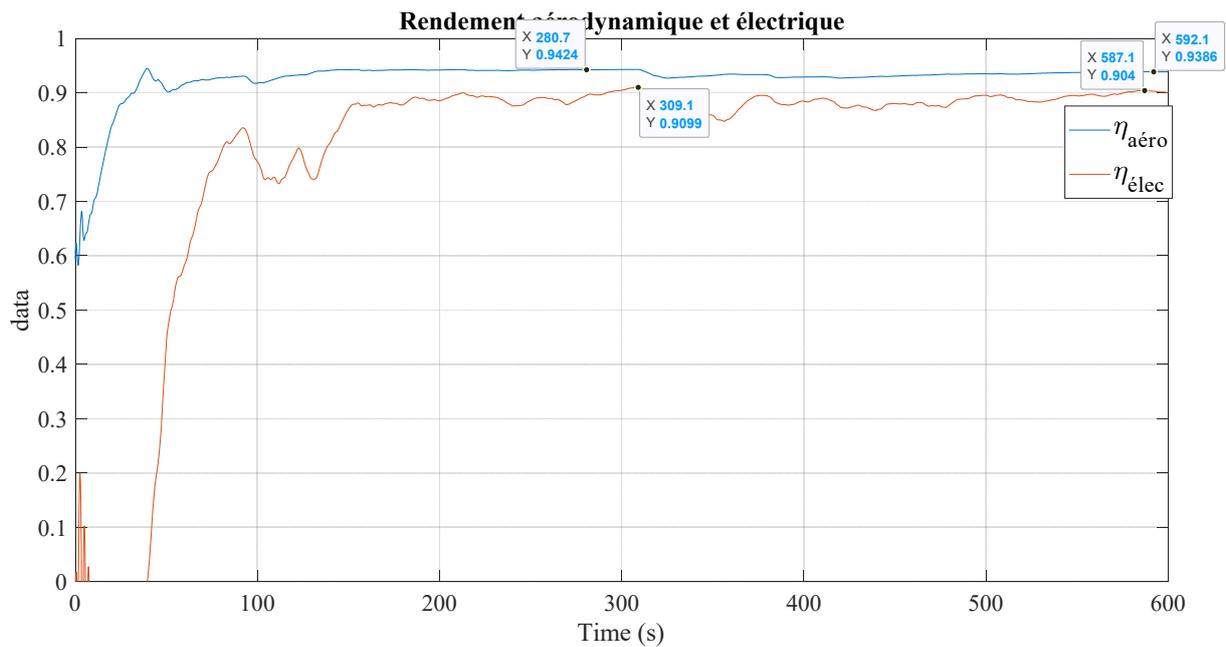


Figure 2. 12 Rendement aérodynamique et rendement électrique

Comme nous travaillons dans le régime à vitesse variable qui correspond à un fonctionnement en dessous de la puissance nominale (zone II figure 2.1). L'énergie captée par le système représenté par le rendement aérodynamique et le rendement électrique, est un critère d'appréciation pertinent de l'efficacité énergétique, et c'est, le premier critère nous permettant de juger la qualité de la commande synthétisée :

- La commande que nous avons synthétisée assure un rendement aérodynamique $\eta_{aéro} = 94.24\%$ et un rendement électrique de $\eta_{aéro} = 90.99\%$ et cela malgré les variations paramétriques du modèle ce qui démontre sa robustesse.
- A $t = 300s$, l'instant d'introduction d'une perturbation sur le signal de commande, nous remarquons une baisse légère et momentanée du rendement, mais le système arrive malgré ça à revenir au même niveau de rendement à savoir $\eta_{aéro} = 93.86\%$ et $\eta_{aéro} = 90.40\%$. ce qui démontre sa robustesse vis-à-vis des perturbations.

Additivement, un autre critère important est la minimisation des efforts mécaniques sur les différentes parties de l'éolienne et la minimisation des efforts sur la commande, en outre le signal de commande appliqué ne doit pas dépasser une valeur maximale du couple est fixée à 162 kN.m / Ng . Afin que la vitesse de rotation ω_g soit inférieure à la vitesse de rotation nominale de la génératrice :

- Comme montré par la figure 2.10 le signal de commande ne dépasse la limite susmentionnée.

Les figures 2.8 montrent la poursuite de vitesse de référence pour ω_t ce qui assure une optimisation de la vitesse spécifique et le rendement aérodynamique, ainsi un rendement énergétique meilleur.

La commande a été choisie de telle sorte que ω_t suit l'allure de ω_{t_ref} et n'épouse pas exactement ça forme, vu que afin de garder la vitesse spécifique constante, la vitesse du rotor doit suivre exactement la turbulence du vent, ce qui nécessite une variation rapide et des amplitudes importantes de ω_t et par conséquent l'augmentation des efforts de commande et des charges subies par l'éolienne. Il est alors nécessaire de réaliser un compromis.

2.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une commande par mode glissant adaptative basée sur la théorie de Lyapunov pour atteindre l'objectif principal de la commande, dans la zone de

fonctionnement en dessous de la puissance nominale ; à savoir l'optimisation de l'extraction de l'énergie du vent tout en réduisant les charges subies par l'éolienne.

