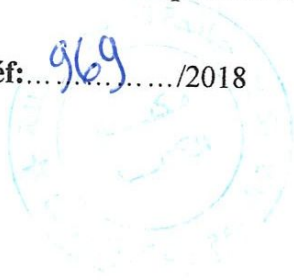


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8 Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf: 969...../2018



MEMOIRE

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

Domaine: Sciences et Technologie

Filière: Automatique

Spécialité: Automatique et Informatique Industrielle

Par: BOUSSOUFA Newfel et KHELAIPIA Soufiane

Thème

Commande Linéaire Quadratique (LQ) d'une éolienne à Modèle Souple

Soutenue publiquement, le 24/06 /2018, devant le jury composé par:

Mr. BABOURI Abdesselam	Professeur	Université 8 mai 1945	Président
Mr. SEBBAGH Abdennour	MCB	Université 8 mai 1945	Encadreur
Mr. MENDACI Soufiane	MCA	Université 8 mai 1945	Examineur
Mme. BOUBIDI Assia	MAA	Université 8 mai 1945	Examineur

Année Universitaire: 2017/2018

Dédicaces



Je voudrais dédie ce modeste travail

A mes très chers parent et qui m'ont tant soutenu et encouragé dans tout les domaines et surtout pour réaliser ce mémoire.

A mon binôme **KHELAIFIA SOUFIANE.**

A mon frère **Anouar**

A mes oncles et mes tantes.

A mes cousins **KHALIL, AKREM.**

A toute la famille **BOUSSOUFA.**

A mes amis **Seif, Kamer, Achref, Aymen, Haythem, Wail....**

A mon professeur : **Sebbagh Abdennour.**

A la promotion 2013/2018 : **AUTOMATIQUE.**

NEWFEL



Dédicaces

Je voudrais dédie ce modeste travail

A mes très chers parent **MOUHEMED (الله)** et **BAHEDJA** qui m'ont tant soutenu et encouragé dans tout les domaines et surtout pour réaliser ce mémoire.

A mon binôme **BOUSSOUFA NEWFEL.**

A mes frères **Chokri, Abd elkarim, Nedjoua, Bilel.**

A mes oncles et mes tantes.

A mes cousins.

A toute la famille **Khelaifia.**

A mes amis **Alaa Eddine, Zakaria, Monaime, Saif, Amar, Choucib, Malek, Hassane,.....**

A mon professeur : **sebbagh abdenmour.**

A la promotion 2013/2018 : **AUTOMATIQUE.**



SOUFIANE

Remerciement

Je remercie en premier lieu dieu qui m'a donné ce bien pour que
je vive ce jour et la patience pour terminer ce travail.

Je tien remercier infiniment Monsieur **Sebgha Abdennour**
d'avoir voulu diriger ce travail ainsi que pour leur l'aide, leur
disponibilité, ses conseils qu'il n'a cessé de me donner, tout au long
de la réalisation de ce mémoire.

Je tiens, également, à remercier tout particulièrement les
membres de jury qui me font l'honneur d'animer ma soutenance.

Enfin, je remercier tous ceux qui ont contribué de près ou de loin
à ma formation et l'élaboration de ce modeste mémoire.

Résumé

Tout d'abord, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrices.

Ensuite, nous avons modélisé l'ensemble mécanique notamment la turbine, le multiplicateur, l'arbre mécanique en prenant en compte les caractéristiques aérodynamiques.

Après ça, on a parlé sur commande quadratique linéaire (LQ) qui sera utilisée pour commander notre système éolien, ainsi que son extension au cas stochastique à savoir la commande linéaire gaussien LQG.

Finalement, nous voulons commander notre système éolien à savoir le modèle souple (à deux masses) soit, à vent faible ou à vent fort, en utilisant la commande linéaire quadratique (LQ). Nous envisageons donc de développer une loi de commande permettant une régulation optimale de la vitesse de rotation de l'éolienne et de la puissance électrique générée autour de leurs valeurs nominales.

ملخص

في بادئ الأمر، نحن مهتمون بشكل رئيسي في أنواع مختلفة من توربينات الرياح مع دساتيرها ومبادئ التشغيل، وكذلك في دراسة الطاقة الحركية للرياح وأنواع مختلفة من المولدات. بعد ذلك، قمنا بتصميم النموذج الميكانيكي بما في ذلك التوربينات، المضاعف، المحور الميكانيكي مع الأخذ بعين الاعتبار الخصائص الديناميكية الهوائية. بالإضافة إلى ذلك، تحدثنا عن الأمر التربيعي الخطي (LQ) الذي سيتم استخدامه للتحكم في نظام الرياح لدينا، بالإضافة إلى امتداده إلى الحالة العشوائية وهي الأمر الخطي الغوسي LQG. وأخيراً، قمنا بالتحكم في نظام الرياح لدينا، أي النموذج المرن (مع جعبتين) إما مع الرياح الضعيفة أو الرياح القوية، وذلك باستخدام التحكم التربيعي الخطي (LQ). لذلك نخطط لتطوير قانون تحكم يسمح بتنظيم مثالي لسرعة دوران توربين الرياح والطاقة الكهربائية المتولدة حول قيمها الاسمية.

Liste des symboles

R	Rayon du rotor
V	Vitesse du vent
P	Masse volumique de l'air
S	la surface balayée par le rotor
P_a	Puissance aérodynamique
P_{aopt}	Puissance aérodynamique optimale
η_{aero}	Rendement aérodynamique
T_a	Couple aérodynamique
T_{ahs}	Couple aérodynamique ramené sur l'arbre rapide
T_{aopt}	Couple aérodynamique optimal
P_e	Puissance électrique
H_{elec}	Rendement électrique
C_p	Coefficient de puissance
C_q	Coefficient de couple
v_m	Vitesse moyenne du vent
I	Intensité de la turbulence
C_{pmax}	Limite de Betz du coefficient de puissance
C_{popt}	Coefficient de puissance optimal
λ	Vitesse spécifique
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimale
β	Angle de calage des pales
β_{opt}	Angle de calage optimal
ω_t	Vitesse angulaire du rotor
ω_{ls}	Vitesse angulaire de la génératrice
ω_{hs}	Vitesse angulaire de l'arbre lent
n_g	Vitesse angulaire de l'arbre rapide
T_{ls}	Rapport de transmission du multiplicateur
T_{hs}	Couple de l'arbre lent
T_{em}	Couple de l'arbre rapide
T_g	Couple électromagnétique de la génératrice
J_r	Couple de la génératrice ramené sur l'arbre lent
J_g	Inertie des masses du côté du rotor
J_t	Inertie des masses du côté de la génératrice
J_{ths}	Inertie de la turbine ramenée sur l'arbre lent
K_{ls}	Inertie de la turbine ramenée sur l'arbre rapide
K_r	Coefficient de frottements visqueux internes de l'arbre lent
K_g	Coefficient de frottements visqueux externes du rotor
K_t	Coefficient de frottements visqueux externes de la génératrice
K_{ths}	Coefficient de frottements externes de la turbine sur l'arbre lent
B_{ls}	Coefficient de frottements externes de la turbine sur l'arbre rapide
ω_{topt}	Coefficient de torsion de l'arbre lent
ω_{tref}	Vitesse angulaire optimale du rotor
ω_{gref}	Vitesse angulaire de référence du rotor
\dot{x}	Vitesse angulaire de référence de la génératrice
\hat{x}	Dérivée temporelle de la grandeur x
	Estimée de la grandeur x

Sommaire

Introduction générale	01
Chapitre I : Etat de l'art sur les éoliennes	
I.1 Introduction	03
I.2 Définition de l'énergie éolienne	03
I.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne	04
I.4 Les différents types des turbines éoliennes	04
I.4.1 Les éoliennes à axe vertical	05
I.4.2 Les éoliennes à axe horizontal	05
I.5 Principaux composants d'une éolienne	06
I.5.1 Le mât	07
I.5.2 La nacelle	07
I.5.3 Le rotor	08
I.5.3.1 Les rotors à vitesse fixe	08
I.5.3.2 Les rotors à vitesse variable	08
I.6 Protection contre la corrosion	08
I.7 Energie cinétique du vent	09
I.8 Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne.	12
I.8.1 Types de machines électriques	13
I.8.1.1 Générateur synchrone	13
I.8.1.2 Générateur asynchrone	14
I.8.1.2.1 Machine asynchrone à cage d'écureuil	14
I.8.1.2.2 Machine asynchrone à double alimentation	17
a - Structure des machines asynchrones à double alimentation	18
a.1- Double alimentation par le stator	19
a.2- Double alimentation par le stator et le rotor	20
b- Applications des machines asynchrones à double alimentation	22
c- Fonctionnement en génératrice à vitesse variable	22
d- Fonctionnement à vitesse fixe	24
e- Intérêt de la MADA	24
I.9 Conclusion	25
Chapitre II : Modélisation de l'éolienne	
II.1 Introduction	26
II.2 Modélisation du vent	26
II.3 Modélisation de la turbine éolienne	28
II.3.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	28
II.4 Multiplicateur	30
II.5 Modélisation du système électrique	30
II.6 Modélisation du sous-système aérodynamique	31
II.6.1 Modèle de transmission rigide	32
II.6.2 Modèle de transmission souple	33
II.7 Linéarisation du modèle de l'éolienne	34
II.7.1 A vents faibles	36
II.7.2 A vents forts	37
II.7 Conclusion	38
Chapitre III : Commande linéaire quadratique LQ	
III.1 Introduction	39
III.2 Objectifs de commande	39
III.3 Configuration de la commande	40

Sommaire

III.4 Commande Linéaire (LQ)	41
III.4.1. Introduction	41
III.4.2 Commande linéaire quadratique en temps continu	42
a. cas de l'horizon fini	42
b. cas de l'horizon infini	44
III.4.3 Commande linéaire quadratique en temps discret	44
a. cas de l'horizon fini	44
b. cas de l'horizon infini	45
III.5. Commande Linéaire Gaussienne (LQG)	46
III.5.1. Introduction	46
III.5.2. Formulation du problème et principe de séparation	46
III.5.3. Filtre de Kalman et commande stochastique	47
a. Position de problème	47
b. Filtre de Kalman	48
III.5.4. Commande linéaire quadratique gaussien (LQG)	51
III.7 Conclusion	52
Chapitre IV : Commande LQ de l'éolienne : simulation	
IV.1 Introduction	53
IV.2. Synthèse d'une loi de commande optimale quadratique	53
IV.3. Critère quadratique	53
IV.4. Commande LQ d'une éolienne à vent faible	54
IV.5. Commande LQ d'une éolienne à vent fort	60
IV.6. Conclusion	66
Conclusion Générale	67

Sommaire des Figures

Figure 1.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent	04
Figure 1.2: éolienne à axe vertical	05
Figure 1.3: éolienne à axe horizontal	06
Figure 1.4: éléments constituant une éolienne	07
Figure 1.5: tube de courant autour d'une éolienne	09
Figure 1.6: coefficient de puissance	10
Figure 1.7: coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes	11
Figure 1.8: Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent	12
Figure 1.9: Machine synchrone connectée directement au réseau	13
Figure 1.10: Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance	14
Figure 1.11: Caractéristique couple vitesse d'une machine asynchrone à deux paires des pôles	15
Figure 1.12: Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau	16
Figure 1.13: Eolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance	16
Figure 1.14: Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA	12
Figure 1.15: Cascade hypo synchrone	19
Figure 1.16: Machine asynchrone à double bobinage statorique.	19
Figure 1.17: Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor	21
Figure 1.18: Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices	21
Figure 1.19: Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation	23
Figure 2.1: Schéma blocs de la construction de la vitesse du vent en un point	27
Figure 2.2: Génération de vents de différentes natures par la méthode de Nichita	27
Figure 2.3: Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne	28
Figure 2.4 : Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine éolienne	29
Figure 2.5 : Courbes de c_p en fonction de λ et β	31
Figure 2.6: Schéma blocs du modèle rigide de l'éolienne	32
Figure 2.7: Modèle à deux masses de l'éolienne	33
Figure 2.8: Schéma blocs du modèle souple de l'éolienne	34
Figure 2.9. Schéma du dispositif d'entraînement à deux masses	34
Figure 3.1 : Exemple du coefficient de puissance pour $\beta = \beta_{opt}$	40
Figure 3.2: Niveaux de commande d'une éolienne à vitesse variable et calage variable	41
Figure 3.3: Structure de la commande linéaire par retour d'état	42
Figure 3.4: Reconstructeur d'état	47
Figure 3.5: Commande LQG (Observateur de Kalman+LQ)	47
Figure 3.6: Structure du filtre de Kalman	49
Figure 3.7: Structure de la commande LQG	52
Figure 4.1: commande linéaire quadratique LQ d'une éolienne	54
Figure 4.2: Commande $u(k)=T_{em}$ (couple électromagnétique de la génératrice) (N.m)	56
Figure 4.3: Vitesse de rotation de la turbine autour de la vitesse nominale (Tr/m)	57
Figure 4.4: Vitesse de rotation de la génératrice (Tr/m)	57
Figure 4.5: Couple de l'arbre lent (Tr/m)	58
Figure 4.6: Vitesse du vent autour de la vitesse nominale (m/s)	58
Figure 4.7: Puissance électrique générée par la génératrice (W)	59
Figure 4.8: Puissance aérodynamique relative à la vitesse du vent généré (W)	59
Figure 4.9: Vitesse du vent autour de la vitesse nominale (m/s)	62
Figure 4.10: Vitesse de rotation de la turbine autour de la vitesse nominale (Tr/m)	63
Figure 4.11: La commande $u_1(k) = \beta$ angle de calage autour de sa valeur nominale (°degré)	63

Figure 4.12: La commande $u_2(k)=T_{em}$ couple électromagnétique de la génératrice (N.m)	64
Figure 4.13: Vitesse de rotation de la génératrice (Tr/m)	64
Figure 4.14: Couple de l'arbre lent (Tr/m)	65
Figure 4.15: Puissance électrique générée par la génératrice (W)	65
Figure 4.16: Puissance aérodynamique relative à la vitesse du vent généré (W)	66

Introduction Générale

Introduction Générale

Depuis le Sommet de la Terre de Rio de Janeiro 1992, le monde a commencé à prendre conscience des risques qui menacent la planète et du dérèglement climatique comme conséquence de la consommation croissante des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon,...). Ceci a amené les décideurs politiques des principaux pays industrialisés et des pays émergents à favoriser la mise en place de nouveaux moyens de production d'énergie plus propres et respectueux à l'environnement. La solution s'avérait donc dans l'utilisation des énergies renouvelables : vent, soleil, biomasse,...

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. En effet, c'est le réchauffement inégalement réparti à la surface de la planète qui provoque les vents. Cette énergie propre et de moins en moins coûteuse avec les progrès technologiques, permet une production électrique décentralisée faiblement émettrice de gaz à effet de serre. Tous ces facteurs ont fait de l'éolien, l'énergie renouvelable la plus prometteuse, ce qui explique l'engouement fort pour cette technologie dans le monde. Ainsi, durant les dernières décennies, l'utilisation des méthodes alternatives de production d'électricité, et notamment l'énergie éolienne, ont connu une forte et rapide croissance à travers le monde. Par conséquent, l'énergie éolienne raccordée au réseau a augmenté, et devrait être un contributeur important à la production d'électricité, avec un taux de pénétration pouvant atteindre 50%, dans certains pays comme le Danemark, la Norvège, la Suède et l'Allemagne [5].

Pour encourager le développement de cette nouvelle forme de production énergétique, plusieurs facilités ont été mises en œuvre par les pays pour la connexion au réseau. Mais avec le développement de cette nouvelle forme de production, certains risques majeurs sont apparus, [6]. En effet, étant donné la nature aléatoire du vent, de fortes variations de la puissance fournie par les éoliennes peuvent être produites et risquent donc de provoquer des variations de la fréquence et de tension du réseau. En outre, aux conditions limites, lorsque le vent dépasse une certaine valeur, l'éolienne se déconnecte du réseau, faisant passer sa puissance injectée de sa valeur maximale à 0 en un temps extrêmement court créant ainsi une instabilité de la production éolienne de puissance.

Afin d'augmenter le taux de pénétration des systèmes éoliens dans les réseaux électriques, notamment les réseaux insulaires, en réduisant le coût de revient de l'énergie électrique produite par ces systèmes, et en améliorant sa qualité, plusieurs travaux de recherches se sont orientés vers l'amélioration du système de commande des éoliennes et le développement de différents types de stratégies de commande. Les correcteurs classiques de types PI/ PID considèrent deux boucles différentes: une pour la puissance et l'autre pour la vitesse de la turbine [7]. Comme le système éolien est non linéaire et que la vitesse du vent est variable, des techniques de linéarisation et

d'adaptation de gain ont été proposées pour réguler le système autour d'un point de fonctionnement bien spécifique [10], [11]. Cependant, ces correcteurs classiques implantés aujourd'hui sur la quasi-totalité des éoliennes commercialisées et conçus généralement à partir de modèles relativement simples, permettent en général de satisfaire un seul objectif de commande qui est une bonne conversion de l'énergie éolienne. Il est alors nécessaire de mentionner que nous avons affaire ici à un système MIMO où les différentes variables sont couplées. Ainsi, il sera plus adéquat d'utiliser un correcteur linéaire quadratique (LQ) qui tient compte de toutes les variables d'état [12]. Dans [8], [9], cette solution est bien exploitée surtout du point de vue de la qualité de la puissance électrique générée à partir d'une comparaison de simulation entre un correcteur traditionnel de type PI ou PID et une commande LQ notamment en zones de vitesses de vent élevées. Le principe est basé sur la minimisation d'un critère (une fonction coût) quadratique donné, qui assure un meilleur compromis entre de bonnes performances sur les états (ou les sorties) du système d'une part, et une économie d'énergie sur les signaux de commande d'autre part. Les lois de commande linéaires quadratiques, basées sur une structure de commande par retour d'état, permettent d'atteindre des objectifs assurant l'optimisation du fonctionnement de l'éolienne.

Les objectifs de la loi de commande d'une éolienne à vitesse variable reposent sur les trois principaux points suivants [13] :

- Génération de la puissance maximale en dessous de la puissance nominale, en d'autres termes à vents faibles .
- Maintenir une qualité de puissance satisfaisante au dessus de la puissance nominale (à vents forts)
- Minimiser les efforts subis par le rotor, les pales et le dispositif d'entraînement .

Pour les éoliennes à vitesse variable et calage variables, le système de commande est d'une importance capitale pour tirer le meilleur profit de ces machines [14]. L'objectif de ce travail de mémoire est d'utiliser, pour les éoliennes à vitesse et calage variables, les deux entrées de commande que sont le couple de la génératrice et l'angle de calage des pales.

Ce mémoire est organisé comme suit :

Le premier chapitre est dédié à une présentation de l'état de l'art sur les éoliennes.

Nous nous intéressons dans le deuxième chapitre à la modélisation des éoliennes à modèle souple et à vitesse variable.

Le troisième chapitre sera consacré à l'étude de la commande linéaire quadratique LQ en continu et en discret.

L'application de la commande LQ sur le système éolien à modèle souple et à vitesse variable sans et avec angle de calage sera l'objet du quatrième chapitre, et on termine par une conclusion concernant la commande quadratique des éoliennes à vitesse variable.

Chapitre I :

Etat de l'art sur les éoliennes

I.1. Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes.

Une éolienne doit comporter:

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

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrices.

La dernière partie de ce chapitre illustre les différentes structures des machines asynchrones à double alimentation, leur principe de fonctionnement, leurs applications et leur intérêt [2].

I.2. Définition de l'énergie éolienne

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

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffusée et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif ; elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mats et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes des plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement de turbulences.

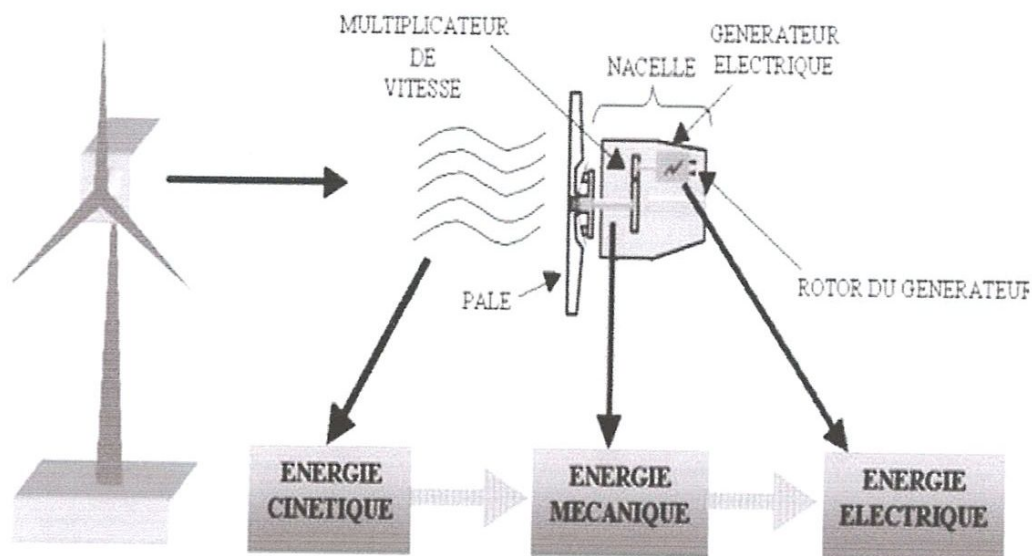


Figure 1.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent.