La commande élaborée assure une bonne robustesse et conduit à un bon rejet des perturbations, tout en assurant l'optimisation de la capture de l'énergie du vent.

Chapitre III

**COMMANDE ROBUSTE PAR MODE GLISSANT
AVEC GAIN ADAPTATIF D'UN SYSTEME
EOLIEN**

Chapitre 3 : Commande robuste par mode glissant avec gain adaptatif du système éolien

3.1 Introduction

La conception d'une commande par mode glissant nécessite une certaine connaissance sur les incertitudes du système, ce qui pourrait être, d'un point de vue pratique, une tâche difficile. Il s'ensuit souvent l'utilisation, de gain excessif qui aggrave le principal inconvénient de la commande en mode glissant, le phénomène du chattering.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté une commande par mode glissant adaptatif basée sur la théorie de Lyapunov, une autre approche consiste à utiliser le mode glissant à gain adaptatif, le but étant d'assurer une adaptation dynamique du gain de commande aussi faible que possible tout en étant suffisant pour contrecarrer les incertitudes et les perturbations. Cette méthode est basée sur les travaux de [1] et de [2]

Dans ce chapitre nous allons synthétiser une commande basée sur ce principe pour la commande de l'éolienne, afin d'optimiser ses performances et son rendement par rapport à l'énergie cinétique du vent captée par la turbine, tout en respectant ses limites physiques.

3.2 Formulation du problème

Considérons le système non linéaire incertain :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u \\ x(0) = x_0, t \geq 0 \end{cases} \quad (3.1)$$

Tel que

- $x(t)$ est le vecteur d'état et u est le signal de commande à synthétiser.
- Les fonctions $f(x)$ et $g(x)$ sont supposées être des fonctions continues, incertaines et bornées.

Notre objectif est de forcer une fonction continue $s(x, t)$ (surface de glissement) à 0.

Supposons que $s(x, t)$ admet un degré relatif égal à 1, par rapport au signal de commande. Alors sa dérivée s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned}
 \dot{s}(x, t) &= \left(\frac{\partial s(x, t)}{\partial x} \right)^T \dot{x} + \frac{\partial s(x, t)}{\partial t} \\
 &= \frac{\partial s(x, t)}{\partial t} + \left(\frac{\partial s(x, t)}{\partial x} \right)^T f(x) + \left(\frac{\partial s(x, t)}{\partial x} \right)^T g(x)u \\
 &= \Psi(x, t) + \Gamma(x, t) u
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

Avec :

$$\Psi(x, t) = \frac{\partial s(x, t)}{\partial t} + \left(\frac{\partial s(x, t)}{\partial x} \right)^T f(x) \tag{3.3}$$

$$\Gamma(x, t) = \left(\frac{\partial s(x, t)}{\partial x} \right)^T g(x) \tag{3.4}$$

Les fonctions $\Psi(x, t)$ et $\Gamma(x, t)$ sont supposées bornées, et satisfont les hypothèses suivantes :

$$|\Psi(x, t)| \leq \Psi_M, 0 < \Gamma_m \leq \Gamma(x, t) \leq \Gamma_M \tag{3.5}$$

Nous assumons que les constantes Ψ_M , Γ_m , et Γ_M existent mais ils sont inconnus.

Notre objectif est de synthétiser une commande à mode glissant $u(s, t)$ avec les même propriétés qu'une commande à mode glissant classique, à savoir robustesse et convergence en un temps fini, mais sans aucune information sur les incertitudes et les perturbation (qui apparaissent en $f(x)$), à part être bornés. En outre cela va nous permettre d'assurer une stabilité globale pour le système en boucle fermé.

Pour cela nous avons besoin de définir le mode glissant idéal et le mode glissant réel.

Définition 3.1 [18] On dit qu'il existe un régime glissant idéal sur s si :

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} \dot{s} < 0 \text{ et } \lim_{s \rightarrow 0^-} \dot{s} > 0$$

Dans les applications réelles, le mode glissant idéal comme définit dans 3.1 ne peut être réalisé. Ce qui nous amène à définir le mode glissant réel

Définition 3.2 [1] On dit que la variable de glissement $s(x, t)$ est une variable de glissement réel, si (avec $\delta > 0$)

$$S^* = \{x \in \mathcal{X} \mid |s| < \delta\} \tag{3.6}$$

Comme traditionnellement pour la théorie de la commande par mode glissant considérons la commande discontinue $u = u(s, t)$ à l'instant t :

$$u(s, t) = -K(t) \text{sign}(s) \quad (3.7)$$

Avec

$$\text{sign}(s) = \begin{cases} -1, & s < 0 \\ 1, & s > 0 \\ \in [-1,1] & s = 0 \end{cases} \quad (3.8)$$

3.3 L'algorithme d'adaptation

Nous définissons le gain $K(t)$ comme suit :