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

L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer. Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également en mer où la présence du vent est plus régulière.

I.3. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement de l'énergie éolienne est relativement simple: le vent fait tourner des pales qui font-elles même tourner le générateur de l'éolienne. A son tour le générateur transforme l'énergie mécanique du vent en énergie électrique de type éolienne.

L'électricité éolienne est dirigée vers le réseau électrique ou vers des batteries de stockage d'électricité éolienne

I.4. Les différents types de turbines éoliennes

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. On peut diviser les éoliennes en deux grandes familles:

I.4.1. Éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance, en revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal.



Figure 1.2. Éolienne à axe vertical.

I.4.2. Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrant de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol.

Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pales (les plus courantes) et les multi-pales.

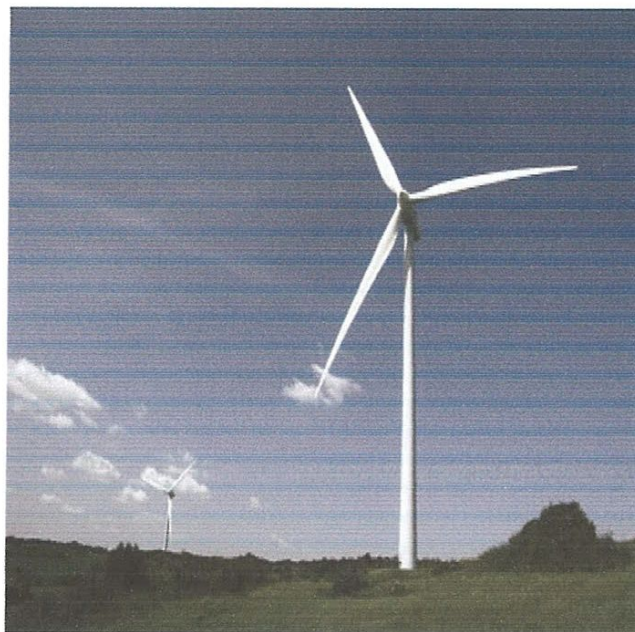


Figure 1.3. Éolienne à axe horizontal.

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale.

- Eoliennes de petite puissance : inférieur à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 kW à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieur à 1 MW.

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

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

I.5. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux.

- le mât
- la nacelle
- le rotor

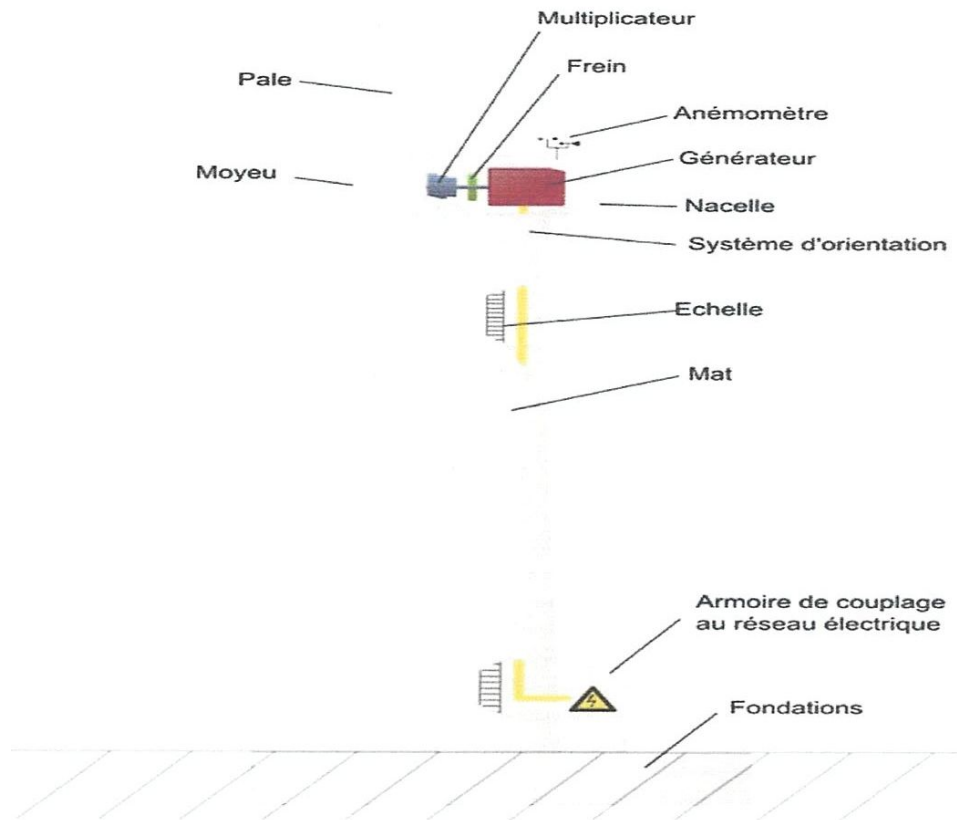


Figure 1.4. Eléments constituant une éolienne

I.5.1. Le mât

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique. Il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol.

I.5.2 La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur, système de commande, système de refroidissement, frein à disque différent du frein aérodynamique, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge.

Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent).

A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau, un anémomètre et le système électronique de gestion de l'éolienne.

I.5.3. Le rotor

Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

Il existe deux types de rotor, les rotors à vitesse fixe et les rotors à vitesse variable.

I.5.3.1 Les rotors à vitesse fixe

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

Ce système allie ainsi simplicité et faible coût.

I.5.3.2 Les rotors à vitesse variable

Sont souvent moins coûteux car le dispositif d'orientation des pales est simplifié. Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées (actuellement, les matériaux composites, la fibre de verre et plus récemment la fibre de carbone sont très utilisés car ils allient légèreté et bonne résistance mécanique).

I.6. Protection contre la corrosion

Les différentes parties de l'éolienne sont protégées contre la corrosion par un revêtement spécial à plusieurs couches. Les éléments particulièrement exposés aux intempéries, comme, par exemple le moyeu du rotor, sont galvanisés.

I.7. Energie cinétique du vent

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. A partir de l'énergie cinétique des particules de la masse d'air en mouvement passent par la surface active S de la voilure.

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure.1.5 sur lequel on a représenté la vitesse V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval en supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit :

$\frac{V_1+V_2}{2}$ La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est :

$$m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)}{2} \quad (1.1)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton).

$$P_m = \frac{m (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (1.2)$$

Soit en remplaçant m par son expression

$$P_m = \frac{\rho S (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (1.3)$$

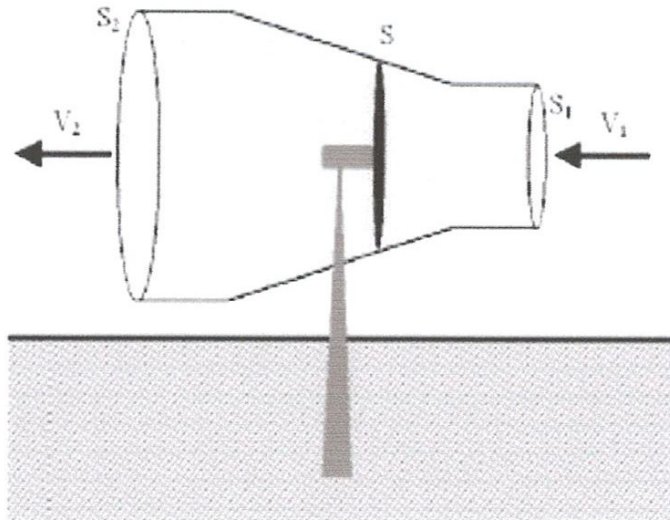


Figure 1.5. Tube de courant autour d'une éolienne.

Le vent théorique non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (1.4)$$

La relation entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2}) (1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} \quad (1.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (figure 1.6), on s'aperçoit que la ratio $\frac{P_m}{P_{mt}}$ appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $\frac{27}{16}$ 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 λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

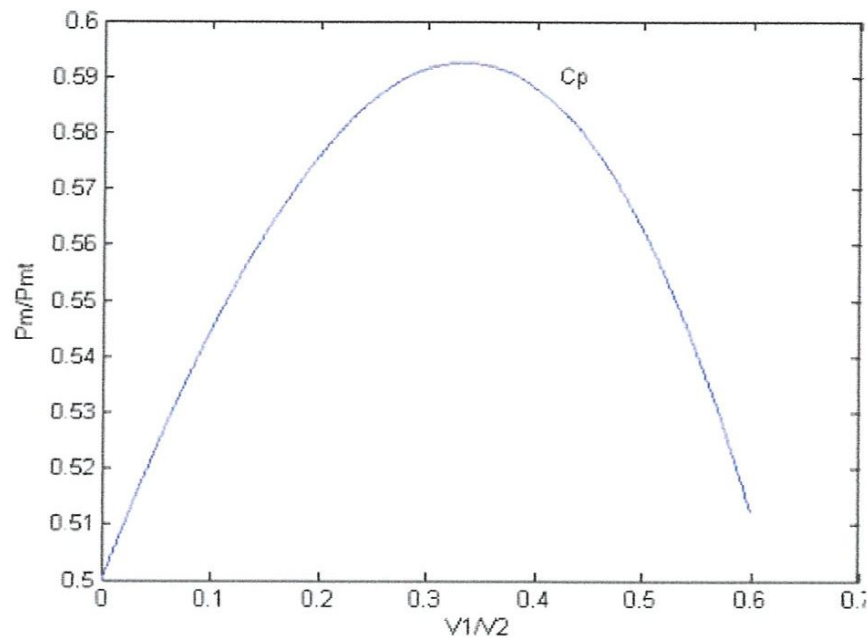


Figure 1.6. Coefficient de puissance

La figure 1.7. donne un aperçu sur les coefficients de puissance C_p habituels en fonction de la vitesse réduite λ pour différents types d'éoliennes.

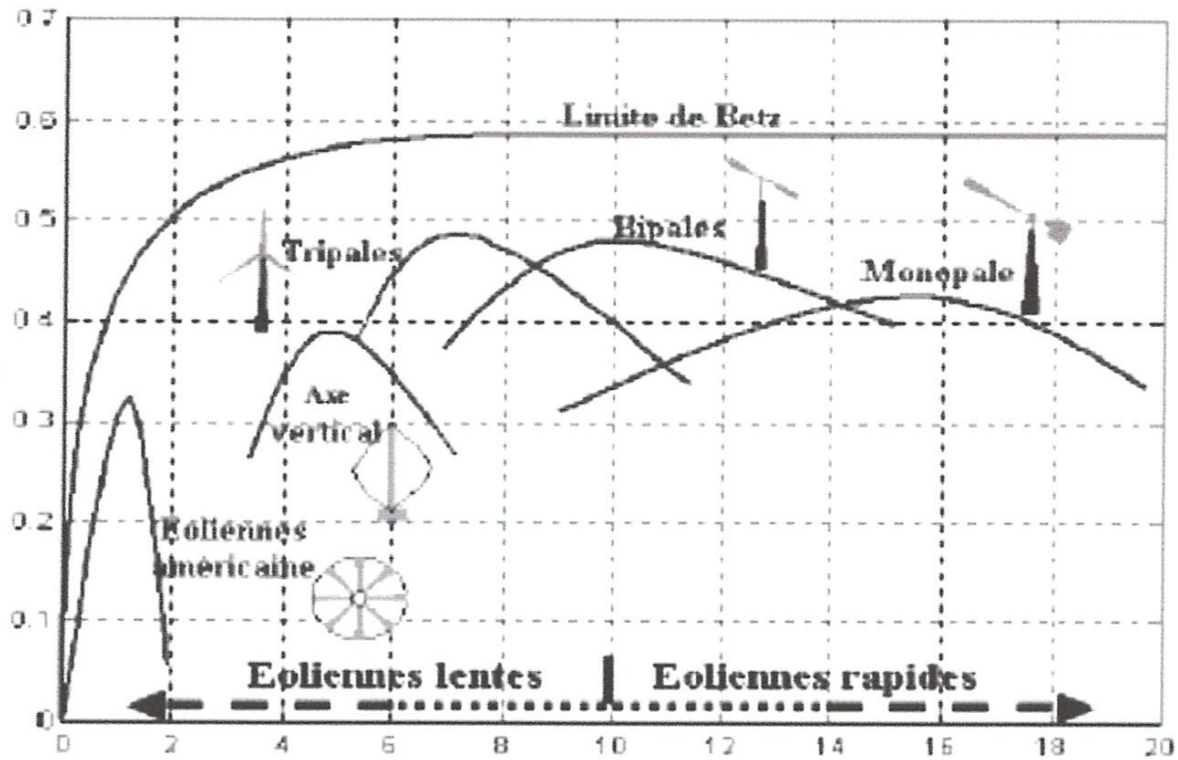


Figure 1.7. Coefficient de puissance pour les différents types d'éoliennes.

Selon la loi de Betz, la puissance maximale est :

$$P_{max} = \frac{16}{27} P_{mt} = 0.59 P_{mt} \quad (1.6)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde ; de cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_{mt}} = \frac{2 P_{max}}{\rho S V_1^3} = 0.59 \quad (1.7)$$

En combinant les équations (1.1), (1.4) et (1.5), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = C_p P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.8)$$

La figure 1.8 présente la puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent.

Avec :

$$\lambda = \frac{\omega_1 R}{V_1}$$

ω_1 : Vitesse de rotation avant multiplicateur de vitesse K

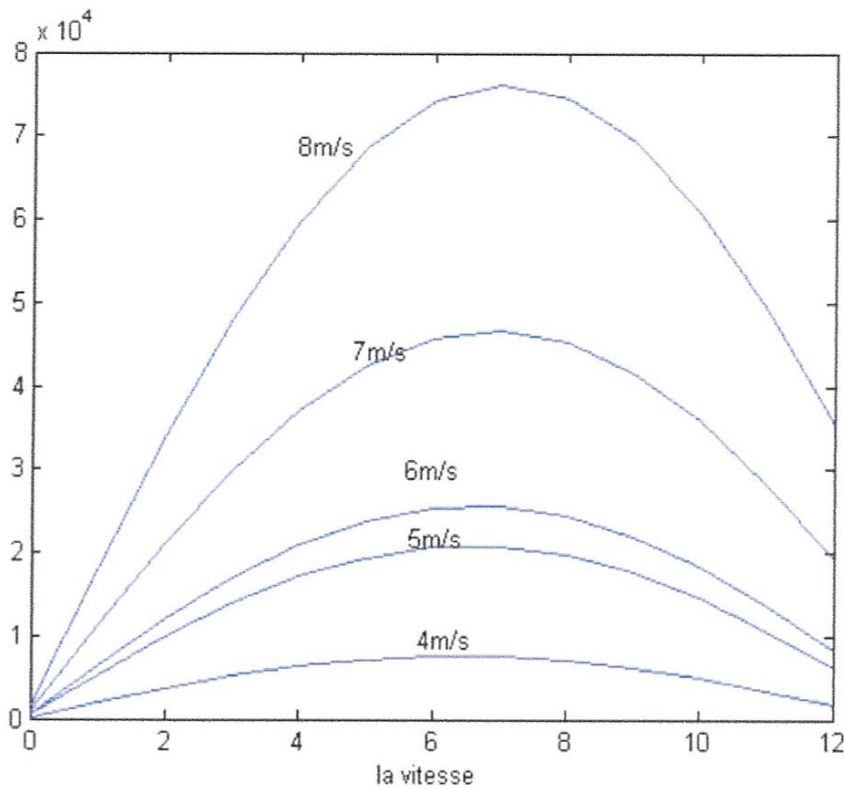


Figure 1.8. Puissance mécanique disponible en fonction de la vitesse du générateur pour différentes vitesses de vent.

La puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par:

$$P_{mg} = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\omega_2 R}{K V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (1.9)$$

Avec ω_2 : vitesse de rotation après multiplicateur.

I.8. Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'énergie éolienne.

Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques.

On décrit dans cette étude, les principales caractéristiques technologiques et concepts liés aux aérogénérateurs.

I.8.1. Types de machines électriques

Les deux types de machines électriques les plus utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones.

I.8.1.1. Générateur synchrone

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (figure 1.8), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés du réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (figure 1.9).

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine.

Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demande un important travail de maintenance.

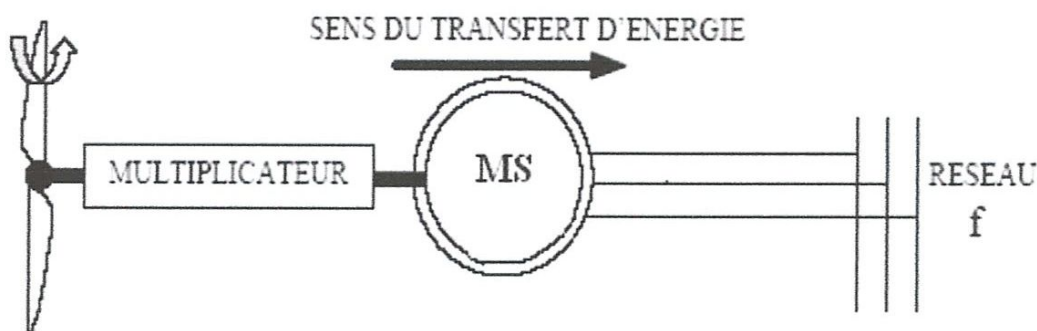


Figure 1.9. Machine synchrone connectée directement au réseau.

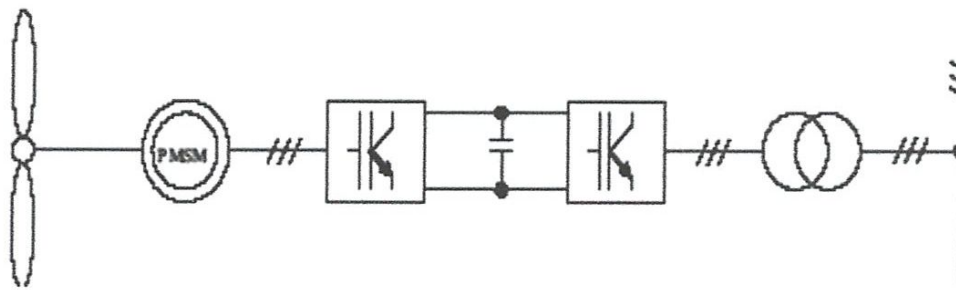


Figure 1.10. Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

I.8.1.2. Générateur asynchrone

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction.

Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

I.8.1.2.1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. Ainsi pour les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Or il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct.

Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais et collecteur ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

A titre d'exemple, la caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone à deux paires de pôles est donnée sur la figure (1.10).

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique suivante (Fig.1.10), la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau (figure 1.11).

La machine a un nombre de paire de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine.

Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la figure (1.11), qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne.

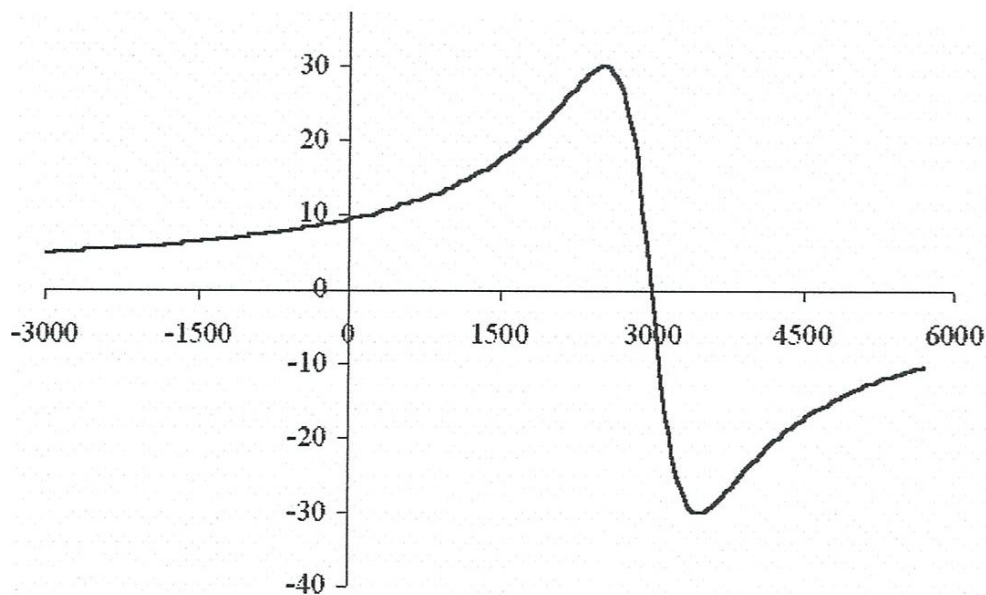


Figure 1.11. Caractéristique couple-vitesse d'une machine asynchrone à deux paires des pôles.

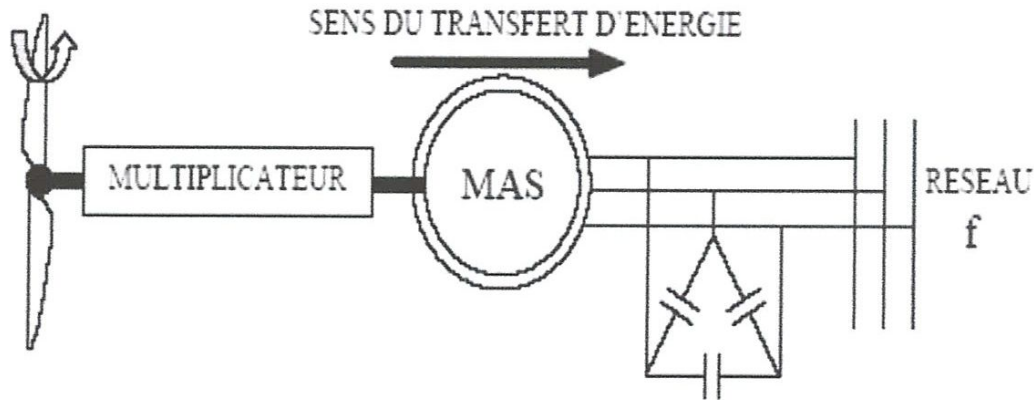


Figure 1.12. Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

Une autre solution consiste à utiliser la génératrice asynchrone triphasée car la connexion de l'éolienne au réseau se fait par l'intermédiaire d'un dispositif électronique de puissance (figure 1.12).

L'éolienne fonctionne à vitesse variable, le générateur produit un courant alternatif de fréquence variable. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par création d'un bus continu intermédiaire.

Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée.

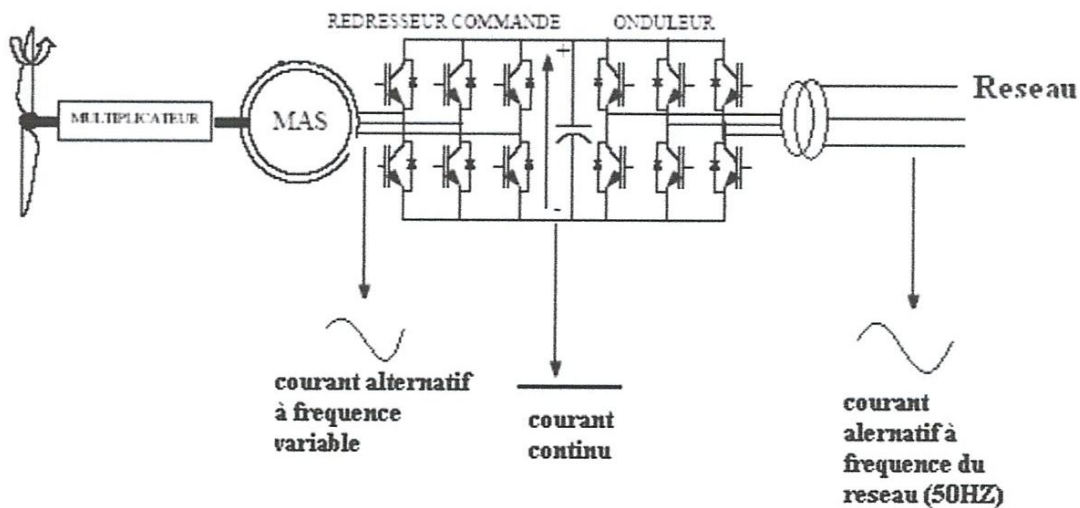


Figure 1.13. Éolienne connectée au réseau par l'intermédiaire de deux convertisseurs de puissance.

Les différents inconvénients de ce système sont le coût, la fiabilité de l'électronique de puissance et les pertes dans les convertisseurs de puissance. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice, ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes. Une étude économique approfondie est nécessaire avant d'adopter ce type d'installation.

Malgré sa simplicité et ses qualités de robustesse et son coût, la machine asynchrone à cage reste uniquement pour l'utilisation dans un système éolien, lorsque elle est directement connectée au réseau, la vitesse de rotation doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme. Cette restriction entraîne une efficacité réduite de l'éolienne aux vitesses de vent élevées.

Partant de ce constat, nous pouvons utiliser la machine asynchrone à double alimentation (MADA) comme alternative à la machine à cage.

I.8.1.2.2. Machine asynchrone à double alimentation

Avec les générateurs synchrones, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien à vitesse variable.

Le stator de la génératrice est directement couplé au réseau, le plus souvent par un transformateur.

A la place du rotor à cage d'écureuil ces machines ont un rotor bobiné dont le réglage électrique assure la variation du glissement.

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW repose sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor. Son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique. Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

Etant donné que la puissance rotorique qui transite est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance.

C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance. Une seconde raison est la possibilité de régler la tension au point de connexion où est injectée cette génératrice.

a - Structure des machines asynchrones à double alimentation

La machine asynchrone à double alimentation présente un stator analogue à celui des machines triphasés classiques (asynchrone à cage ou synchrone), constitué le plus souvent de tôles magnétiques empilées, munies d'encoches dans lesquelles viennent s'insérer les enroulements.

L'originalité de cette machine provient du fait que le rotor n'est plus une cage d'écureuil coulée dans les encoches d'un empilement de tôles, mais il est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités sont reliées à des bagues conductrices sur lesquelles viennent frotter des balais lorsque la machine tourne (figure 1.13).

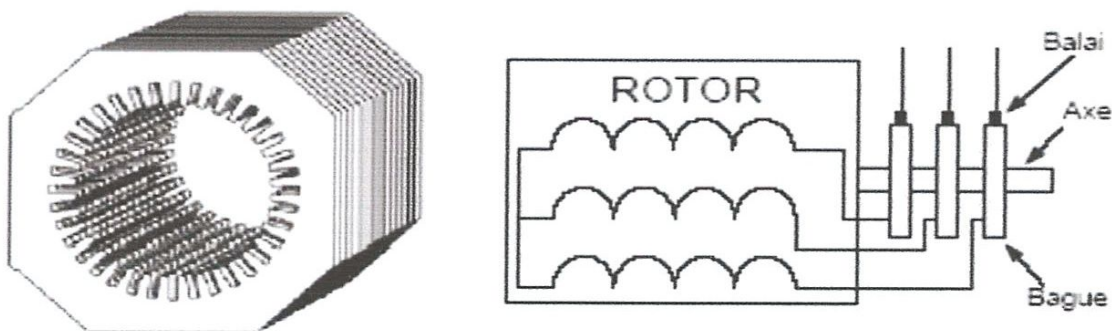


Figure 1.14. Structure du stator et des contacts rotoriques de la MADA.

En fonctionnement moteur, le premier intérêt de la machine asynchrone à rotor bobiné a été de pouvoir modifier les caractéristiques du bobinage rotorique de la machine, notamment en y connectant des rhéostats afin de limiter le courant et d'augmenter le couple durant le démarrage, ainsi que de pouvoir augmenter la plage de variation de la vitesse.

Plutôt que de dissiper l'énergie rotorique dans des résistances, l'adjonction d'un convertisseur entre le bobinage rotorique et le réseau permet de renvoyer cette énergie sur le réseau (énergie qui est normalement dissipée par effet joule dans les barres si la machine est à cage), le rendement de la machine est ainsi amélioré, c'est le principe de la cascade hypo synchrone.

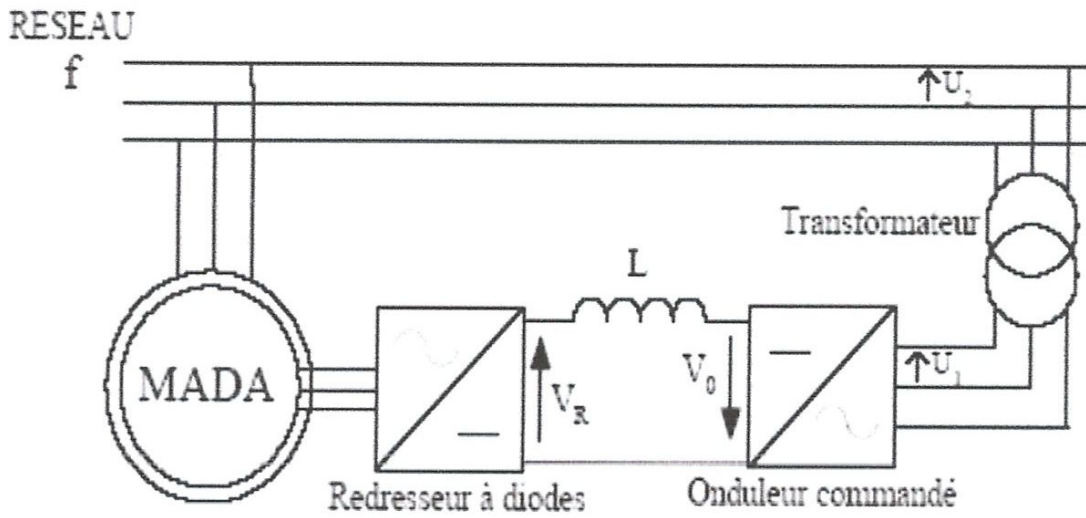


Figure 1.15. Cascade hypo synchrone

Il existe plusieurs technologies de la machine asynchrone à double alimentation et plusieurs dispositifs d'alimentation sont envisageables. Chaque structure a ses inconvénients et ses avantages.

a.1- Double alimentation par le stator

Pour réaliser une double alimentation par le stator, la machine asynchrone est munie de deux bobinages statoriques distincts (figure 1.15).

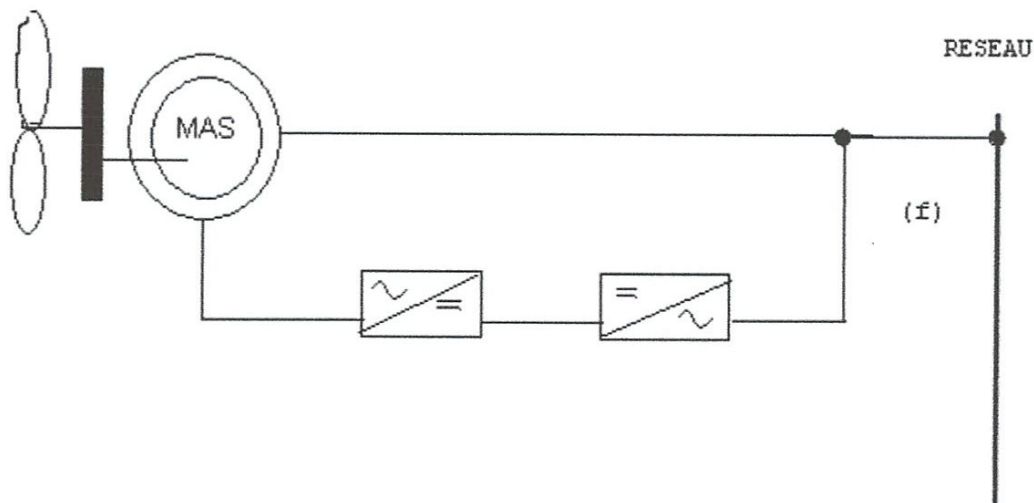


Figure 1.16. Machine asynchrone à double bobinage statorique

Un bobinage statorique de la génératrice est directement connecté au réseau et constitue le principal support de transmission de l'énergie générée. En agissant sur les tensions appliquées au second bobinage statorique, la vitesse de la génératrice est contrôlée autour d'un point de fonctionnement. Ce second enroulement sera appelé enroulement d'excitation.

Ce dernier possède un autre nombre de paire de pôles que celui du premier bobinage. L'enroulement d'excitation a donc une masse de cuivre généralement inférieure, car seule une partie du courant nominal de la génératrice y circule. Cet enroulement est connecté à des convertisseurs électroniques de puissance qui sont dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la turbine, le coût s'en trouve réduit.

Le convertisseur de puissance connecté à l'enroulement d'excitation permet de contrôler le flux statorique de la machine, le glissement peut être ainsi contrôlé et donc la vitesse de la génératrice. En augmentant le flux, les pertes au rotor augmentent, le glissement aussi. En diminuant le flux, les pertes diminuent et le glissement également. Un second convertisseur est nécessaire pour créer le bus continu. Comme les machines asynchrones ont un facteur de puissance faible à cause de l'inductance magnétisante, le convertisseur relié au réseau peut être commandé de manière à minimiser la puissance réactive. Comme pour toutes les machines asynchrones à double alimentation, la puissance nominale du convertisseur de puissance est proportionnelle au glissement maximum. Il a été vérifié que cette structure génère des puissances fluctuantes sur le réseau induisant ce qu'on appelle des flickers.

a.2- Double alimentation par le stator et le rotor

La structure de conversion est constituée d'une génératrice asynchrone à rotor bobiné entraînée par une turbine éolienne (figure 1.16).

Pour expliquer le principe de fonctionnement, on néglige toutes les pertes. En prenant en compte cette hypothèse, la puissance p est fournie au stator et traverse l'entrefer : une partie de cette puissance fournie, $(1 - g) p$, est retrouvée sous forme de puissance mécanique, le reste gp sort par les balais sous forme de grandeurs alternatives de fréquence $g \cdot f$. Ces grandeurs, de fréquence variable, sont transformées en énergie ayant la même fréquence que le réseau électrique, auquel elle est renvoyée, par l'intermédiaire du deuxième convertisseur. Ce réseau reçoit donc $(1 + g) p$, les bobinages du rotor sont donc accessibles grâce à un système de balais et de collecteurs (figure 1.17). Une fois connecté au réseau, un flux magnétique tournant à vitesse fixe apparaît au stator. Ce flux dépend de la reluctance du circuit magnétique, du nombre de spires dans le bobinage et donc du courant statorique.

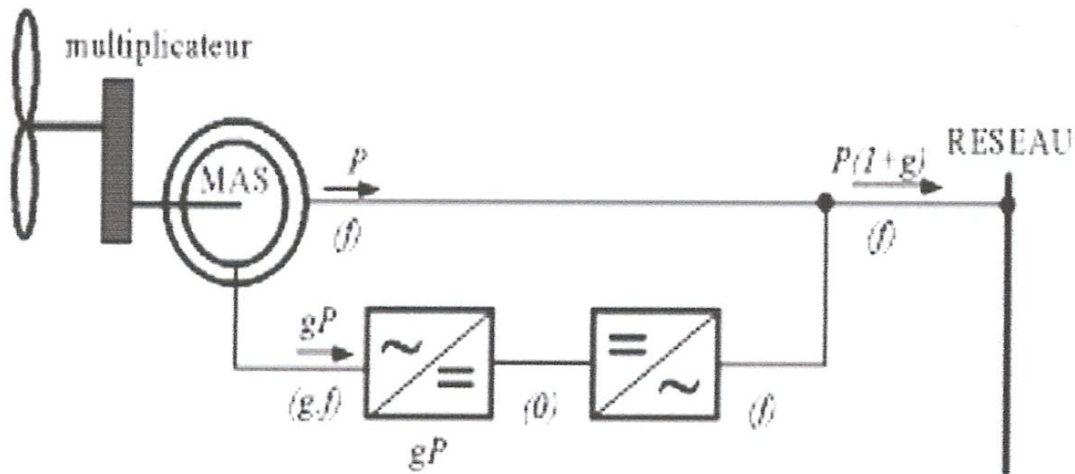


Figure 1.17. Schéma de principe d'une machine asynchrone à rotor bobiné pilotée par le rotor

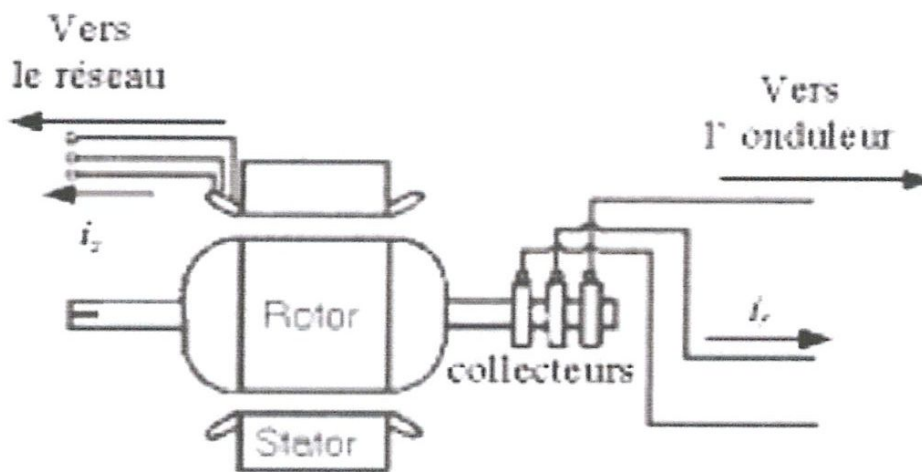


Figure 1.18. Schéma de la machine asynchrone à rotor bobiné avec des bagues collectrices.

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement.

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages principaux des deux types de fonctionnement sont les suivants:

b- Applications des machines asynchrones à double alimentation

La première application de la MADA et le fonctionnement moteur sur une grande plage de variation de la vitesse.

Dans les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est, directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La solution classique permettant alors le fonctionnement à vitesse variable consiste à faire varier la fréquence d'alimentation de la machine. Ceci est généralement réalisé par l'intermédiaire d'un redresseur puis d'un onduleur commande.

Ces deux convertisseurs sont alors dimensionnés pour faire transiter la puissance nominale de la machine.

L'utilisation d'une MADA permet de réduire la taille de ces convertisseurs d'environ 70% en faisant varier la vitesse par action sur la fréquence d'alimentation des enroulements rotoriques.

Ce dispositif est par conséquent économique et, contrairement à la machine asynchrone à cage, il n'est pas consommateur de puissance réactive et peut même être fournisseur.

La même philosophie peut être appliquée au fonctionnement en génératrice dans lequel l'alimentation du circuit rotorique à fréquence variable permet de délivrer une fréquence fixe au stator même en cas de variation de vitesse [2].

c- Fonctionnement en génératrice à vitesse variable

La figure (1.18) donne la configuration de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation dont le stator est relié directement au réseau et dont le rotor est relié au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur (structure de Scherbius PWM), P_{RES} est la puissance délivrée au réseau ou fournie par le réseau, P_S La puissance transitant par le stator, P_R la puissance transitant par le rotor, et P_{MEC} la puissance mécanique.