- Si $|s(x(t), t)| > \varepsilon > 0$, alors $K(t)$ est la solution de l'équation différentielle :

$$\dot{K}(t) = \bar{K}_1 |s(x(t), t)| \quad (3.9)$$

Avec $\bar{K}_1 > 0$ et $K(0) > 0$

- Si $|s(x(t), t)| \leq \varepsilon$ alors $K(t)$ devient

$$\begin{aligned} K(t) &= \bar{K}_2 |\eta(t)| + \bar{K}_3 \\ \tau \dot{\eta}(t) + \eta(t) &= \text{sign}(s(x(t), t)) \end{aligned} \quad (3.10)$$

Avec $\bar{K}_2 = K(t^*)$, $\bar{K}_3 > 0$ et $\tau > 0$, ou τ est la valeur la plus grande de t tel que

$$|s(x(t^* - 0), t^* - 0)| > \varepsilon, |s(x(t^*), t^*)| \leq \varepsilon \quad (3.11)$$

Évidemment, ce contrôleur est basé sur le concept de mode glissant réel. En supposant que :

$$|s(x(0), 0)| > \varepsilon$$

3.4 Fonctionnement de l'algorithme d'adaptation

la loi de commande mode glissant adaptative (3.9) - (3.10) fonctionne comme suit :

- Le gain $K(t)$ augmente en raison de la loi d'adaptation (3.9) jusqu'à une valeur suffisamment grande pour contrecarrer l'incertitude bornée avec des bornes inconnues dans (3.1) jusqu'à ce que le mode glissant réel démarre. Notons l'instant où le mode glissant réel démarre pour la première fois comme t_1 .
- Quand le mode glissant a commencé c.à.d :

$$|s(x(t), t)| \leq \varepsilon \quad (3.12)$$

A partir de $t = t_1$, $K(t)$ suit la loi d'adaptation de gain (3.10). Ensuite, le gain $K(t)$ est adapté par (3.10) avec $\bar{K}_2 = K(t_1)$. A noter que cette stratégie va permettre de diminuer le gain puis de l'ajuster par rapport aux incertitudes et perturbations actuelles.

- Cependant, si les incertitudes ou des perturbations dépassent la valeur $\bar{K}_2 = K(t_1)$, alors le mode de glissement réel sera détruit et nous obtenons, à nouveau :

$$|s(x(t), t)| > \varepsilon \quad (3.13)$$

- Ensuite, l'adaptation de gain se produira conformément à (3.9). Le gain $K(t)$ va augmenter jusqu'à ce que le mode glissant se reproduise à l'instant t_2 .

Remarque 3.1 : la démonstration de l'établissement d'un glissant réel dans un temps fini pour cet algorithme d'adaptation est donné dans [1]

3.5 Résultats de simulation

3.5.1 Présence des incertitudes paramétriques et de perturbation

Afin de pouvoir comparer entre les deux stratégies de contrôle développées dans ce travail, les mêmes conditions de simulation utilisées dans le chapitre 2 sont adoptées, à savoir :

- le paramètre n_g est conçu avec une incertitude de 10%.
- le paramètre K_{I_s} est conçu avec une incertitude de 20%
- le paramètre B_{I_s} avec une incertitude de 50%
- Ainsi qu'une perturbation sur le signal de commande sous forme d'un saut a été introduite à partir de $t = 300s$.
- Le profil du vent utilisé est un tableau de valeurs d'une moyenne de 7 m/sec, d'une période de 10 min et d'une intensité de turbulence de 25%, la Figure 2. 7 , illustre ce profil en fonction du temps.

3.5.2 Résultats et discussion

Ci-dessous les résultats de simulation de la commande par mode glissant à gain adaptatif basée sur l'algorithme que nous avons présenté.