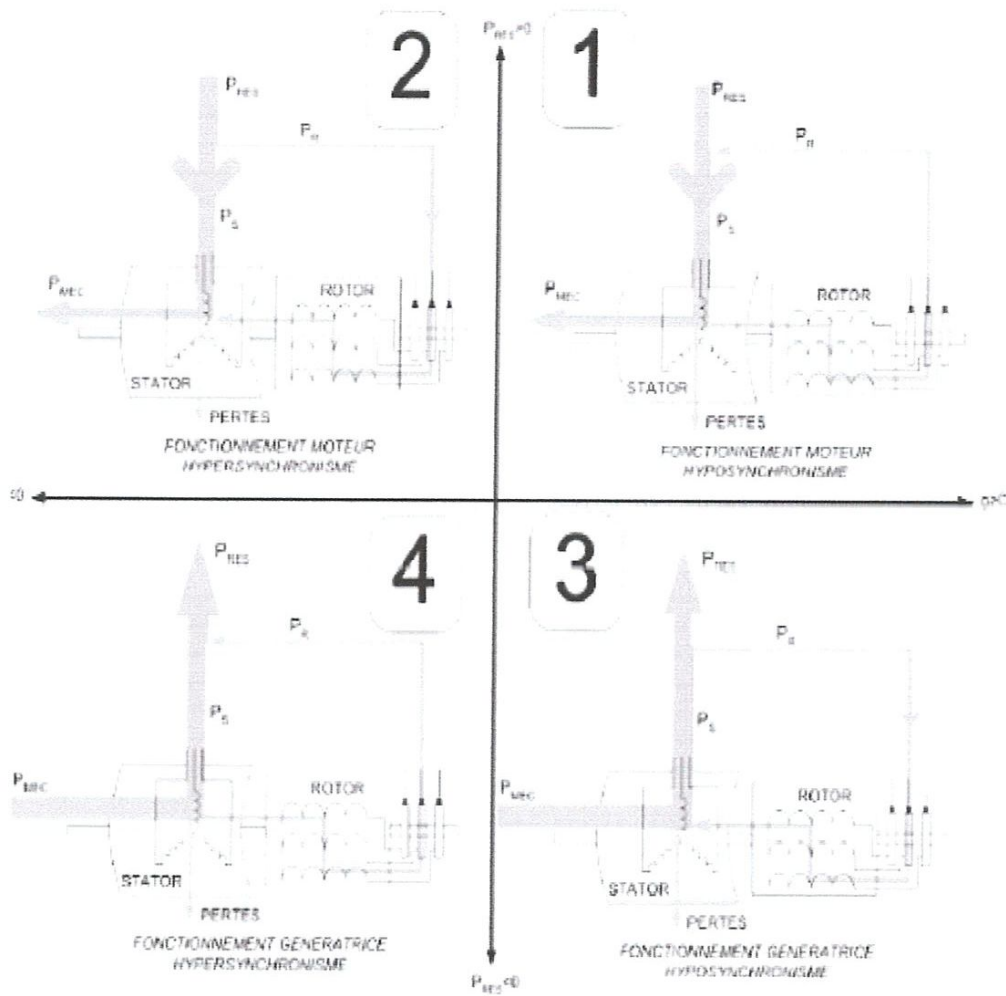


Figure 1.19: Quadrants de fonctionnement de la machine asynchrone à double alimentation.

Lorsque la machine fonctionne en moteur, la puissance est fournie par le réseau. Si la vitesse de rotation est inférieure au synchronisme, la puissance de glissement est renvoyée sur le réseau, c'est la cascade hypo synchrone. En mode moteur hyper synchrone, une partie de la puissance absorbée par le réseau va au rotor et est convertie en puissance mécanique. En fonctionnement générateur, le comportement est similaire, la puissance fournie à la machine par le dispositif qui l'entraîne est une puissance mécanique. En mode hypo synchrone, une partie de la puissance transitant par le stator est réabsorbée par le rotor. En mode hyper synchrone, la totalité de la puissance mécanique fournie à la machine est transmise au réseau aux pertes près. Une partie de cette puissance correspondant à $g.P_{MEC}$ est transmise par l'intermédiaire du rotor.

Pour une utilisation dans un système éolien, les quadrants 3 et 4 sont intéressants. En effet si la plage de variation de vitesse ne dépasse pas $\pm 30\%$ en deçà ou au delà de la vitesse de synchronisme (ce qui représente un compromis entre la taille du convertisseur et la plage de

variation de vitesse) , la machine est capable de débiter une puissance allant de 0,7 à 1,3 fois la puissance nominale ; le convertisseur est alors dimensionné pour faire transiter uniquement la puissance de glissement c'est-à-dire au maximum 0,3 fois la puissance nominale de la machine.

Il est alors moins volumineux, moins coûteux, nécessite un système de refroidissement moins lourd et génère moins de perturbation que s'il est placé entre le réseau et le stator d'une machine à cage.

d- Fonctionnement à vitesse fixe

- Système électrique plus simple,
- plus grande fiabilité,
- peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'édifice,
- pas besoin de système électrique de commande,
- moins cher.

Il existe plusieurs types de génératrices utilisées dans le fonctionnement à vitesse variable représentés par le tableau suivant:

Génératrices utilisées	Caractéristiques
Machine asynchrone en autonome	Nécessité de capacités d'auto excitation pour magnétiser la machine.
Machine asynchrone à cage débitant sur un réseau	Obligation de fonctionner au voisinage du synchronisme.
Machine à double alimentation ou MADA	Autorise le fonctionnement à vitesse variable
Machine synchrone à aimants permanents (MSAP)	Bon rendement, faibles puissances, adaptée aux faibles vitesses mais prix élevé.
Machine à réluctance variable (MRV)	Permettant de supprimer totalement ou partiellement le multiplicateur de vitesse.

e- Intérêt de la MADA

Le principal avantage de la MADA est la possibilité de fonctionner à vitesse variable. Les machines asynchrones à vitesse fixe doivent fonctionner au voisinage de la vitesse de synchronisme car la fréquence est imposée par le réseau. La vitesse du rotor est quasi constante. Le système de la MADA permet de régler la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent. En effet la MADA permet un fonctionnement en génératrice hypo synchrone et hyper synchrone. On arrive ainsi à extraire le maximum de puissance possible.

L'intérêt de la vitesse variable pour une éolienne est de pouvoir fonctionner sur une large plage de vitesses de vent, et de pouvoir en tirer le maximum de puissance possible, pour chaque vitesse de vent.

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types éoliens avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on présente les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.

A la fin de ce chapitre on présente la structure de la machine asynchrone à double alimentation, son application et son intérêt.

Chapitre II :

Modélisation de l'éolienne

II.1. Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet en premier lieu de comprendre le comportement dynamique et l'interaction électromécanique de la génératrice. Avec le modèle approprié, nous pouvons nous orienter facilement à une commande optimale.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne et les caractéristiques aérodynamiques.

II.2. Modélisation du vent

La modélisation des aérogénérateurs nécessite une connaissance de la variation de la vitesse du vent au cours du temps. Cependant, cette source reste imprédictible et difficilement reproductible sur un site.

Une modélisation proposée parmi de nombreuses autres a été présentée par C. Nichita. Cette approche est basée sur la génération de l'allure temporelle du vent à partir d'un bruit blanc sur lequel on applique une fonction de transfert du filtre non rationnel de Von Karman dont les paramètres dépendent des caractéristiques du site et de la nature du vent [3].

Cette fonction de transfert est approximée par :

$$\hat{H}_F(s) = K_F \frac{(m_1 T_F s + 1)}{(T_F s + 1)(m_2 T_F s + 1)} \quad (2.1)$$

m_1 et m_2 étant les paramètres de Nichita, $m_1 = 0,4$ et $m_2 = 0,25$. Les paramètres mathématiques T_F et K_F sont calculés selon les expressions suivantes :

$$T_F = \frac{L_F}{v} \quad (2.2)$$

où

L_F : est l'échelle de longueur de la turbulence du vent $v_t(t)$. Cette valeur dépend des caractéristiques du site, et varie de 100 en mer à 500 dans les zones turbulentes.

v : est la valeur moyenne de la vitesse du vent qui dépend de la nature du vent (faible, moyen ou fort).

$$K_F = \sqrt{\frac{\pi}{T_S \Delta \omega S_F}} \quad (2.3)$$

Avec :

T_S : La période d'échantillonnage.

$\Delta \omega = 0,002 \text{ rad/s}$.

$$S_F = \sum_{k=0}^{\frac{\pi}{T_S \Delta \omega}} \frac{(m_1 T_F k \Delta \omega)^2 + 1}{[(T_F k \Delta \omega)^2 + 1][(m_2 T_F k \Delta \omega)^2 + 1]}$$

L'expression $v_0(t)$ de la vitesse du vent en un point fixe peut être représentée par l'équation suivante :

$$v_0(t) = V + v_t(t) \tag{2.4}$$

La composante représentant la turbulence $v_t(t)$ est caractérisée par la longueur d'échelle L_F et aussi par l'écart type σ_v de cette turbulence qui dépend de la valeur moyenne de la vitesse du vent V .

$$\sigma_v = k_\sigma V \tag{2.5}$$

Où

k_σ représente l'intensité de la turbulence. La valeur de ce coefficient varie de 0,1 en mer à 0,25 dans une zone turbulente.

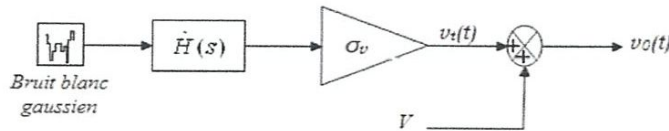


Figure 2.1. Schéma blocs de la construction de la vitesse du vent en un point

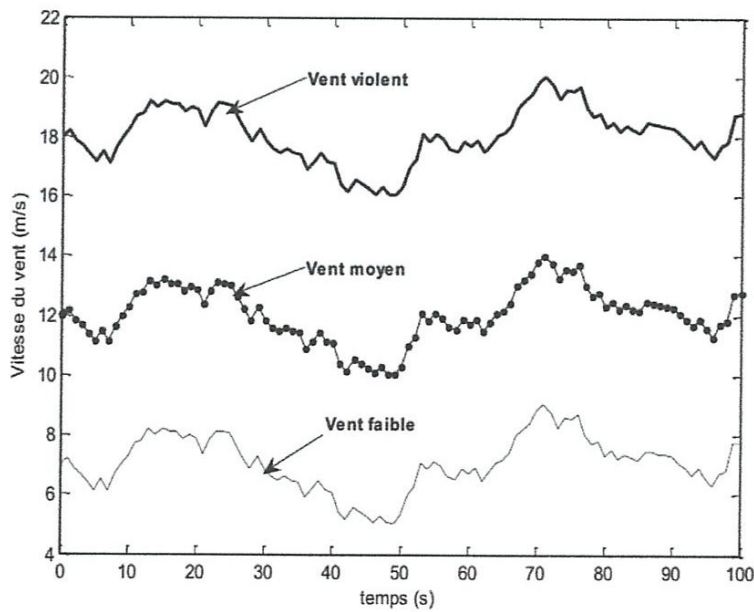


Figure 2.2. Génération de vents de différentes natures par la méthode de Nichita

La figure (2.2) présente les courbes du vent pour trois valeurs de vitesses : 7m/s (vent faible), 12 m/s (vent moyen) et 18 m/s (vent violent) :

II.3. Modélisation de la turbine éolienne

II.3.1. Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Considérons une turbine éolienne à trois pales orientables, fixés sur un l'arbre de la turbine formant ainsi un bloc mécanique capable de tourner grâce à l'énergie du vent. Ceci permet de déduire que chaque partie de cet ensemble subit trois contraintes à savoir sa propre inertie, le frottement et la contrainte élastique. D'une manière générale l'arbre de la turbine est solidaire d'un multiplicateur de vitesse, qui à son tour est lié à l'arbre de la génératrice. La figure 2.3 illustre d'une manière détaillée le schéma équivalent de la turbine éolienne.

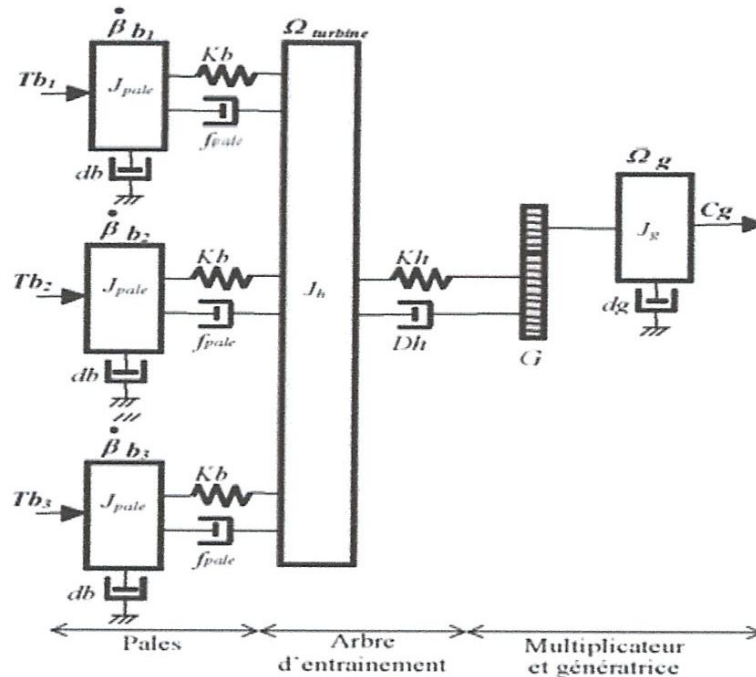


Figure 2.3. Schéma mécanique équivalent de la turbine éolienne

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- La même inertie J_{pale}
- La même élasticité k_b
- Le même coefficient de frottement par rapport à l'air d_b

Ces pales sont orientables et présentent toutes un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées \dot{B}_{b1} , \dot{B}_{b2} , \dot{B}_{b3} .

Chaque pale reçoit une force T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} qui dépend de la vitesse du vent qui lui est appliquée.

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

- Son inertie J_n
- Son élasticité k_n
- Son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur d_n

Le rotor de la génératrice possède :

- Une inertie J_g
- Un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple entraînant (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée ω_{mec} . La turbine comporte également un multiplicateur de vitesse noté G .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($T_{b1} = T_{b2} = T_{b3}$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De part la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air d_b est très faible et peut être ignoré.

De même, les pertes par frottement côté turbine sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice.

En tenant compte de ces considérations, le modèle mécanique de la figure 2.3 devient celui donné dans la figure (2.4) comportant deux masses tournantes grâce au couple aérodynamique C_{aero} .

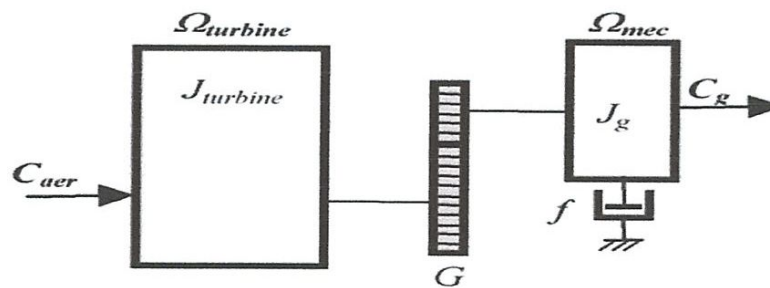


Figure 2.4. Schéma mécanique équivalent simplifié de la turbine

II.4. Multiplicateur

Le multiplicateur de vitesse existe dans la plupart des éoliennes commercialisées. En effet, quand le diamètre du rotor est grand, les vitesses de rotation sont trop faibles. Il est alors indispensable d'intercaler un multiplicateur entre la turbine et la génératrice afin d'adapter les deux vitesses de rotation au même ordre de grandeur. Il s'agit d'un dispositif très complexe que nous avons modélisé très simplement par un gain entre le couple aérodynamique C_{aero} et le couple électromagnétique C_{em} :

$$C_{em} = \frac{C_{aero}}{G_g} \quad (2.6)$$

G_g : étant le gain du multiplicateur.

On en déduit la relation suivante entre la vitesse de rotation de la turbine ω_t et celle de la génératrice ω_g

$$\omega_t = \frac{\omega_g}{G_g} \quad (2.7)$$

II.5. Modélisation du système électrique:

Le sous-système électrique de l'éolienne est composé de la génératrice et d'un module d'électronique de puissance et a pour rôle de convertir l'énergie mécanique au niveau de la turbine en énergie électrique.

Sur les systèmes éoliens d'aujourd'hui, on peut distinguer essentiellement l'utilisation de deux types de machines électriques : les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. Ces dernières sont réservées aux éoliennes raccordées au réseau.

Les dynamiques des machines électriques et des systèmes d'électronique de puissance qui y sont associés sont beaucoup plus rapides que celles des autres parties de l'aérogénérateur. Et, étant donné que les dynamiques dominantes sont essentiellement imposées par le sous-système mécanique, le système éolien sera considéré en tant qu'une structure mécanique. Par la suite, le générateur sera caractérisé par le fait que son couple électromagnétique C_{em} peut être pris à tout instant égal à sa valeur de référence.

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (2.8)$$

La puissance électrique P sera égale au produit du couple électromagnétique C_{em} par la vitesse de rotation de la génératrice ω_g

$$P_e = C_{em} \omega_g \quad (2.9)$$

II.6. Modélisation du sous-système aérodynamique

L'éolienne ne récupère qu'une partie de la puissance du vent déterminée par un coefficient de puissance. $c_p(\lambda, \beta) < 1$

La puissance aérodynamique aura alors l'expression simplifiée suivante :

$$P_{aero} = \frac{\rho S v^3}{2} c_p(\lambda, \beta) \quad (2.10)$$

Avec :

ρ : la densité de l'air.

S : la surface circulaire balayée par la turbine, et dont le rayon R_T est déterminé par la longueur de la pale ($S = \pi R^2$),

v : est la vitesse du vent,

λ : le ratio de vitesse (*rad*), défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales ω_t et la vitesse du vent v :

$$\lambda = \frac{\omega R_T}{v} \quad (2.11)$$

β : l'angle d'orientation de la pale (degré).

$c_p(\lambda, \beta)$: le coefficient de puissance qui est une fonction fortement non linéaire de λ et β définie par les courbes caractéristiques de la Figure (2.5) [3]:

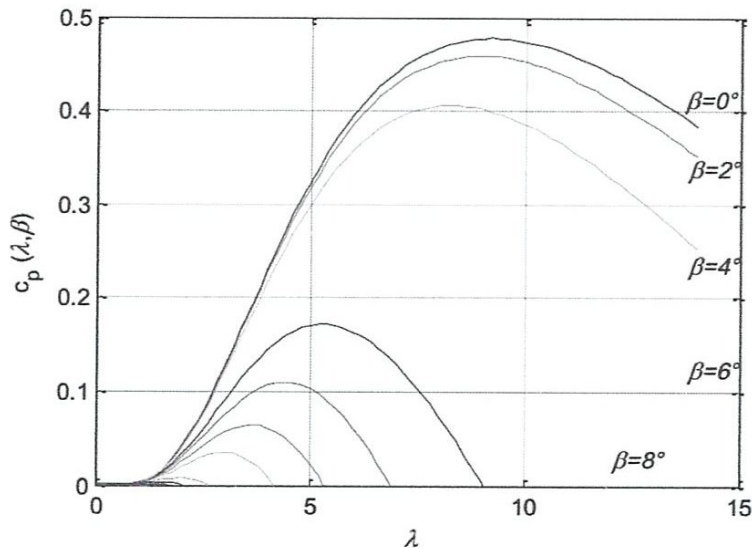


Figure 2.5 : Courbes de c_p en fonction de λ et β

L'expression utilisée pour la puissance est simplifiée. D'une part, les phénomènes aérodynamiques mis en jeu sont trop complexes pour être modélisés finement par ce type d'expression. D'autre part, le vent n'est absolument pas homogène sur toute la surface balayée par les grandes éoliennes ($S = \pi R_T^2$). Cependant, c'est l'expression qui est utilisée le plus couramment dans la littérature pour calculer les lois de commande.

Le couple aérodynamique extrait par la turbine est défini par l'équation suivante :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\omega_t} = \frac{\rho S R_T v^2}{2\lambda} C_p(\lambda, \beta) \tag{2.12}$$

Dans la littérature, on considère essentiellement deux types de modèles de transmission mécanique : une transmission rigide et une transmission souple. Nous présentons dans ce qui suit la modélisation de ces deux modèles.

II.6.1. Modèle de transmission rigide

La modélisation en transmission rigide ne considère que l'inertie totale J constituée de l'inertie J_T de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie J_g du générateur. Cette inertie est exprimée par la formule suivante :

$$J = \frac{J_T}{G_g^2} + J_g \tag{2.13}$$

On définit le modèle de la partie mécanique en transmission rigide par l'équation (2.14):

$$J \frac{d\omega_T}{dt} = C_{aero} - G_g C_{em} \tag{2.14}$$

Le modèle rigide est alors représenté par le schéma blocs de la Figure 2.6:

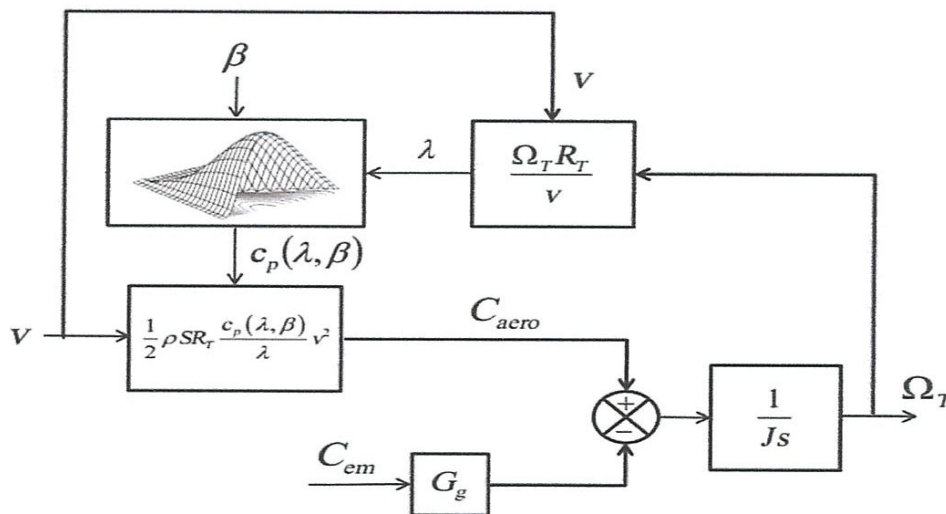


Figure 2.6. Schéma blocs du modèle rigide de l'éolienne

II.6.2 Modèle de transmission souple:

En tenant compte de la souplesse de l'arbre, le couplage mécanique entre l'aéroturbine et la machine électrique en transmission souple est modélisé par un modèle à deux masses comme présenté à la Figure (2.7). Les deux masses sont connectées à un arbre souple caractérisé par le coefficient d'élasticité de l'arbre d'entraînement des pales k et le coefficient de frottement de l'arbre par rapport au multiplicateur d [3].