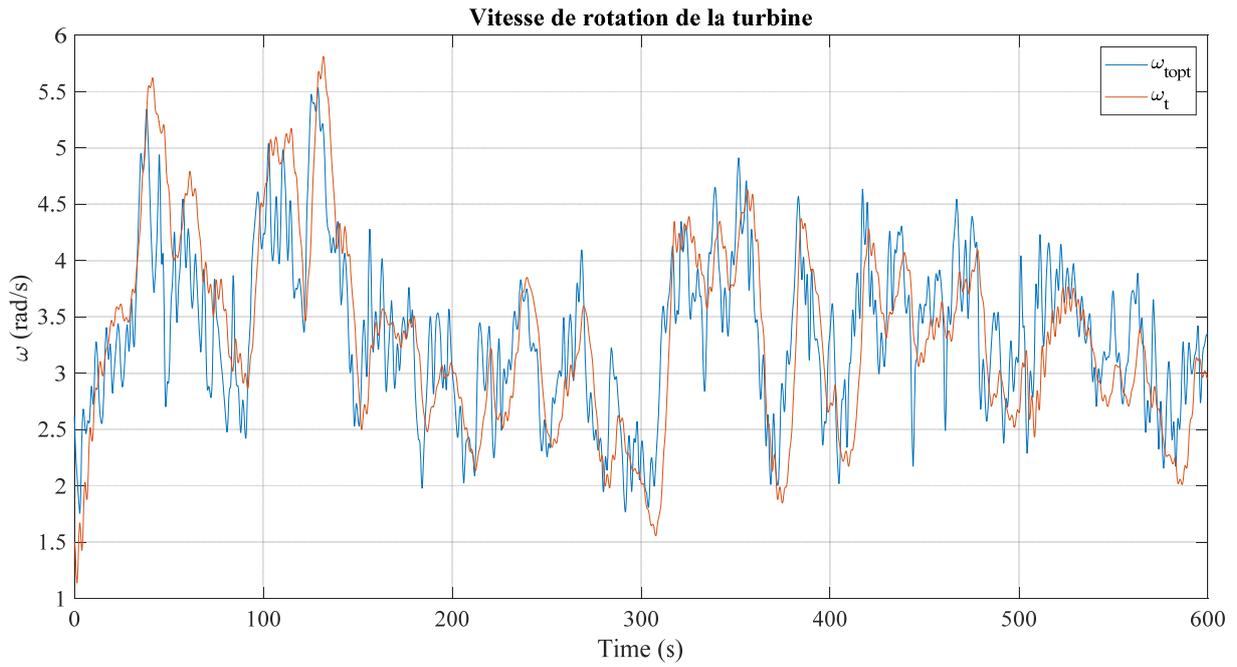


Figure 3. 1 Vitesse de rotation de la turbine ω_t et la vitesse de référence ω_{t_ref} (rad/sec)