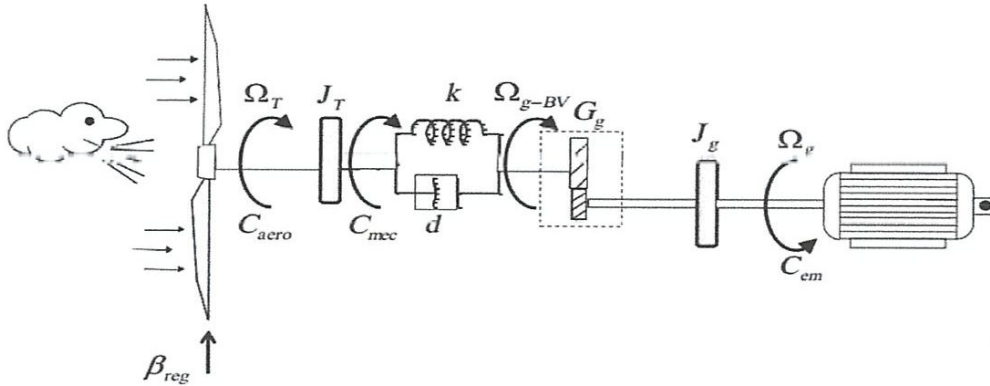


Figure 2.7. Modèle à deux masses de l'éolienne

Nous pouvons alors écrire les équations suivantes ramenées à l'arbre de basse vitesse:

$$\begin{cases} J_T \frac{d\omega_t}{dt} = C_{aero} - C_{mec} \\ J_{g-BV} \frac{d\omega_{g-BV}}{dt} = C_{mec} - G_g C_{em} \\ \frac{dC_{mec}}{dt} = k(\omega_T - \omega_{g-BV}) + d \left(\frac{d\omega_t}{dt} - \frac{d\omega_{g-BV}}{dt} \right) \end{cases} \quad (2.15)$$

ω_{g-BV} et J_{g-BV} Étant respectivement la vitesse de rotation et l'inertie de la génératrice ramenées à l'arbre basse vitesse, définies par :

$$\begin{cases} \omega_{g-BV} = \frac{\omega_g}{G_g} \\ J_{g-BV} = G_g^2 J_g \end{cases} \quad (2.16)$$

Le modèle souple est alors représenté par le schéma blocs de la Figure 2.8:

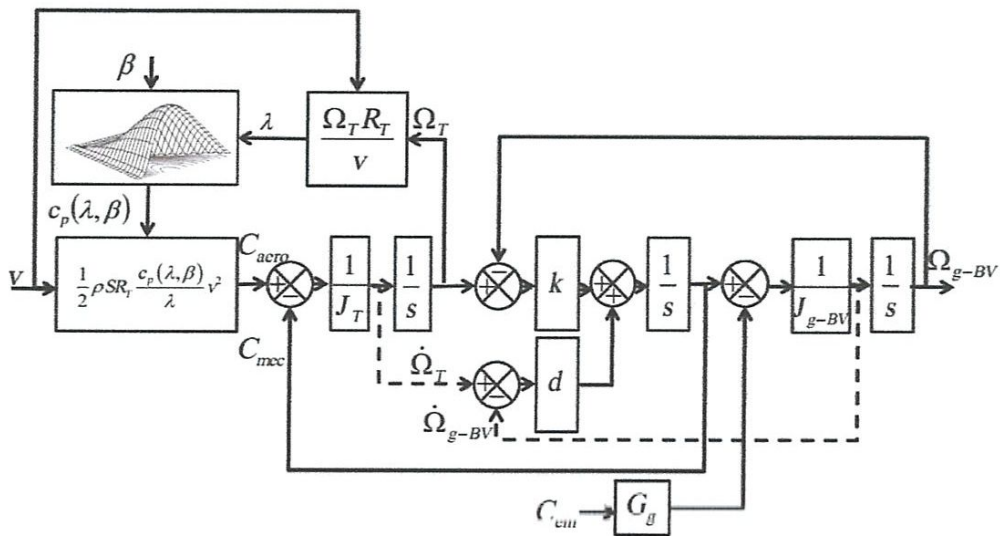


Figure 2.8: Schéma blocs du modèle souple de l'éolienne

II.7. Linéarisation du modèle de l'éolienne

Généralement, il est plus aisé de déterminer, pour des raisons évidentes de simplicité de mise en œuvre, la commande sur un modèle linéarisé du système, pour un point de fonctionnement correspondant à une vitesse de vent moyenne. Pour cela, reprenons les équations régissant le comportement du modèle à deux masses de l'aéroturbine mais en tenant compte les coefficients de frottements externes sur le rotor et la génératrice qui sont K_r et K_g respectivement, comme le montre dans la figure (2.9), le modèle de l'éolienne devient [4] :

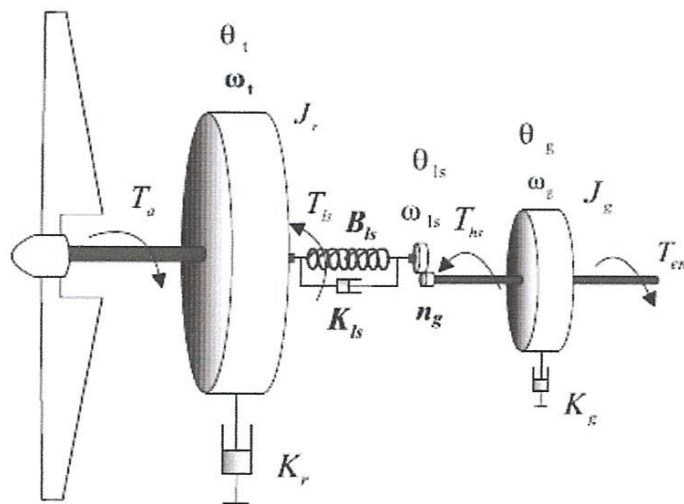


Figure 2.9. Schéma du dispositif d'entraînement à deux masses

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]
K_{ls}	coefficient de frottements 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]
B_{ls}	coefficient de torsion 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_g	vitesse de la génératrice	[rad/s]
n_g	rapport de transmission du multiplicateur	

$$J_r \dot{\omega}_t = T_a - K_r \omega_t - T_{ls} \tag{2.17}$$

$$J_g \dot{\omega}_g = T_{hs} - K_g \omega_g - T_{em} \tag{2.18}$$

$$T_{ls} = K_{ls} \left(\omega_t - \frac{\omega_g}{n_g} \right) + B_{ls} \left(\theta_t - \frac{\theta_g}{n_g} \right) \tag{2.19}$$

En introduisant la dérivée de ce système d'équations devient.

$$\dot{\omega}_t = \frac{1}{J_r} T_a - \frac{K_r}{J_r} \omega_t - \frac{1}{J_r} T_{ls} \tag{2.20}$$

$$\dot{\omega}_g = \frac{1}{n_g J_g} T_{hs} - \frac{K_g}{J_g} \omega_g - \frac{1}{J_g} T_{em} \tag{2.21}$$

$$\dot{T}_{ls} = K_{ls} \left(\dot{\omega}_t - \frac{\dot{\omega}_g}{n_g} \right) + B_{ls} \left(\omega_t - \frac{\omega_g}{n_g} \right) \tag{2.22}$$

En remplaçant (2.20) et (2.21) dans (2.22), il vient.

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{-K_r}{J_r} & 0 & \frac{1}{J_r} \\ 0 & -\frac{K_g}{J_g} & \frac{1}{n_g J_g} \\ \left(B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r} \right) & \frac{1}{n_g} \left(\frac{K_{ls} K_g}{J_g} - B_{ls} \right) & -K_{ls} \left(\frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r} \right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{1}{J_r} \\ 0 \\ \frac{K_{ls}}{J_r} \end{pmatrix} T_a + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_g} \\ \frac{K_{ls}}{n_g J_g} \end{pmatrix} T_{em} \tag{2.23}$$

Avec quelques changements de notations : $T_a = C_{aero}$, $T_{em} = C_{em}$, $T_{ls} = C_{mec}$

Le caractère non linéaire de ce système provient de celui du couple aérodynamique :

$$T_a = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 C_q(\lambda, \beta) v^2 \quad (2.24)$$

qui dépend d'une façon fortement non linéaire, de la vitesse du rotor ω_t , de l'angle de calage β et de la vitesse du vent v qui est une entrée non commandable, aléatoire et fortement fluctuante.

La linéarisation du couple aérodynamique autour du point de fonctionnement choisi permet d'écrire :

$$\begin{aligned} T_a &= T_{a0} + \Delta T_a \\ &= T_{a0} + \alpha \Delta v + \gamma \Delta \omega_t + \delta \Delta \beta \end{aligned} \quad (2.25)$$

Avec :

$$\begin{cases} \gamma = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{v^2}{\omega_{T-nom}} \left[\frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} - \frac{C_{p-nom}}{\lambda_{nom}} \right] \\ \alpha = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{v^2}{\lambda_{nom}^3} \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \beta} \\ \delta = \frac{\partial C_{aero}}{\partial \beta} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 \frac{v^2}{\lambda_{nom}} * \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \beta} \end{cases} \quad (2.26)$$

Pour calculer les coefficients de linéarisation γ , α et δ , l'expression empirique suivante de c_p relative à des éoliennes de 2MW est utilisée.

$$c_p = 0.18 * \left(\frac{90}{0.4+0.5\lambda} - 6.8 - 0.115 * \beta^2 \right) * \exp \left(\frac{-8}{0.4+0.5\lambda} + 0.16 \right) \quad (2.27)$$

Avec :

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \beta} &= -0.18 * 0.115 * 2\beta * \exp \left(\frac{-8}{0.4+0.5\lambda} + 0.16 \right) \\ \frac{\partial C_p(\lambda, \beta)}{\partial \lambda} &= \exp \left(\frac{-8}{0.4+0.5\lambda} + 0.16 \right) \left(\frac{-12.996 - 0.0828 \beta^2}{(0.4+0.5\lambda)^2} + \frac{64.8}{(0.4+0.5\lambda)^3} \right) \end{aligned}$$

II.7.1. A vents faibles

L'angle de calage étant fixé ($\delta\beta = 0$), le modèle linéarisé de l'éolienne, en dessous de la puissance nominale, possède une seule entrée de commande qui est le couple de la génératrice T_{em} '

L'expression de $T_a = T_a - T_{a0}$ est alors.

$$T_a = \alpha v + \gamma \omega_t \quad (2.28)$$

Dans ce cas, la représentation d'état du système linéarisé est :

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\gamma - K_r}{J_r} & 0 & \frac{1}{J_r} \\ 0 & -\frac{K_g}{J_g} & \frac{1}{n_g J_g} \\ \left(B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r}\right) + \frac{\gamma K_{ls}}{J_r} & \frac{1}{n_g} \left(\frac{K_{ls} K_g}{J_g} - B_{ls}\right) & -K_{ls} \left(\frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_g} \\ \frac{K_{ls}}{n_g J_g} \end{pmatrix} T_{em} \\
+ \begin{pmatrix} \frac{\alpha}{J_r} \\ 0 \\ \frac{\alpha K_{ls}}{J_r} \end{pmatrix} v \quad (2.29)$$

et la sortie est :

$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix} \quad (2.30)$$

Sous une forme plus compacte, le système (2.28) s'écrit :

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + BT_{em} + Gv \\ y = Cx \end{cases} \quad (2.31)$$

Avec
$$x = \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix}$$

II.7.2. A vents forts

Le modèle linéarisé est simplement obtenu en utilisant (2.23) et (2.25)

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\gamma - K_r}{J_r} & 0 & \frac{1}{J_r} \\ 0 & -\frac{K_g}{J_g} & \frac{1}{n_g J_g} \\ \left(B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r}\right) + \frac{\gamma K_{ls}}{J_r} & \frac{1}{n_g} \left(\frac{K_{ls} K_g}{J_g} - B_{ls}\right) & -K_{ls} \left(\frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix} \\
+ \begin{pmatrix} \frac{\delta}{J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \\ \frac{\delta K_{ls}}{J_r} & \frac{K_{ls}}{n_g J_g} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ T_{em} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\alpha}{J_r} \\ 0 \\ \frac{\alpha K_{ls}}{J_r} \end{pmatrix} v \quad (2.32)$$

Avec
$$y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix}$$

Soit encore sous forme matricielle

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax + Bu + Gv \\ y = Cx \end{cases}$$
$$u = \begin{pmatrix} \beta \\ T_{em} \end{pmatrix} \quad (2.33)$$

Notons que ce modèle est multi variable, avec deux entrées de commande le couple de la génératrice T_{em} et la commande en pitch β , et v la vitesse du vent.

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons modélisé l'ensemble mécanique notamment la turbine, le multiplicateur, l'arbre mécanique en prenant en compte les caractéristiques aérodynamiques. Comme le modèle résultant est fortement non linéaire à cause du coefficient de puissance nous avons fait une la linéarisation à ce modèle.

Chapitre III :

Commande linéaire quadratique LQ

III.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à l'élaboration des lois de commande permettant, lorsque les vents sont faibles, d'atteindre l'objectif de maximiser l'énergie capturée et donc l'énergie produite par l'éolienne. Les commandes classiques du type PI, PID sont les plus utilisées au plan industriel, mais néanmoins elles ne permettent pas d'atteindre les résultats escomptés. Raison pour laquelle on a besoin de synthétiser d'autres lois de commande telles que la commande linéaire quadratique LQ et linéaire quadratique généralisée LQG.

III.2. Objectifs de commande

Dans le domaine de fonctionnement d'une éolienne à vitesse variable, on distingue deux régions: en dessous et au dessus de la vitesse nominale du vent. Il est alors important d'étudier le rôle et les effets du système de commande en fonctionnement à charge partielle, c'est à dire en dessous de la puissance nominale. Dans cette zone de fonctionnement, la commande a pour principaux objectifs de maximiser l'énergie capturée du vent et de minimiser les efforts subis par le dispositif d'entraînement, 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 $C_{p_{opt}} = C_p(\lambda_{opt}, \beta_{opt})$, voir figure 3.1, le rotor fournit donc une puissance aérodynamique maximale uniquement à la vitesse spécifique λ_{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 $\lambda = (\omega_t R)/v$ 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 $\lambda = (\omega_t R)/v$ à sa valeur optimale λ_{opt} . Un exemple de courbe $C_p(\lambda, \beta_{opt})$ est reporté sur la figure 3.1

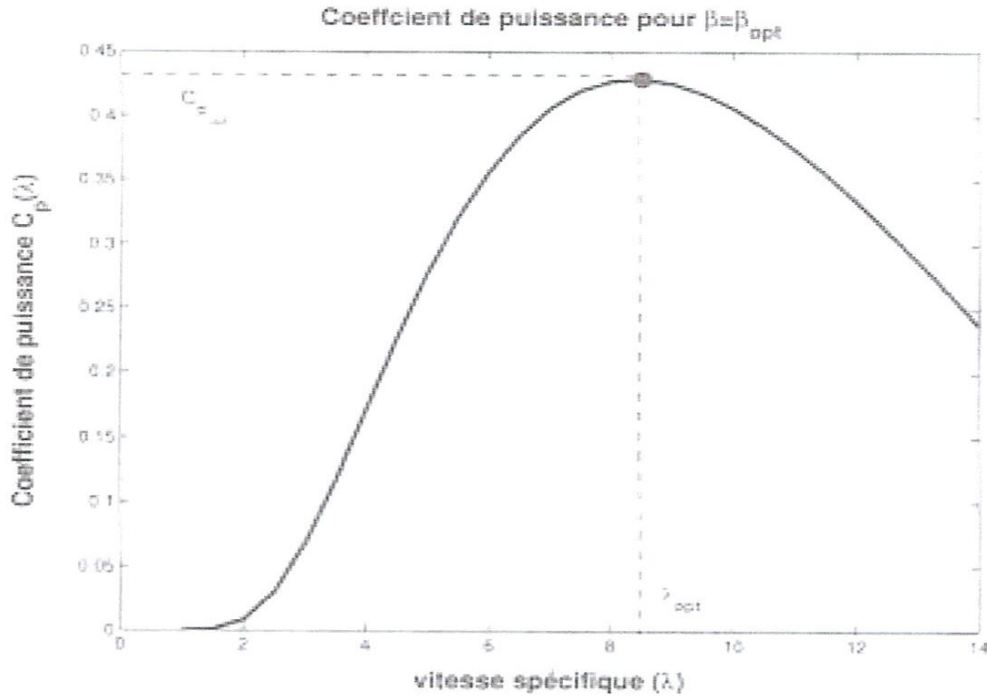


Figure 3.1 : Exemple du coefficient de puissance pour $\beta = \beta_{opt}$

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.

III.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:

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.

Cette configuration des commandes est représentée sur la figure 3.2.

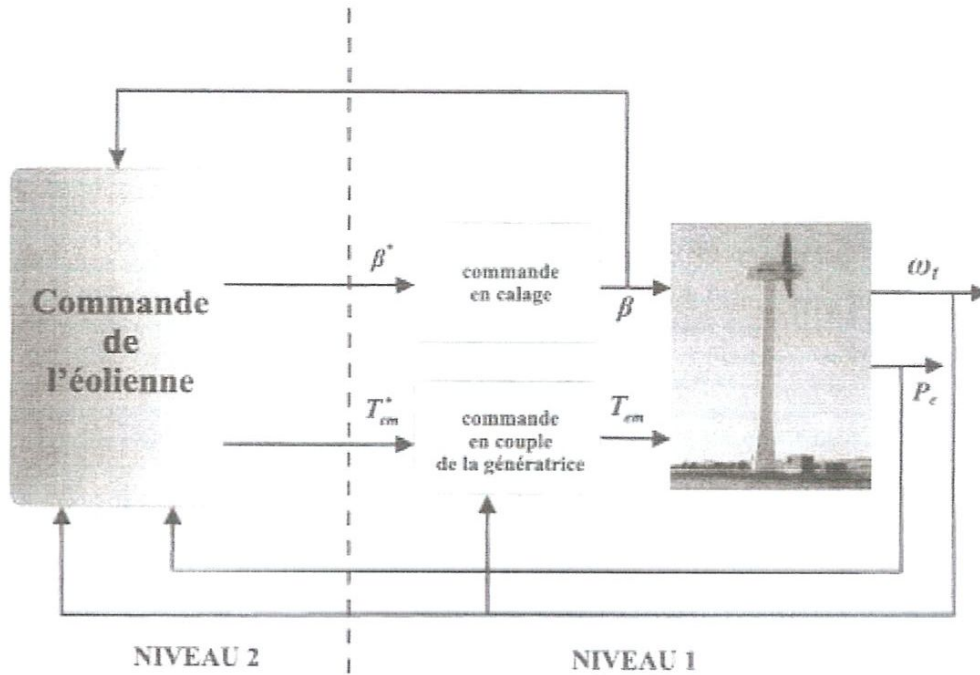


Figure 3.2. Niveaux de commande d'une éolienne à vitesse variable et calage variable

La commande de niveau 2 de l'aérogénérateur peut donc être réalisée sans modéliser la partie électrique. Cette approche est souvent utilisée dans la littérature spécifique à la commande d'aérogénérateurs. Cependant le lecteur peut trouver de nombreux travaux dédiés spécifiquement à la commande de la partie électrique (niveau 1).

III.4. Commande Linéaire (LQ)

III.4.1. Introduction

Dans cette partie, on s'intéressera plus particulièrement aux systèmes linéaires dans le cas d'un critère quadratique, cas connu sous le nom de commande linéaire quadratique (LQ) ou (LQR) pour linear Quadratic regulator, et qui s'exprime sous la forme d'un retour d'état statique. Le principe de la commande par retour d'état est présenté dans la figure 3.3

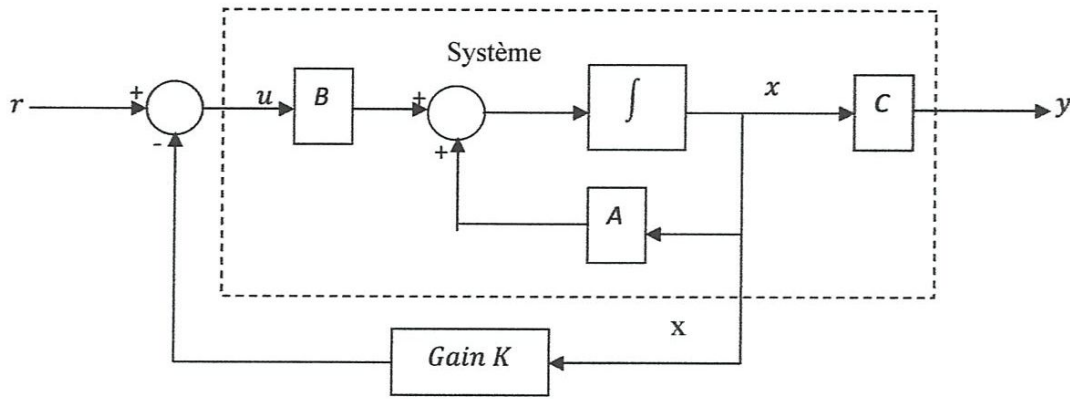


Figure 3.3: Structure de la commande linéaire par retour d'état

III.4.2 Commande linéaire quadratique en temps continu

a. Cas de l'horizon fini

En temps continu, le système est représenté dans l'espace d'état par le modèle linéaire déterministe :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.1)$$

Où $u(t)$ est le vecteur de commande de dimension n_u , x le vecteur d'état de dimension n , y le vecteur de sortie de dimension n_y . A, B et C , sont des matrices de tailles respectives $n \times n$, $n \times n_u$, $n_y \times n$.

La commande u doit minimiser le critère quadratique classique :

$$J = \frac{1}{2} x^T(T) F x(T) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^T [x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)] dt \quad (3.2)$$

Où les matrices F, Q , sont symétriques, semi définies positives tandis que R est symétrique, définie positive. Ce critère tend à ramener l'état x vers 0.

Le problème du contrôleur linéaire quadratique consiste à trouver la matrice du correcteur K qui minimise le critère de performance J .

Par l'application du principe de Pontriaguine l'Hamiltonien est donnée par :

$$H = L(x, u, t) + \lambda^T f = \frac{1}{2} x^T(t) Q x(t) + \frac{1}{2} u^T(t) R u(t) + \lambda^T [Ax(t) + Bu(t)] \quad (3.3)$$

La condition nécessaire d'optimalité est :

$$\begin{cases} H_u = 0 \\ \dot{\lambda} = -H_x \end{cases} \Leftrightarrow \begin{cases} Ru(t) + B^T \lambda = 0 \\ \dot{\lambda} = -(Qx(t) + A^T \lambda) \end{cases} \quad (3.4)$$

$$Ru(t) + B^T \lambda = 0$$

Donc, de l'équation (3.4) on peut tirer la commande optimale :

$$u(t) = -R^{-1}B^T\lambda(t) \quad (3.5)$$

La condition de transversalité est :

$$\lambda(T) = \frac{\partial G}{\partial x(T)} = \frac{\partial}{\partial x(T)} \left(\frac{1}{2} x^T(T) F x(T) \right) = Fx(T) \quad (3.6)$$

$$\begin{cases} \dot{x} = Ax(t) - BR^{-1}B^T\lambda(t) & / \lambda(T) = Fx(T) \\ \dot{\lambda} = -Qx(t) - A^T\lambda(t) & x(0) = x_0 \end{cases} \quad (3.7)$$

La structure linéaire de (3.6) permet de poser :

$$\begin{aligned} & \begin{cases} \lambda(t) = Fx(t) \\ \dot{\lambda}(t) = \dot{F}(t)x(t) + F(t)\dot{x}(t) \end{cases} \\ \Leftrightarrow & \dot{F}(t)x(t) + F(t)(Ax(t) - BR^{-1}B^T\lambda(t)) = -Qx(t) - A^T\lambda(t) \\ \Leftrightarrow & \dot{F}x(t) + FAx(t) - FBR^{-1}B^TFx(t) = -Qx(t) - A^TFx(t) \\ \Leftrightarrow & \dot{F} + FA - F(t)BR^{-1}B^TF = -Q - A^TF \\ \Leftrightarrow & -\dot{F} = Q + FA + A^TF - FBR^{-1}B^TF \end{aligned} \quad (3.8)$$

C'est l'équation de Riccati continue

Résumé :

La commande qui minimise le critère J est donnée par :

$$\underline{u}^\circ(t) = -R^{-1}B^TF\underline{x}(t) = -K(t)\underline{x}(t) \quad (3.9)$$

Avec K est un gain en fonction de temps.

F est la solution de l'équation de Riccati continue, cette solution doit se faire à partir de l'instant T .

$H_{uu} = R > 0$ donc la commande u° est minimum

F Est une matrice symétrique car F^T est aussi solution de l'équation de Riccati.

Le cout optimal est donné par :

$$J^*(\underline{x}(0)) = \frac{1}{2} \underline{x}^T(0) F(0) \underline{x}(0) \quad (3.10)$$

Méthode de résolution de l'équation de Riccati

$$\text{Soit } \begin{cases} \dot{\underline{x}} = A\underline{x}(t) + B\underline{u}(t) \\ \dot{\underline{\lambda}} = -Q\underline{x}(t) - A^T\underline{\lambda}(t) \end{cases} \quad \text{avec } \underline{\lambda}(t) = F(t)\underline{x}(t)$$

$$\Rightarrow F(t) = \lambda(t)\underline{x}^{-1}(t)$$

$$\text{On pose } F(t) = M(t)N^{-1}(t)$$

$$\Rightarrow \begin{cases} \dot{N}(t) = AN(t) - BR^{-1}B^TM(t) \\ \dot{M}(t) = -QN(t) - A^TM(t) \end{cases}$$

$$\Leftrightarrow \begin{pmatrix} \dot{\underline{N}}(t) \\ \dot{\underline{M}}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & -BR^{-1}B^T \\ -Q & A^T \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \underline{N}(t) \\ \underline{M}(t) \end{pmatrix}$$

Avec

$$\begin{cases} M(T) = F(T) \\ N(T) = I \end{cases}$$

b. Cas de l'horizon infini

A l'horizon infini le critère s'écrit comme suit :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} [\underline{x}^T(t)Q\underline{x}(t) + \underline{u}^T(t)R\underline{u}(t)]dt \quad (3.11)$$

Avec $Q > 0$ et $R > 0$

Si $T \rightarrow \infty$ (régime permanent)

$$\bar{F} = \lim_{T \rightarrow \infty} F(t) \rightarrow \dot{F} = 0$$

L'équation de Riccati devient :

$$\bar{F}A + A^T\bar{F} - \bar{F}BR^{-1}B^T\bar{F} + Q = 0 \quad (3.12)$$

$$\underline{u}^0(t) = -R^{-1}B^T\bar{F}\underline{x}(t) \quad (3.13)$$

III.4.3 Commande linéaire quadratique en temps discret

a. Cas de l'horizon fini

Objectif :

L'objectif est de trouver une séquence de commande $\{u_i\}, i = 0, \dots, \dots, N-1$, qui minimise le critère :

$$J = \frac{1}{2} \underline{x}^T(N)F\underline{x}(N) + \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{N-1} (\underline{x}^T(i)Q\underline{x}(i) + \underline{u}^T(i)R\underline{u}(i)) \quad (3.14)$$

Où F, Q symétriques et ≥ 0 , $R > 0$ et N donnée fini, et compte tenu des équations :

$$\underline{x}(k+1) = A\underline{x}(k) + B\underline{u}(k) \quad (3.15)$$

$$k = 0, 1, \dots, N-1, \quad \underline{x}(0) \text{ donnée.}$$

Application de la programmation dynamique

$$V_k(\underline{x}(k)) = \min_{\underline{u}(k)} \left\{ \frac{1}{2} (\underline{x}^T(k)Q\underline{x}(k) + \underline{u}^T(k)R\underline{u}(k)) + V_{k+1}(\underline{x}(k+1)) \right\} \quad (3.16)$$

Initialisée par : $V_N(\underline{x}(N)) = \frac{1}{2} \underline{x}^T(N)F\underline{x}(N)$

$$V_k(\underline{x}(k)) = \frac{1}{2} \underline{x}^T(k)F(k)\underline{x}(k) \quad (3.17)$$

Donc :

$$\frac{1}{2}\underline{x}^T(k)F(k)\underline{x} = \text{Min}_{\underline{u}(k)} \left\{ \frac{1}{2} \left(\underline{x}^T(k)Q\underline{x}(k) + \underline{u}^T(k)R\underline{u}(k) \right) + \frac{1}{2}\underline{x}^T(k+1)F(k+1)\underline{x}(k+1) \right\}$$

$$\frac{1}{2}\underline{x}^T(k)F(k)\underline{x}(k) =$$

$$\text{Min}_{\underline{u}(k)} \left\{ \frac{1}{2} \left(\underline{x}^T(k)Q\underline{x}(k) + \underline{u}^T(k)R\underline{u}(k) \right) + \frac{1}{2} \left(A\underline{x}(k) + B\underline{u}(k) \right)^T F(k+1) \left(A\underline{x}(k) + B\underline{u}(k) \right) \right\} \quad (3.18)$$

$$\frac{\partial \{ \}}{\partial \underline{u}(k)} = R\underline{u}(k) + B^T F(k+1) \left(A\underline{x}(k) + B\underline{u}(k) \right) = 0$$

$$\Rightarrow \underline{u}^\circ(k) = -(R + B^T F(k+1)B)^{-1} B^T F(k+1) A \underline{x}(k) \quad (3.19)$$

$$\underline{x}^\circ(k) = -\underline{K}(k)\underline{x}(k)$$

on remplace $\underline{u}^\circ(k)$ dans { } on obtient :

$$\frac{1}{2}\underline{x}^T(k)F(k)\underline{x}(k) =$$

$$\frac{1}{2}\underline{x}^T(k) \{ Q + A^T F(k+1)A - A^T F(k+1)B(R + B^T F(k+1)B)^{-1} B^T F(k+1)A \} \underline{x}(k)$$

Alors :

$$F(k) = Q + A^T F(k+1)A - A^T F(k+1)B(R + B^T F(k+1)B)^{-1} B^T F(k+1)A \quad (3.20)$$

Initialisé par $F(N) = F$

L'équation (3.20) représente l'équation de Riccati discrète

Le coût optimal est donné par :

$$J_{min} = \frac{1}{2}\underline{x}^T(0)F(0)\underline{x}(0)$$

b. Cas de l'horizon infini

Le critère de performance à minimiser est

$$J = \frac{1}{2} \sum_{i=0}^{\infty} \left(\underline{x}^T(i) Q \underline{x}(i) + \underline{u}^T(i) R \underline{u}(i) \right) \quad (3.21)$$

$\dim \underline{x} = n, \dim \underline{u} = m$

Si le paire (A, B) est commandable et si le paire (D, A) est observable, la séquence de commande optimale $\{u_k\}, k \in [0, +\infty[$ qui minimise le critère J compte tenu des équations d'état est donnée par :

$$\underline{u}^\circ(k) = -(R + B^T \bar{F} B)^{-1} B^T \bar{F} A \underline{x}(k) \quad (3.22)$$

Où \bar{F} est une matrice ≥ 0 vers laquelle converge l'équation de récurrence :

$$F(k) = Q + A^T F(k+1)A - A^T F(k+1)B(R + B^T F(k+1)B)^{-1} B^T F(k+1)A$$

Quand $k \rightarrow \infty$, et ce quelque soit l'initialisation $F(N) = F \geq 0$

La valeur du coût optimal est donné par :

$$J^* = \frac{1}{2} \underline{x}^T(0) \bar{F} \underline{x}(0)$$

Et le système en boucle fermée est asymptotiquement stable.

III.5. Commande Linéaire Gaussienne (LQG)

III.5.1. Introduction

En commande linéaire quadratique, les états sont supposés parfaitement connus. En fait, ceci est rarement le cas. En effet, les états n'ont souvent pas de réalité physique et, s'ils en ont une, ils sont fréquemment non mesurables ou non mesurés. Il est donc nécessaire d'estimer les états pour utiliser leur estimation dans le modèle de commande.

Donc, par rapport à la commande LQ, la commande LQG présente l'intérêt de s'appliquer à des systèmes dont l'état n'est pas mesuré. Développée au début de la seconde moitié du 20^{ème} siècle et appliquée lors du programme spatial Apollo pour la stabilisation de lanceurs, elle est apparue comme la première méthode générale pour l'asservissement des systèmes multivariables. De ce fait, elle a connu un grand succès comme en témoigne les nombreuses publications sur le sujet.

L'aspect aléatoire dans un système stochastique est dû :

- soit à une entrée (consigne) aléatoire
- soit à une perturbation aléatoire
- soit à une évolution aléatoire (état initial aléatoire, paramètres aléatoires...etc)

III.5.2. Formulation du problème et principe de séparation

Dans un système aléatoire, on n'a pas le vecteur d'état qui est aléatoire, mais ses caractéristiques statistiques (moyenne, variance...). On est alors devant un problème d'un critère sans expression.

On va conserver le même critère quadratique, cependant dans ce cas on minimise son espérance mathématique.

$$\min_{u(t)} E \left\{ J = \frac{1}{2} x^T(T) F x(T) + \frac{1}{2} \int_0^T (x^T(t) Q x(t) + u^T R u) dt \right\} \quad (3.23)$$

E : l'espérance mathématique

Pour résoudre ce problème de commande stochastique, il sera presque toujours nécessaire d'insérer un reconstruteur d'état (tel que le filtre de Kalman) entre les mesures et l'optimalisateur



Figure 3.4. Reconstruteur d'état

Théorème de séparation

La solution de ce problème de commande optimale de processus stochastique est bien connue sous le nom de théorème de séparation. Ce théorème énonce que la solution du problème est composée de deux parties :

- un observateur de Kalman permettant de donner l'estimée \hat{x} de x qui est non biaisée et à variance minimale,
- la commande par retour d'état $u = -K\hat{x}$ à appliquer à \hat{x} où K est calculé en considérant le problème LQ correspondant.

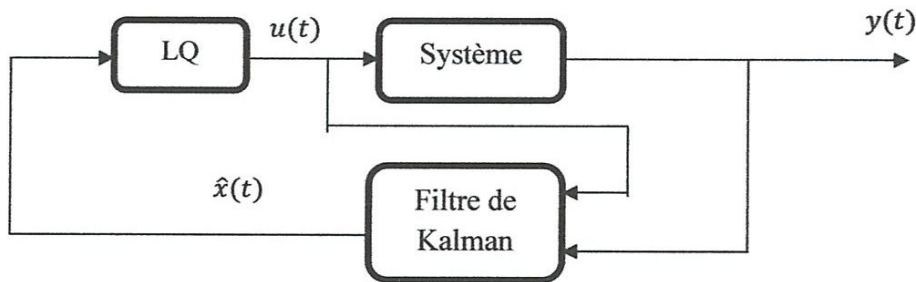


Figure 3.5: Commande LQG (Observateur de Kalman+LQ)

III.5.3. Filtre de Kalman et commande stochastique

a. Position de problème

Soit le système aléatoire donné par :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + v(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + \omega(t) \end{cases} \quad (3.24)$$

Où $v(t)$ et $w(t)$ des bruits blancs gaussiens centrés, de covariances $Q_v \cdot \delta(\tau)$ et $R_w \cdot \delta(\tau)$ telque :

$$Q_v = Q_v^T \geq 0 \text{ et } R_w = R_w^T \geq 0$$

$x(0) = x_0$ est aléatoire de moyenne \bar{x}_0 et de covariance Σ_0 , le problème consiste à trouver la commande $u^*(t)$ qui minimise le critère quadratique :

$$J = E \left[\frac{1}{2} x^T(T) F x(T) + \frac{1}{2} \int_0^T (x^T(t) Q x(t) + u^T(t) R u(t)) dt \right] \quad (3.25)$$

Le principe est de trouver la solution du problème de commande optimale en boucle fermée, où l'état aléatoire $x(t)$ est remplacé par son estimé $\hat{x}(t)$.

$$\min_{u(t)} E[J] \rightarrow u^*(t) = -R^{-1} B^T p(t), \hat{x}(t) \quad (3.26)$$

b. Filtre de Kalman

Reprenons le modèle d'état :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + v(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) + \omega(t) \end{cases} \quad (3.27)$$

(A, C) est observable.

Les signaux $v(t)$ et $w(t)$ sont des bruits blancs gaussiens centrés (moyennes nulles) et de densités spectrales de puissance Q_v et R_v , c'est-à-dire :

$$E[v(t) \cdot v^T(t + \tau)] = Q_v \delta(\tau)$$

$$E[\omega(t) \cdot \omega^T(t + \tau)] = R_w \delta(\tau)$$

$v(t)$ et $w(t)$ sont indépendant (incorrélabile) c'est-à-dire :

$$E[v(t) \cdot \omega^T(t + \tau)] = 0$$

Remarque

Bien que la théorie du filtre de Kalman est valable pour le cas non stationnaire, on suppose que le système est invariant.

Le filtre de Kalman (observateur dans le cas stochastique) est donné par :

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t) - Du(t))$$

Soit $e(t) = x(t) - \hat{x}(t)$ et $e_0 = x_0 - \hat{x}_0$, donc :

$$\begin{aligned} \dot{e}(t) &= \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) = Ax(t) + Bu(t) + v(t) - A\hat{x}(t) - bu(t) - L(y(t) - C\hat{x}(t) - Du(t)) \\ &= (A - LC)x(t) - (A - LC)\hat{x}(t) + v(t) - L\omega(t) \\ \dot{e}(t) &= (A - LC)e(t) + v(t) - L\omega(t) \end{aligned}$$

Puisque $v(t)$ et $w(t)$ sont gaussiennes implique que $e(t)$ est gaussienne, on s'intéresse donc à la moyenne de $e(t)$:

$$E[\dot{e}(t)] = (A - LC)E[e(t)] + E[v(t)] - LE[\omega(t)]$$

$$E[v(t)] = 0, E[\omega(t)] = 0$$

Si $(A - LC)$ est stable alors : $\lim_{t \rightarrow \infty} E[\dot{e}(t)] = 0$

On s'intéresse à déterminer L qui minimise la covariance de l'erreur d'estimation :

$$\min_L E[(x - \hat{x})(x - \hat{x})^T] \Leftrightarrow \min_L E[e \cdot e^T]$$

Soit $p(t)$ la matrice de covariance de l'erreur d'estimation :

$$p(t) = E[e \cdot e^T] \text{ Symétrique}$$

D'autre part, on a :

$$E \left[\begin{pmatrix} v(t) \\ \omega(t) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} v^T(t + \tau) & \omega^T(t + \tau) \end{pmatrix} \right] = \begin{bmatrix} Q_v & 0 \\ 0 & R_\omega \end{bmatrix} \cdot \delta(\tau)$$

1. Cas continu

Soit le système linéaire :

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + b(t)$$

$b(t)$ est un bruit blanc gaussien stationnaire de covariance $\omega \cdot \delta(\tau)$, \bar{x}_0 et $p(t_0)$ sont la moyenne et la covariance de $x(t_0)$.