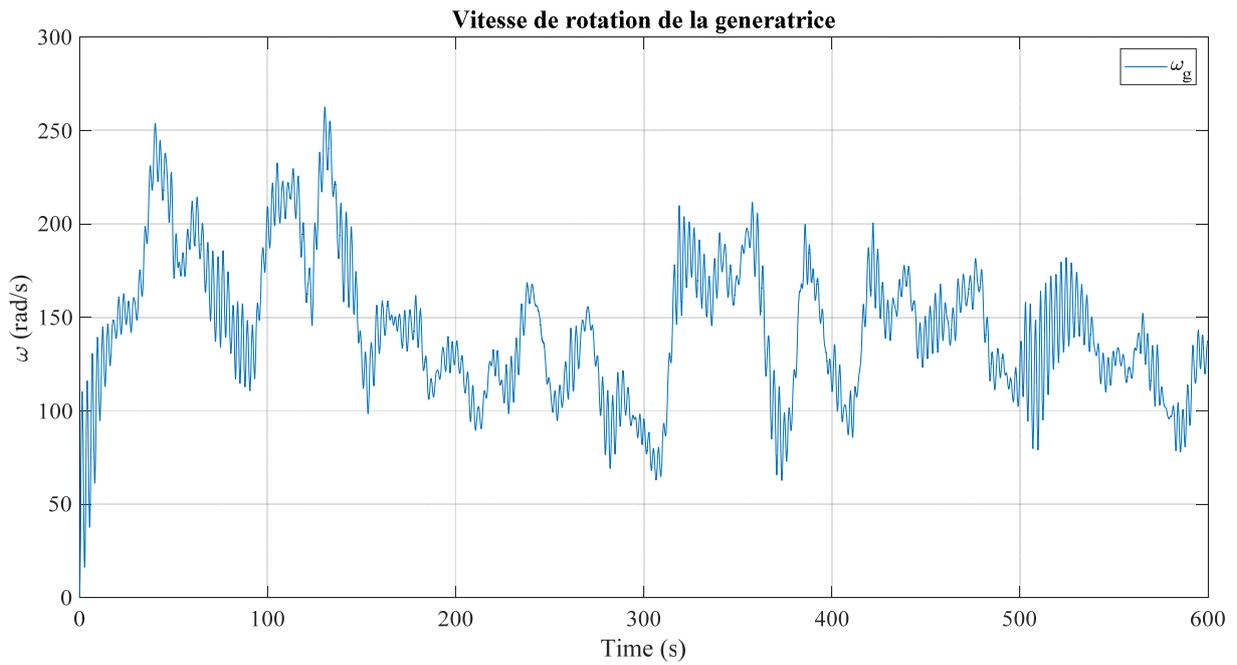


Figure 3. 2 Vitesse de rotation de la génératrice ω_g

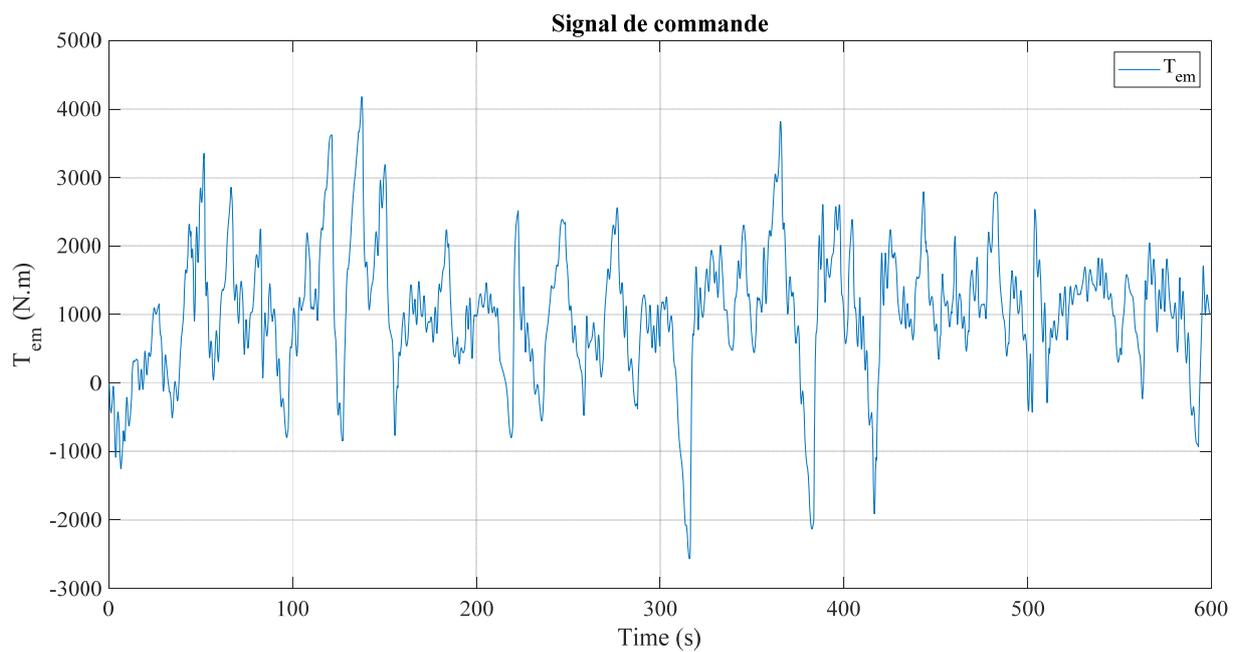


Figure 3. 3 Signal de commande (Couple électromagnétique)

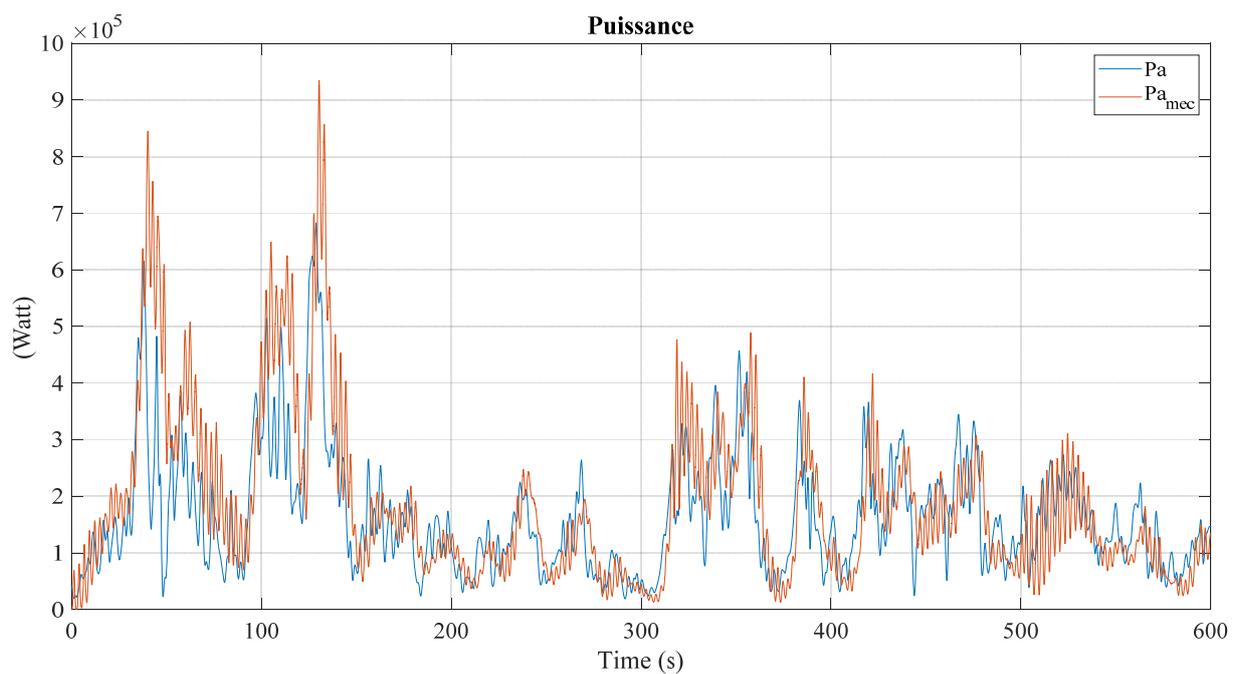


Figure 3. 4 Puissance électrique P_{elec} et la puissance aérodynamique P_a (watts)