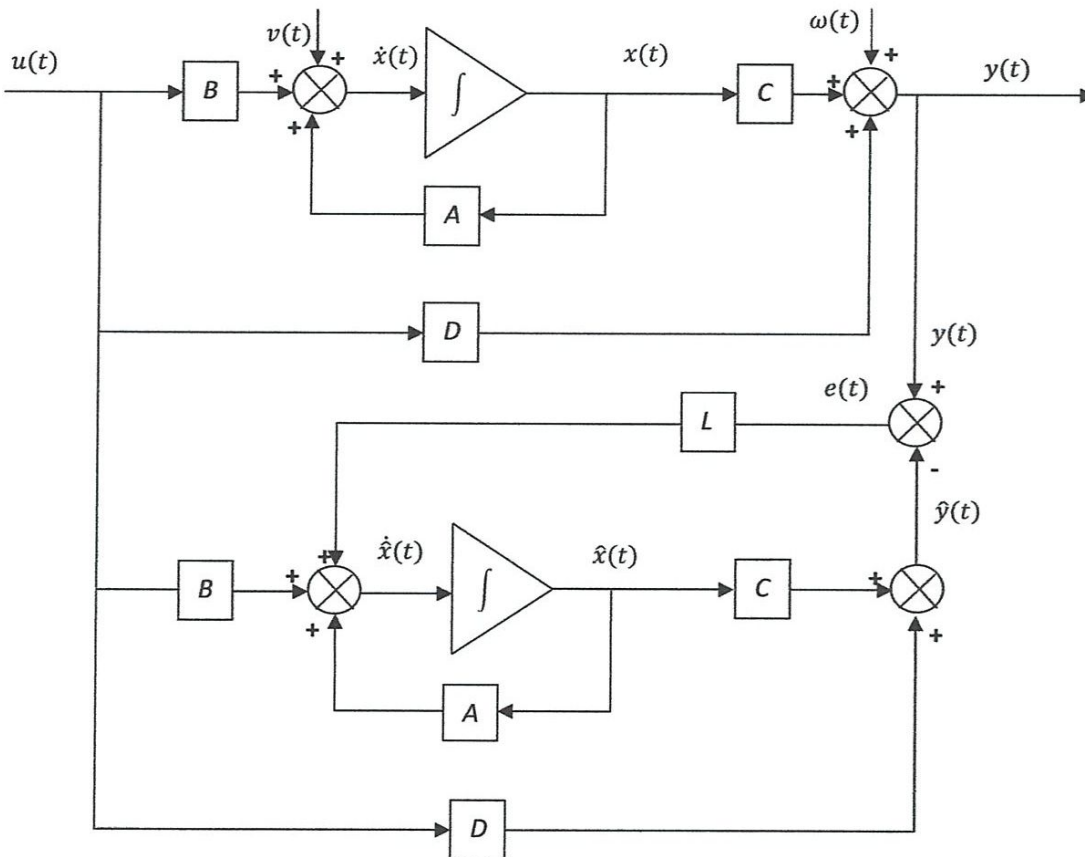


Figure 3.6. Structure du filtre de Kalman

Alors $x(t)$ est un signal aléatoire gaussien de moyenne

$$\mu_x = E[x(t)] = e^{A(t-t_0)} \cdot \bar{x}_0$$

Et de covariance :

$$p(t) = E[(x - \mu_x)(x - \mu_x)^T]$$

Vérifiant l'équation :

$$\dot{p}(t) = Ap(t) + p(t)A^T + \omega$$

En appliquant ce théorème, on peut écrire :

$$\begin{aligned} \dot{p}(t) &= (A - LC)p(t) + p(t)(A - LC)^T + [I_{n \times n} \quad -L] \begin{bmatrix} Q_v & 0 \\ 0 & R_\omega \end{bmatrix} \\ &= (A - LC)p(t) + p(t)(A - LC)^T + Q_v + LR_\omega L^T \end{aligned}$$

Pour minimiser $p(t)/L$ il suffit de minimiser $\text{trace}(\dot{p}(t)/L)$.

$$\frac{\partial(\text{trace}(\dot{p}))}{\partial L} = \frac{\partial p}{\partial L} = -pC^T - pC^T + 2LR_\omega = 0$$

R_ω : matrice de covariance symétrique

$$\Rightarrow L = p(t)C^T R_\omega^{-1} \quad (3.28)$$

On remplace dans l'équation, on obtient :

$$\dot{p}(t) = Ap(t) + p(t)A^T - p(t)C^T R_\omega^{-1} Cp(t) + Q_v \quad (3.29)$$

Equation de Riccati

L'intégration de cette équation de Riccati est initialisée par :

$$p(t_0) = E[(x(t_0) - \hat{x}(t_0))(x(t_0) - \hat{x}(t_0))^T]$$

Résumé du Filtre de Kalman

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t) - Du(t))$$

$$L = p(t)C^T R_\omega^{-1}$$

$$\dot{p}(t) = Ap(t) + p(t)A^T - p(t)C^T R_\omega^{-1} Cp(t) + Q_v$$

Régime permanent du filtre de Kalman

Une fois le régime transitoire passé dans un système invariant (dû aux erreurs d'initialisations), l'erreur d'estimation devient un signal stationnaire, c'est-à-dire :

$$\dot{p}(t) = 0 \Rightarrow p(t) = c^{te}$$

L'équation de Riccati devient :

$$Ap(t) + p(t)A^T - p(t)C^T R_\omega^{-1} Cp(t) + Q_v = 0$$

$p(t)$: matrice constante semi définie positive.

1. Cas discret

On considère le système discret suivant :

$$\begin{cases} x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + v(k) \\ y(k) = Cx(k) + \omega(k) \end{cases} \quad (3.30)$$

Où $v(k)$, $w(k)$ sont des bruits blancs gaussiens non corrélés

$$\begin{cases} E[v(k)] = 0 \\ E[v(k)v^T(i)] = \delta(k-i) \cdot Q_v \end{cases}, \quad \begin{cases} E[\omega(k)] = 0 \\ E[\omega(k)\omega^T(i)] = \delta(k-i) \cdot R_\omega \end{cases}$$

et avec les conditions initiales :

$$\begin{cases} E[x(0)] = \bar{x}_0 \\ E[x(0)x^T(0)] = p(0) \end{cases}$$

L'algorithme du filtre de Kalman discret est le suivant :

$$\begin{aligned} \hat{x}(k+1/k) &= A\hat{x}(k/k) + Du(k) \\ \dot{x}(k+1/k) &= A\dot{x}(k/k) + Bu(k) \\ \hat{y}(k+1/k) &= C\hat{x}(k+1/k) \\ p(k+1/k) &= Ap(k/k)A^T + Q_v \\ L(k+1) &= p(k+1/k)C^T [Cp(k+1/k)C^T + R_w]^{-1} \\ \hat{x}(k+1/k+1) &= \hat{x}(k+1/k) + L(k+1)(y(k+1) - \hat{y}(k+1/k)) \\ p(k+1/k+1) &= [I - L(k+1)C]p(k+1/k) \end{aligned}$$

III.5.4. Commande linéaire quadratique gaussien (LQG)

Considérons le système régi par les équations :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + v(t) \\ y(t) = Cx(t) + \omega(t) \end{cases}$$

Où $v(t)$ et $w(t)$ sont des bruits gaussiens

$$E[v(t)] = E[\omega(t)] = 0$$

On s'intéresse à développer une commande par retour d'état optimal minimisant le critère donné par :

$$J = E \left[\frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)) dt \right]$$

La solution de ce problème est obtenue en combinant la commande linéaire quadratique (LQ) avec le filtre de Kalman.

1. résoudre le problème de la commande LQ qui minimise le critère J

$$u^*(t) = -Kx(t)$$

2. résoudre le problème de l'estimation optimale par filtre de Kalman
3. prendre le retour d'état optimal :

$$u^*(t) = -K\hat{x}(t)$$

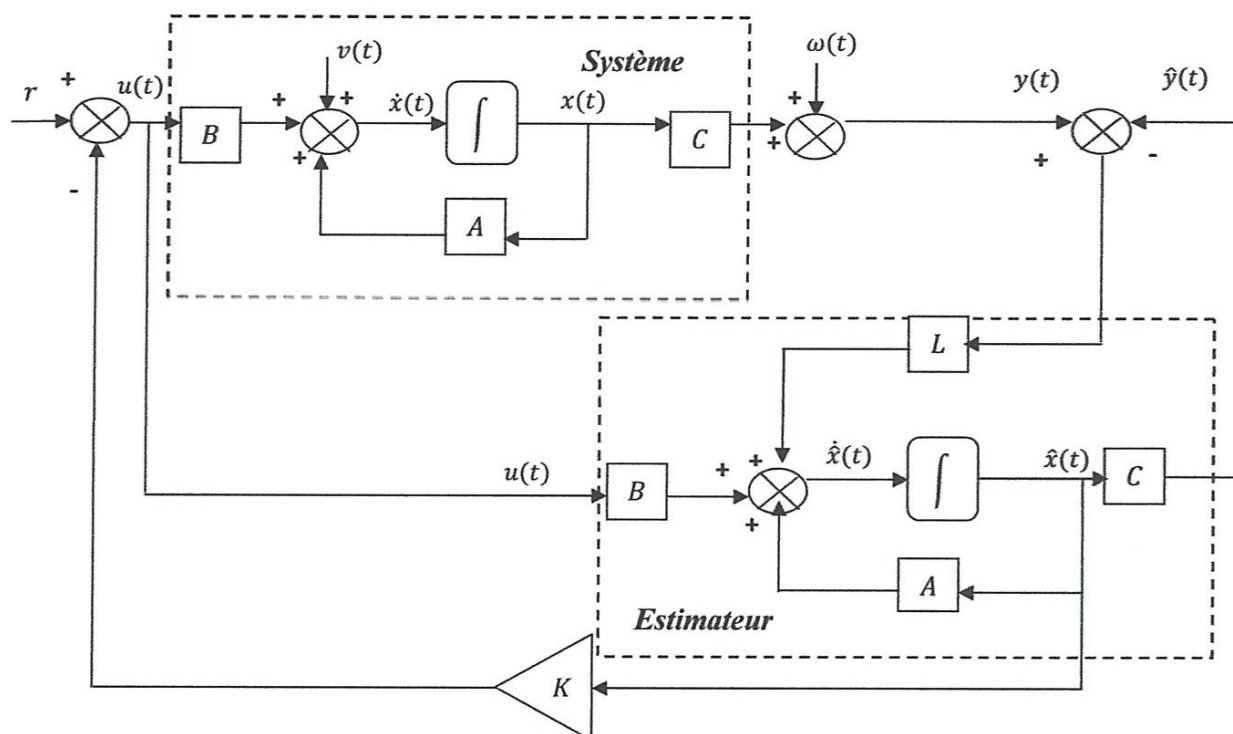


Figure 3.7. Structure de la commande LQG

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une commande quadratique linéaire (LQ) qui sera utilisée pour commander notre système éolien, ainsi que son extension au cas stochastique à savoir la commande linéaire gaussien LQG.

Chapitre IV :

Commande LQ de l'éolienne : simulation

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous voulons commander notre système éolien à savoir le modèle souple (à deux masses) soit, à vent faible ou à vent fort, présentés en chapitre 2 en utilisant la commande linéaire quadratique (LQ). Nous envisageons donc de développer une loi de commande permettant une régulation optimale de la vitesse de rotation de l'éolienne et de la puissance électrique générée autour de leurs valeurs nominales. Cette régulation doit être réalisée aussi avec des variations admissibles voire minimales des grandeurs de commande à savoir le couple électromagnétique C_{em} et l'angle de calage β .

Ces modèles qui sont en continus doivent les transférer en mode discret avant de les commander.

Les objectifs recherchés par une commande quadratique sont [3] :

- Différencier les performances de commande pour la puissance électrique et la vitesse.
- Minimiser les fluctuations des grandeurs de commande, à savoir le couple électromagnétique C_{em} et l'angle de calage β .
- Assurer les performances en garantissant une robustesse de la commande.

IV.2. Synthèse d'une loi de commande optimale quadratique

Nous envisageons dans ce chapitre de développer une loi de commande permettant une régulation optimale de la vitesse de rotation de l'éolienne et de la puissance électrique générée autour de leurs valeurs nominales. Cette régulation doit être réalisée aussi avec des variations admissibles voire minimales des grandeurs de commande à savoir le couple électromagnétique C_{em} et l'angle de calage β [3].

IV.3. Critère quadratique

Le critère J représente un compromis entre les performances de la régulation recherchées représentées par le terme:

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} (\Delta y^T Q \Delta y) dt = \frac{1}{2} \sum_i \int_0^{+\infty} (q_{ii} \Delta y_i^2) dt \quad (4.1)$$

et la minimisation de l'énergie de commande représentée par le terme :

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{+\infty} (\Delta u^T R \Delta u) dt = \frac{1}{2} \sum_j \int_0^{+\infty} (r_{jj} \Delta u_j^2) dt \quad (4.2)$$

Il est à noter que le choix des coefficients q_{ii} et r_{jj} des matrices Q et R se fait en fonction de l'attente de l'utilisateur quant à la dynamique de chaque sortie Δy_i et la minimisation des variations de chaque grandeur d'entrée Δu_j

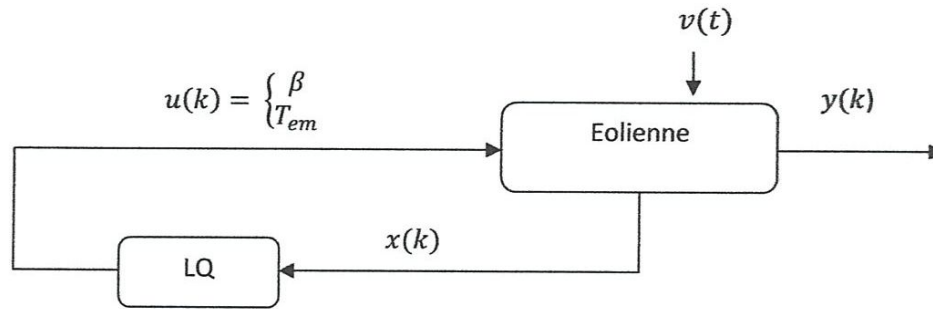


Figure 4.1. commande linéaire quadratique LQ d'une éolienne

IV.4. Commande LQ d'une éolienne à vent faible

L'objectif principal de la commande d'une éolienne, à vents faibles, est d'extraire le maximum d'énergie du vent en faisant tourner l'éolienne à une vitesse proportionnelle à la vitesse du vent.

Le modèle à vent faible en mode continu est donné par l'équation (2.28) comme suit :

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\gamma - K_r}{J_r} & 0 & -\frac{1}{J_r} \\ 0 & -\frac{K_g}{J_g} & \frac{1}{n_g J_g} \\ \left(B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r}\right) + \frac{\gamma K_{ls}}{J_r} & \frac{1}{n_g} \left(\frac{K_{ls} K_g}{J_g} - B_{ls}\right) & -K_{ls} \left(\frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ -\frac{1}{J_g} \\ \frac{K_{ls}}{n_g J_g} \end{pmatrix} T_{em} + \begin{pmatrix} \frac{\alpha}{J_r} \\ 0 \\ \frac{\alpha K_{ls}}{J_r} \end{pmatrix} v \quad (4.3)$$

Nous avons pris comme valeurs nominales à vent faibles les valeurs suivantes:

$$\lambda_{nom} = 6.25, \quad \beta_{nom} = 0, \quad v_{vent-nom} = 8 \text{ m/s}, \quad \omega_{T_{nom}} = 12 \text{ Tr/m}, \\ p_{nom} = 642 \text{ kW}$$

Tableau 4.1. Caractéristiques de l'éolienne

Paramètre	Signification
$R = 40$ m	Rayon du rotor
$p = 1.22$ kg/m ³	Masse volumique de l'air
$J_r = 4.9.10^6$ kg.m ²	Inertie des masses du côté du rotor
$J_g = 0.9.10^6$ kg.m ²	Inertie des masses du côté de la génératrice
$K_r = 27.36$ N.m/rad/s	Coefficient de frottements visqueux externes du rotor
$K_g = 0.2$ N.m/rad/s	Coefficient de frottements visqueux externes de la génératrice
$K_{ls} = 3.5.10^5$ N.m/rad/s	Coefficient de frottements visqueux internes de l'arbre lent
$B_{ls} = 114.10^6$ N.m/rad	Coefficient de torsion de l'arbre lent
$n_g = 92.6$	Rapport de transmission du multiplicateur

Par application numérique des valeurs de l'éolienne données au tableau (4.1), on obtient les équations d'état et de mesure suivantes :

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.0061 & 0 & -2.0408 * 10^{-7} \\ 0 & -2.2222 * 10^{-7} & 1.1999 * 10^{-8} \\ 1.1400 * 10^8 & -1.2311 * 10^6 & -0.0715 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix} \\ + \begin{pmatrix} 0 \\ -1.1111 * 10^{-6} \\ 0.0042 \end{pmatrix} T_{em} + \begin{pmatrix} 0.0361 \\ 0 \\ 1.2642 * 10^4 \end{pmatrix} v \\ y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix}$$

D'après les valeurs propres de la matrice

$$A = \begin{pmatrix} -0.0061 & 0 & -2.0408 * 10^{-7} \\ 0 & -2.2222 * 10^{-7} & 1.1999 * 10^{-8} \\ 1.1400 * 10^8 & -1.2311 * 10^6 & -0.0715 \end{pmatrix}$$

qui sont : $p_1 = -0.0366 + 4.8248i$, $p_2 = -0.0366 - 4.8248i$, $p_3 = -0.0000 + 0.0000i$

le système est instable car la troisième valeur est égale à 0.

en mode discret le modèle est donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) + G_d v(k) \\ y(k) = C_d x(k) + D_d u(k) + w(k) \end{cases} \quad (4.4)$$

$$\text{Avec : } A_d = \begin{pmatrix} 0.8860 & 0.0012 & -1.9554.10^{-8} \\ 0.0067 & 0.9999 & 1.1498.10^{-9} \\ 1.0923.10^{+7} & -1.1797.10^{-5} & 0.8793 \end{pmatrix}, B_d = \begin{pmatrix} -5.0097.10^{-11} \\ -1.1111.10^{-7} \\ 0.0071 \end{pmatrix}$$

$$C_d = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_d = (0)$$

Les valeurs propres de la matrice A_d sont :

$$p_1 = 0.8826 + 0.4623i, p_2 = 0.8826 - 0.4623i, p_3 = 1.0000 + 0.0000i$$

Il apparut que le pôle p_3 se trouve sur le cercle unité donc le système oscille et il est instable. On doit chercher une commande qui le rend stable en plus, en boucle fermée.

L'application de la commande LQ sur ce modèle discret à vent faible dont le but est d'exploiter au maximum l'énergie capturée et donc l'énergie produite par l'éolienne à travers la commande du couple de la génératrice, dont la loi de commande est donné par :

$$\underline{u}^\circ(k) = -(R + B_d^T F(k+1)B_d)^{-1} B_d^T F(k+1) A_d \underline{x}(k) \quad (4.5)$$

$$\underline{u}^\circ(k) = -\underline{K}(k) \underline{x}(k) \quad (4.6)$$

Avec :

$$\underline{K}(k) = (R + B_d^T F(k+1)B_d)^{-1} B_d^T F(k+1) A \quad (4.7)$$

$$F(k) = Q + A^T F(k+1)A - A^T F(k+1)B(R + B^T F(k+1)B)^{-1} B^T F(k+1)A \quad (4.8)$$

Cette dernière équation s'appelle équation de Riccati discrète et F matrice de Riccati.

La figure 4.2 montre la courbe de la commande $u = T_{em}$ qui est le couple électromagnétique qui fait tourner la génératrice, voir figure 4.4.

Donc on peut dire que la vitesse de rotation de la génératrice est stable, c'est-à-dire, pas de fluctuations remarquables, ce qui nous assure une bonne qualité du produit.