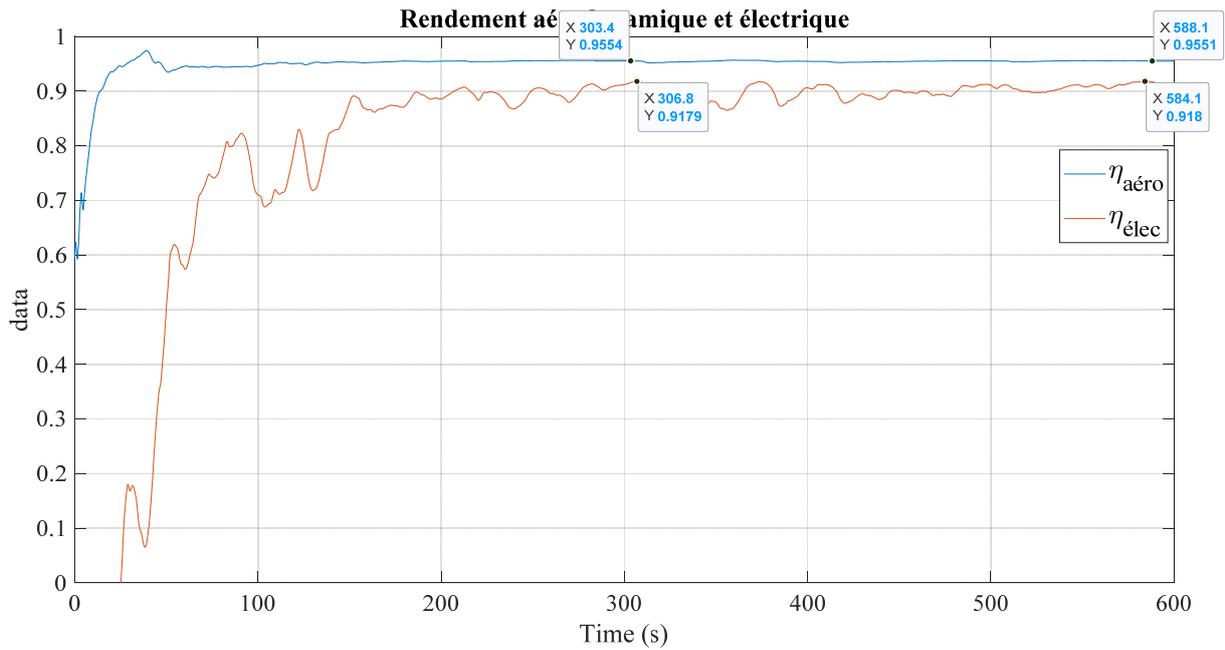


Figure 3. 5 Rendement aérodynamique et rendement électrique

Comme pour la commande élaborée dans le chapitre 2, le critère d'appréciation le plus pertinent pour l'appréciation de la qualité de la commande élaborée dans ce chapitre est le rendement aérodynamique et le rendement électrique :

- La commande que nous avons synthétisée assure un rendement aérodynamique $\eta_{aéro} = 95.54\%$ et un rendement électrique de $\eta_{élec} = 91.79\%$ et cela malgré les variations paramétriques du modèle ce qui démontre sa robustesse.
- A $t = 300s$, l'instant d'introduction d'une perturbation sur le signal de commande, nous remarquons une baisse légère et momentanée du rendement, mais le système arrive malgré ça à revenir au même niveau de rendement à savoir $\eta_{aéro} = 95.51\%$ et $\eta_{élec} = 91.8\%$. ce qui démontre sa robustesse vis-à-vis des perturbations.

Additivement, un autre critère important est la minimisation des efforts mécaniques sur les différentes parties de l'éolienne et la minimisation des efforts sur la commande :

- Comme montré par la figure 3.3 le signal de commande ne dépasse la limite autorisée.

Les figures 3.1 montrent la poursuite de vitesse de référence pour ω_t ce qui assure une optimisation de la vitesse spécifique et le rendement aérodynamique, ainsi un rendement énergétique meilleur.

En comparant la deuxième commande par rapport à la première nous remarquons :

- Une légère amélioration du rendement aérodynamique et du rendement électrique (+1% pour chaque)
- Le signal de commande de la deuxième commande est plus énergétique que celui de la première $Std (T_{em})_{1\text{ère commande}} = 537 N.m < Std (T_{em})_{2\text{ème commande}} = 935 N.m$ néanmoins, malgré que la deuxième commande semble plus énergétique, ses variations sont plus douces mais avec d'amplitude supérieure → bonne élimination du chattering mais au prix de commande d'amplitude plus grande.
- Les deux commandes assurent une robustesse et conduisent au rejet des perturbations, tout en assurant l'optimisation de la capture de l'énergie du vent.

3.6 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une commande par mode glissant à gain adaptatif qui a permis l'optimisation de l'extraction de l'énergie du vent tout en assurant une bonne robustesse et qui a conduit au rejet des perturbations.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion Générale

Les objectifs principaux fixés dans le cadre de ce mémoire sont atteints, ils consistaient à élaborer une stratégie de commande basée sur la commande par mode glissant adaptative permettant de répondre aux exigences spécifiques de la zone de fonctionnement II des éoliennes à vitesse variable. Où le but est d'optimiser le rendement énergétique du système et donc extraire un maximum d'énergie éolienne, tout en minimisant l'effort sur la commande. Ainsi cette dernière doit être robuste en présence des incertitudes paramétriques, et des perturbations.

Afin d'y arriver, nous avons présenté deux approches, la première consistant à élaborer une commande adaptative basée sur la théorie de Lyapunov, afin d'avoir une commande équivalente la plus fidèle au modèle du système ce qui permet l'utilisation d'un petit gain pour la partie discontinue du mode glissant et de profiter de sa robustesse tout en minimisant le phénomène chattering.

La deuxième approche consiste à utiliser le mode glissant à gain adaptatif, le but étant d'assurer une adaptation dynamique du gain de commande aussi faible que possible tout en étant suffisante pour contrecarrer les incertitudes et les perturbations.

Les deux approches nous ont assuré une bonne robustesse et conduisent au rejet des perturbations, tout en assurant l'objectif d'optimisation de la capture de l'énergie du vent.

En guise de perspectives, plusieurs axes de recherche peuvent être entrepris. Il serait intéressant d'explorer d'autre algorithmes pour le mode glissant à gain adaptatif dont la littérature est riche et de s'intéresser au mode glissant d'ordre supérieur, tout en considérant la synthèse d'estimateur pour la vitesse du vent dont la mesure réelle est difficile.

Il serait aussi, important d'étendre la commande de l'éolienne sur les autres zones de fonctionnement, en prenant en considération les différents mécanismes de contrôle à exemple du contrôle de l'angle de calage (pitch control) et le contrôle de la nacelle (yaw control). D'autre part, il faut envisager une commande sur la partie électrique de l'éolienne pour garantir une

production optimale et d'assurer un comportement stable en présence de perturbations dans tous les systèmes de l'éolienne

ANNEXE

Annexe A : Paramètres de l'éolienne CART

A.1 Éolienne CART

L'éolienne CART (Controls Advanced Research Turbine) est installée sur le site du NWTC (National Wind Technology Center). Elle est à axe horizontal avec un mât de 35 m et possède deux pales. Les paramètres du modèle ainsi que les différentes caractéristiques de la CART utilisés sont issus de [9]

A.2 Paramètres de l'éolienne à axe horizontal

Rayon du rotor	21.65 m
Diamètre du rotor	43.3 m
Hauteur du moyeu	36.6 m
Puissance électrique nominale	600 kW
Vitesse nominale du rotor	42 tr/min
Couple maximal du générateur	162 kN.m
Vitesse maximale du rotor	53 tr/min
Maximum de l'angle de calage	30°
Minimum de l'angle de calage	-5°

Tableau A-1 Caractéristiques de l'éolienne CART

A.3 Paramètres du modèle a deux masses

Paramètre	Signification
$R = 21.65 \text{ m}$	Rayon du rotor
$\rho = 1.29 \text{ kg/m}^3$	Masse volumique de l'air
$J_r = 3.25 \cdot 10^5 \text{ kg.m}^2$	Inertie des masses du côté du rotor
$J_g = 34.4 \text{ kg.m}^2$	Inertie des masses du côté de la génératrice
$K_r = 27.36 \text{ N.m/rad/s}$	Coefficient de frottements visqueux externes du rotor
$B_g = 0.2 \text{ N.m/rad/s}$	Coefficient de frottements visqueux externes de la génératrice
$K_{ls} = 9500 \text{ N.m/rad/s}$	Coefficient de frottements visqueux internes de l'arbre lent
$B_{ls} = 2.691 \cdot 10^5 \text{ N.m/rad}$	Coefficient de torsion de l'arbre lent
$n_g = 43.165$	Rapport de transmission du multiplicateur

Tableau A-2 Paramètres du modèle a deux masses

A.4 Coefficients de puissance de l'éolienne CART

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \left(\frac{c_2}{\lambda_i} - c_3 \beta - c_4 \right) e^{\left(\frac{-c_5}{\lambda_i} \right)} + c_6 \lambda$$

c_1	0.5109
c_2	116
c_3	0.4
c_4	5
c_5	21
c_6	0.0068

Tableau A-3 Coefficients de puissance de l'éolienne CART

BIBLIOGRAPHIE

- [1] F. Plestan, Y. Shtessel, V. Brégeault, A. Poznyak, «New methodologies for adaptive sliding mode control,» *International Journal of Control*, 2011.
- [2] X. Liu, «Contribution to adaptative sliding mode, fault tolerant control and control allocation of wind turbine system,» l'Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, thèse de Doctorat, 2018.
- [3] F. Poitiers, *Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne (machine asynchrone à cage autonome, machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau)*, Thèse de Doctorat de génie électrique, Université Nantes, 2003.
- [4] R. Redjem, *Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne*, thèse de magistère en Electrotechnique, Université Mentouri de Constantine, 2009.
- [5] D. L. Gouiri, *Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations*, Paris: édition EYROLLES, 1982.
- [6] A. Boyette, *Contrôle, commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne*, thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1, 2006.
- [7] F. Z Tria., *Contribution à l'étude et à la commande d'un système éolien*, Biskra: Doctorat en sciences, Université Mohamed Khider, 2018.
- [8] L. L. Freris, *Wind Energy Conversion Systems*, UK: Prentice Hall International, 1999.
- [9] B. Boukhzar, *Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable*, Paris: Docteurat en Sciences l'Université Paris XI Orsay, 2006.
- [10] H. Camblong, *Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éoliennes dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable*, Bordeaux: Thèse de Doctorat, ENSAM , 2004.

- [11] J. David, R. Winkelmann and S. H., «Control design and performance analysis of a 6MW wind turbine generator,» *IEEE Transaction on PAS*, vol. 102(5), p. 1340–1347, 1983.
- [12] E. Xu, S. Abdin and W., «Control design and dynamic performance analysis of a wind turbine-induction generator unit,» *IEEE Transaction on Energy Conversion*, vol. 15(1), p. 91–96, March 2000.
- [13] S. El Aimani, *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau moyenne tension*, Lille, France: Thèse de Doctorat, Ecole Centrale de Lille-Université des Sciences et Technologies de Lille 1, 2004.
- [14] S. Heier, *Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems*, John Wiley & Sons Ltd, 1998.
- [15] H. Vihriälä, *Permanent magnet generator in wind power plants*, Master's thesis, Tampere University of technology, 1998.
- [16] X. Ma, *Adaptive Extremum Control And Wind Turbine Control*, Danemark: PhD thesis, 1997.
- [17] J. J. E. Slotine, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall, Inc., 1991.
- [18] A.S Poznyak, and V.I. Utkin, «Adaptive Sliding Mode Control,» chez *Advances in Sliding Mode Control, Concept, Theory and Implementation*, LNCIS, Springer, 2013.
- [19] J. J. E. Slotine, «sliding controller design for nonlinear system» *I. J. C*, vol. 4, pp. 421-434, 1984.
- [20] H. Boussadia, *Application de la technique Backstepping Adaptatif pour la commande d'attitude des satellites*, USTO, Memoire de Magister, 2016.

ملخص

يركز هذا العمل على تطوير إستراتيجية تحكم، بناءً على طريقة التحكم عن طريق النمط الانزلاقي المتكيف لتلبية المتطلبات المحددة لمنطقة التشغيل II لتوربينات الرياح متغيرة السرعة. حيث الهدف هو تحسين كفاءة الطاقة للنظام وبالتالي استخراج أقصى قدر من طاقة الرياح، مع تقليل الجهد المبذول في التحكم. من أجل تحقيق ذلك، تم تطوير نهجين، الأول يتمثل في التحكم عن طريق نمط انزلاقي تكيفي مبني على أساس نظرية Lyapunov ، من أجل الحصول على تحكم مكافئ ، أكثر إخلاصاً لنموذج النظام. الطريقة الثانية هي استخدام نمط انزلاقي مع ثابت كسب متكيف. الهدف منه ضمان التكيف الديناميكي لمكسب عنصر التحكم عند أدنى مستوى ممكن مع ضمان كونه كافياً لمواجهة حالات عدم اليقين في نموذج النظام والاضطرابات.

الكلمات المفتاح: توربينات الرياح متغيرة السرعة، التحكم عن طريق النمط الانزلاقي المتكيف، تحكم قوي نمط انزلاقي مع ثابت كسب متكيف.

Résumé :

Ce travail porte sur l'élaboration d'une stratégie de commande, basée sur la commande par mode glissant adaptative, permettant de répondre aux exigences spécifiques de la zone de fonctionnement II, des éoliennes à vitesse variable. Où le but est d'optimiser le rendement énergétique du système et donc extraire un maximum d'énergie éolienne, tout en minimisant l'effort sur la commande. Afin d'y arriver, deux approches sont élaborées. La première consiste en une commande par mode glissant adaptative basée sur la théorie de Lyapunov, afin d'avoir la commande équivalente, la plus fidèle au modèle du système. La deuxième approche consiste à utiliser le mode glissant à gain adaptatif. Le but étant d'assurer une adaptation dynamique du gain de la commande aussi faible que possible tout en étant suffisant pour contrecarrer les incertitudes et les perturbations.

Mots clés : Eolienne à vitesse variable, commande mode glissant adaptative, commande robuste, commande mode glissant à gain adaptative.

Abstract

This work focuses on the development of a control strategy, based on adaptive sliding mode control to meet the specific requirements of operating zone II of variable speed wind turbines. Where the goal is to optimize the energy efficiency of the system and therefore extract a maximum of wind energy, while minimizing the effort on the control. In order to achieve this, two approaches are developed, the first consists of an adaptive sliding mode control based on Lyapunov theory, in order to have an equivalent control most faithful to the model of the system. The second approach consists of using the sliding mode with adaptive gain, the aim being to ensure a dynamical adaptation of the control gain in order to be as small as possible whereas sufficient to counteract the uncertainties/perturbations.

Key words : Variable speed wind turbine, adaptive sliding control, robust control, adaptive gain.