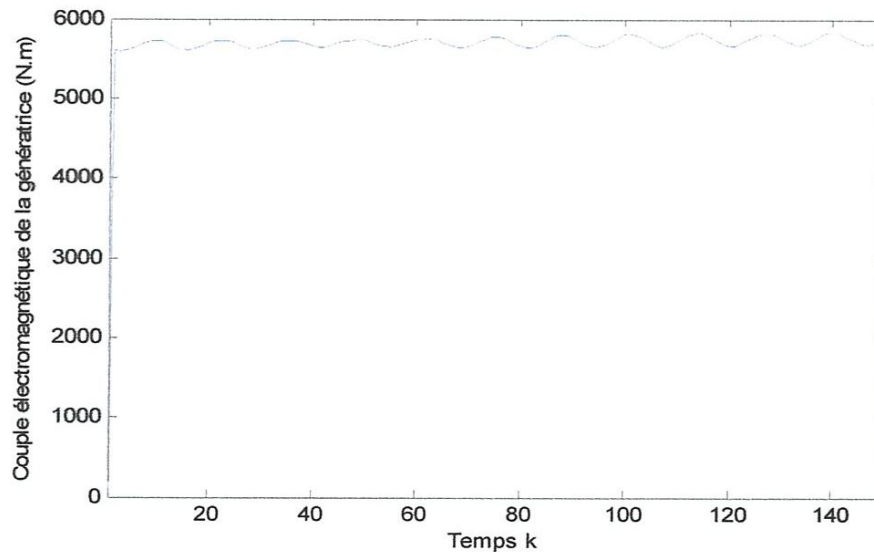


Figure 4.2. Commande $u(k)=T_{em}$ (couple électromagnétique de la génératrice) (N.m)

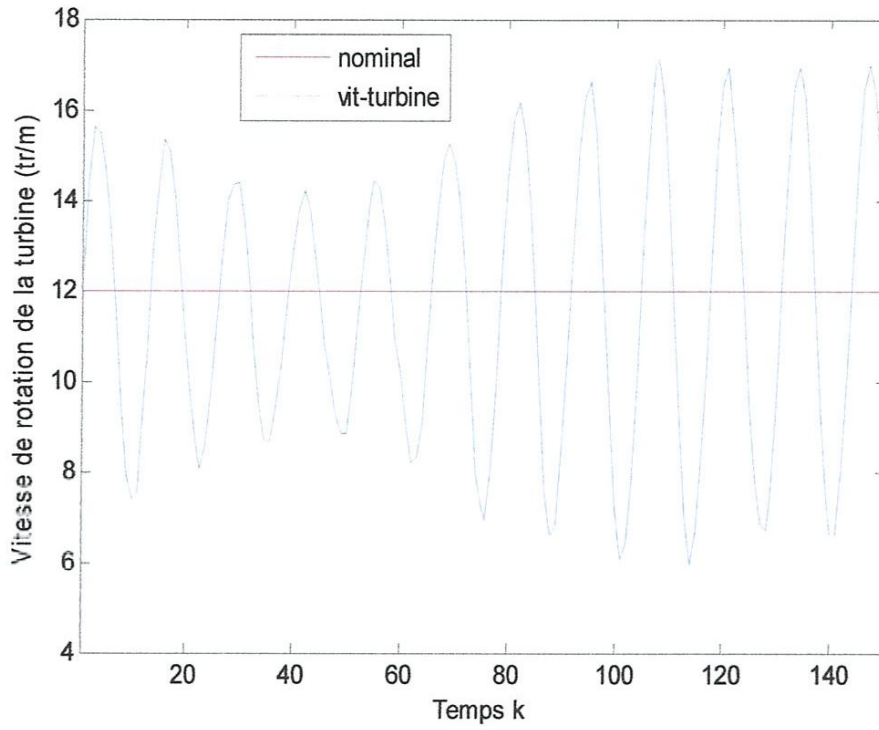


Figure 4.3. Vitesse de rotation de la turbine autour de la vitesse nominale (Tr/m)

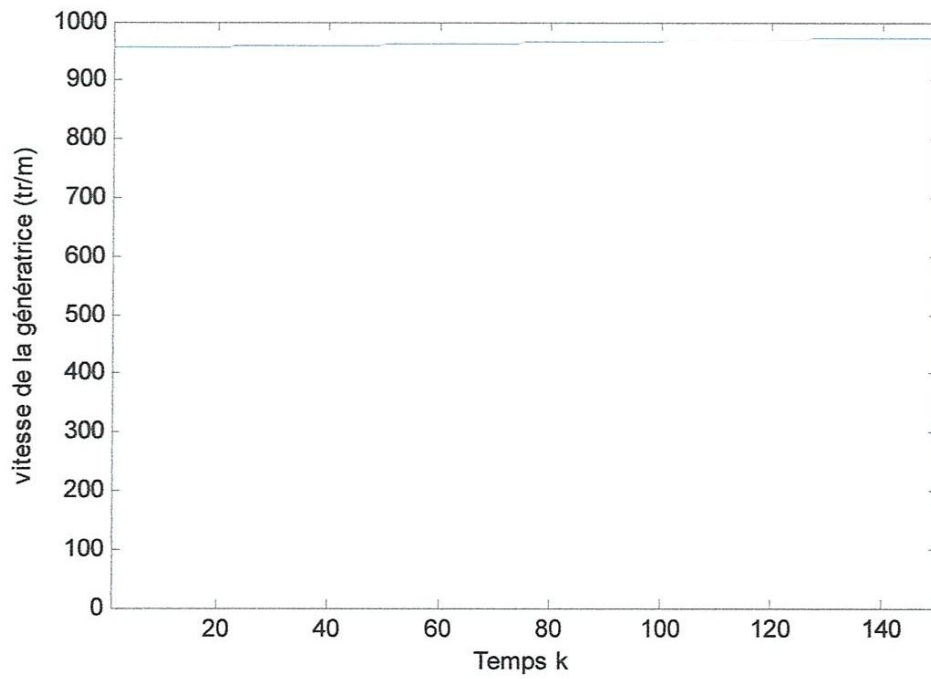


Figure 4.4. Vitesse de rotation de la génératrice (Tr/m)

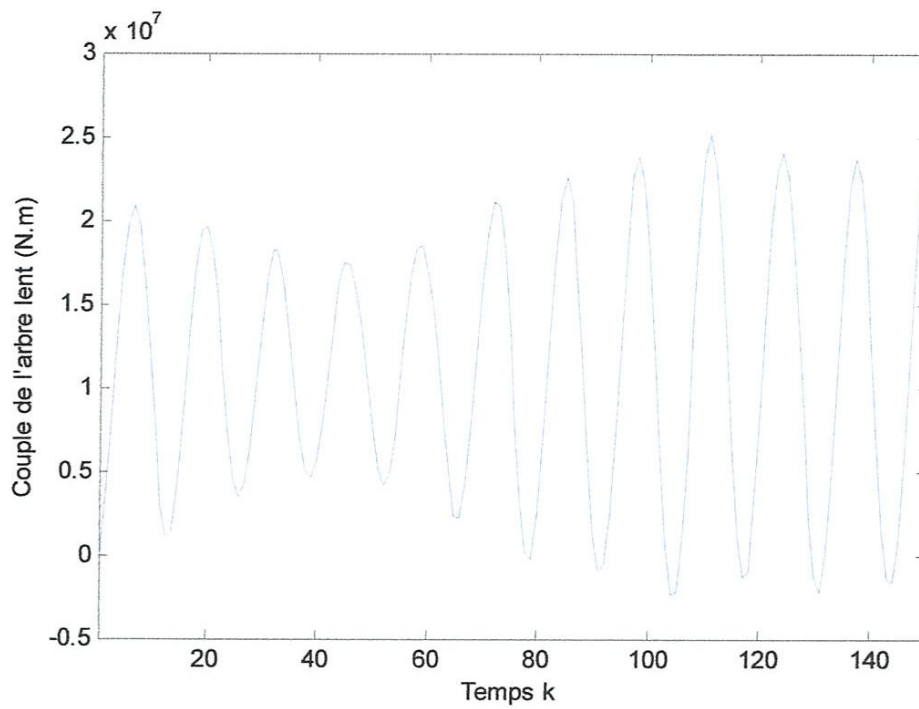


Figure 4.5. Couple de l'arbre lent (Tr/m)

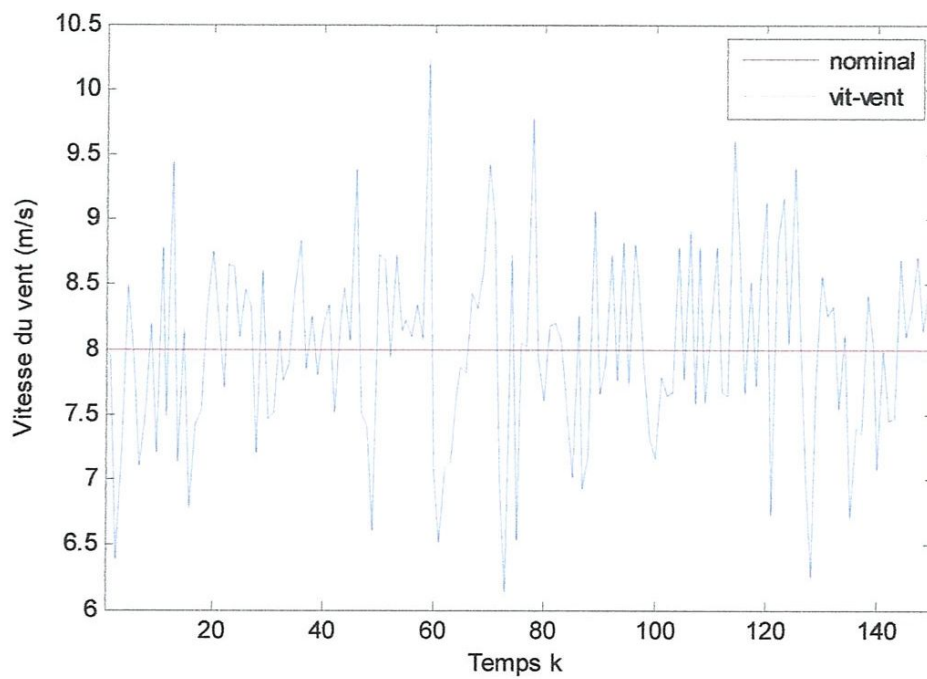


Figure 4.6. Vitesse du vent autour de la vitesse nominale (m/s)

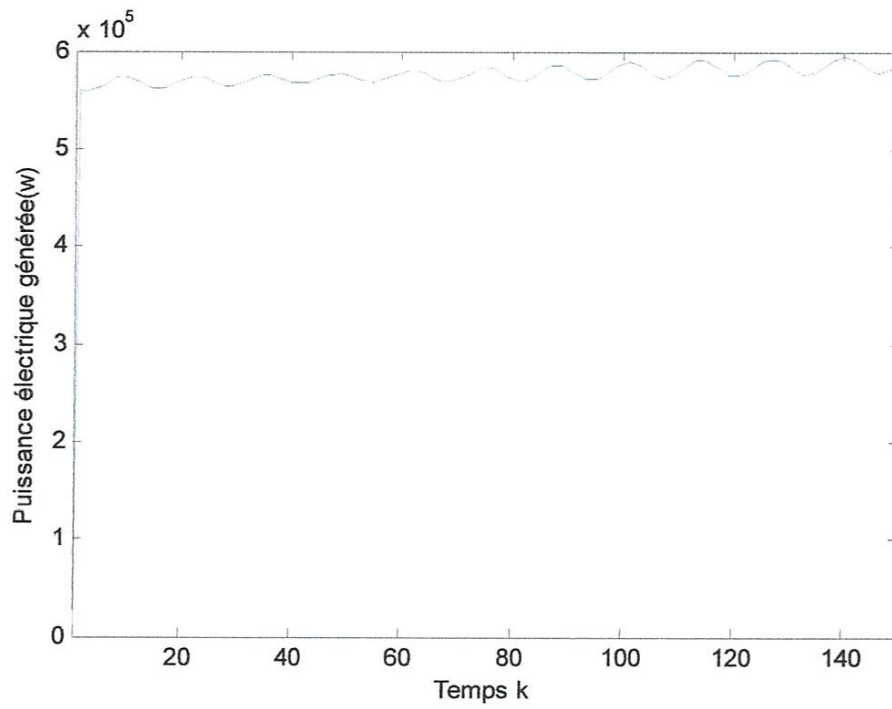


Figure 4.7. Puissance électrique générée par la génératrice (W)

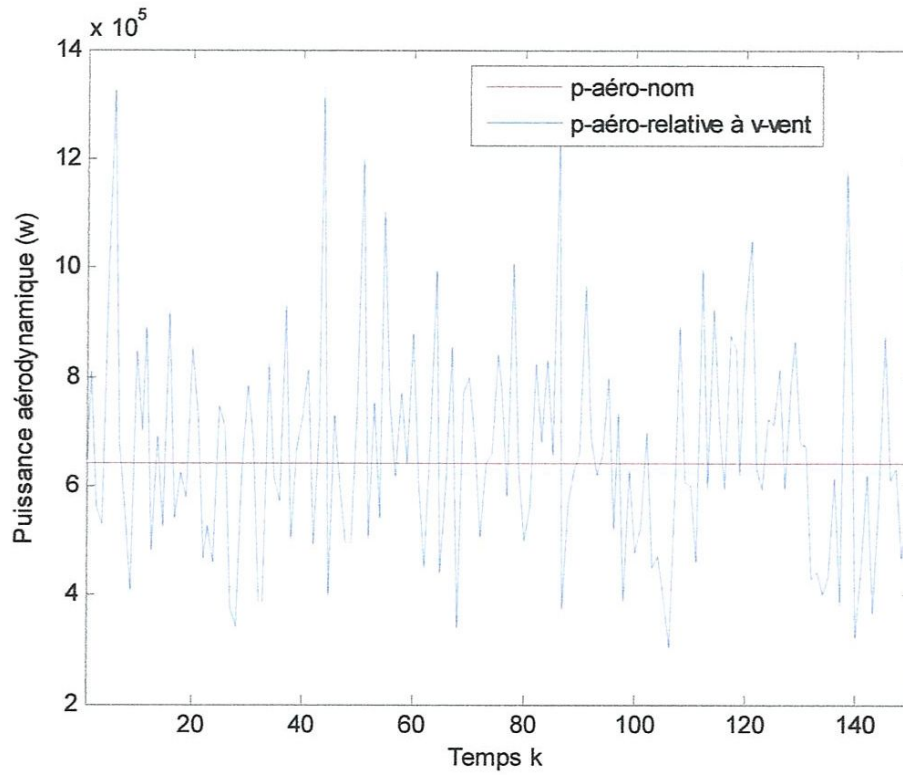


Figure 4.8. Puissance aérodynamique relative à la vitesse du vent généré (W)

Comme on a dit précédemment le but de notre commande pour des vents faibles est de maximiser la puissance générée, et d'après les résultats tracés, on voit clairement qu'au moyen de la commande LQ la puissance électrique générée par la génératrice voir figure 4.7 est très proche de la puissance aérodynamique nominale figure 3.8, chose très attendu lorsque on voit la vitesse de rotation de la turbine proche de la vitesse nominale figure 4.3, cette dernière est relative à la vitesse du vent figure 4.6 qui est proche de la vitesse nominale.

Le fait de mettre l'angle de calage égale à zéro et de faire commander seulement la puissance générer à travers le couple du génératrice peut engendrer des fluctuations au niveau de la vitesse de rotation du rotor et automatiquement des fluctuations au niveau de la vitesse de rotation de la turbine, c'est pour cela, on est besoin dans la section à vents forts de voir l'effet que puisse apporter l'ajout de l'angle de calage comme une autre commande sur le vitesse du rotor.

IV.5. Commande LQ d'une éolienne à vent fort

Cette section est consacrée pour la commande du système éolien lorsque les vents sont forts. Dans cette zone de fonctionnement, le système de commande a pour objectif de réduire les fluctuations de la puissance et de la vitesse du rotor, tout en réduisant les efforts de commande. Pour commander une éolienne à vitesse variable et calage variable, deux moyens sont possibles : le calage des pales et le couple de la génératrice.

Nous allons considérer la représentation d'état précédente en ajoutant à la commande précédente un autre paramètre de contrôle qui est l'angle de calage β , c'est-à-dire, cette fois nous avons deux variables de contrôle ; le couple électromagnétique de la génératrice T_{em} et l'angle de calage β .

Les variables à contrôler sont toujours la vitesse de la turbine ω_T et la puissance électrique générée par la génératrice P_e

Par l'ajout de la deuxième commande à savoir l'angle de calage β , le système est devenu multi-variable, donc, le modèle souple de l'éolienne à vents forts est un système multi-variable, sa représentation d'état est comme suit :

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \frac{\gamma - K_r}{J_r} & 0 & \frac{1}{J_r} \\ 0 & -\frac{K_g}{J_g} & \frac{1}{n_g J_g} \\ \left(B_{ls} - \frac{K_{ls} K_r}{J_r}\right) + \frac{\gamma K_{ls}}{J_r} & \frac{1}{n_g} \left(\frac{K_{ls} K_g}{J_g} - B_{ls}\right) & -K_{ls} \left(\frac{J_r + n_g^2 J_g}{n_g^2 J_g J_r}\right) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix} \\
 + \begin{pmatrix} \frac{\delta}{J_r} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{J_g} \\ \frac{\delta K_{ls}}{J_r} & \frac{K_{ls}}{n_g J_g} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ T_{em} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} \frac{\alpha}{J_r} \\ 0 \\ \frac{\alpha K_{ls}}{J_r} \end{pmatrix} v \quad (4.9)$$

Les valeurs nominales prises à vents forts sont:

$$\lambda_{nom} = 5.03 \text{ rad}, \quad \beta_{nom} = 9^\circ, \quad v_{vent-nom} = 15 \text{ m/s}, \quad \omega_{T_{nom}} = 18 \text{ Tr/m}, \\
 p_{nom} = 2 \text{ MW}$$

Par application numérique des valeurs de l'éolienne données au tableau (4.1), on obtient les équations d'état et de mesure suivantes :

$$\begin{pmatrix} \dot{\omega}_t \\ \dot{\omega}_g \\ \dot{T}_{ls} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} -0.9446 & 0 & -2.0408 \cdot 10^{-7} \\ 0 & -2.2222 \cdot 10^{-7} & 1.1999 \cdot 10^{-8} \\ 1.1400 \cdot 10^8 & -1.2311 \cdot 10^6 & -0.0715 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix} \\
 + \begin{pmatrix} -0.0016 & 0 \\ 0 & -1.1111 \cdot 10^{-6} \\ -3.0872 \cdot 10^{+5} & 0.0042 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ T_{em} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0.0361 \\ 0 \\ 1.2642 \cdot 10^4 \end{pmatrix} v \\
 y = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \omega_t \\ \omega_g \\ T_{ls} \end{pmatrix}$$

La matrice A possède deux valeurs propres à parties réelles négatives et le la troisième est nulle, donc le système est instabilité.

En mode discret le modèle est donné par les équations suivantes :

$$\begin{cases} x(k+1) = A_d x(k) + B_d u(k) + G_d v(k) \\ y(k) = C_d x(k) + D_d u(k) + w(k) \end{cases}$$

$$\text{Avec : } A_d = \begin{pmatrix} 0.8860 & 0.0210 & -1.0093 \cdot 10^{-8} \\ 0.1143 & 0.9988 & 5.9948 \cdot 10^{-10} \\ 5.6377 \cdot 10^{+6} & -6.1507 \cdot 10^{+4} & -0.9490 \end{pmatrix},$$

$$B_d = \begin{pmatrix} -0.0016 & -5.0097 \cdot 10^{-11} \\ -0.0010 & -1.1111 \cdot 10^{-7} \\ -3.0872 \cdot 10^{+5} & 0.0071 \end{pmatrix}$$

$$C_d = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}, \quad D_d = (0)$$

La matrice A_d possède trois valeurs propres, deux valeurs sont stables et le troisième se trouve sur le cercle unité, donc il est instable.

Pour la simulation, nous nous référons à un vent variable de vitesse moyenne égale à 15m/s qui permet à l'éolienne d'enregistrer une puissance aérodynamique nominale $P_{aero} = 2 MW$ et ce pour une vitesse de rotation nominale de la turbine $\omega_{T_{nom}} = 18 tr/min$

D'après le vitesse de vent générée figure 4.9 qui est autour de la valeur nominale, on voit clairement dans les figures 4.11 et 4.12 que la commande LQ a la puissance de délivrer des commandes (couple généré par la génératrice et l'angle de pitch des pales) qui rendent la turbine tourne au voisinage de la vitesse de rotation nominale figure 4.10, cette vitesse de rotation permet à la génératrice de tourner à une vitesse figure 4.13, proportionnelle à son couple et donc de générer la puissance souhaitée, figure 4.15, c'est-à-dire très proche de la puissance aérodynamique nominale, figure 4.16.

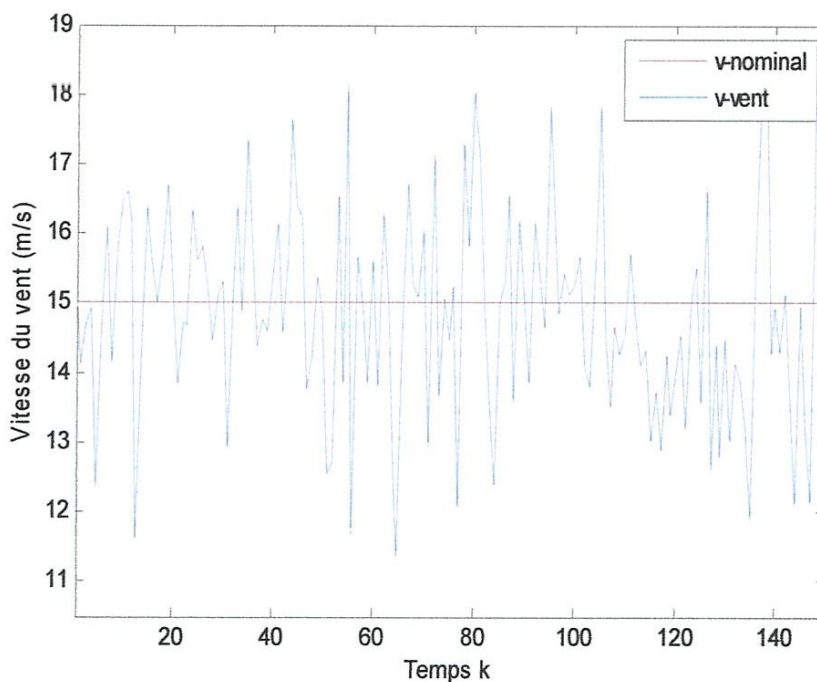


Figure 4.9. Vitesse du vent autour de la vitesse nominale (m/s)

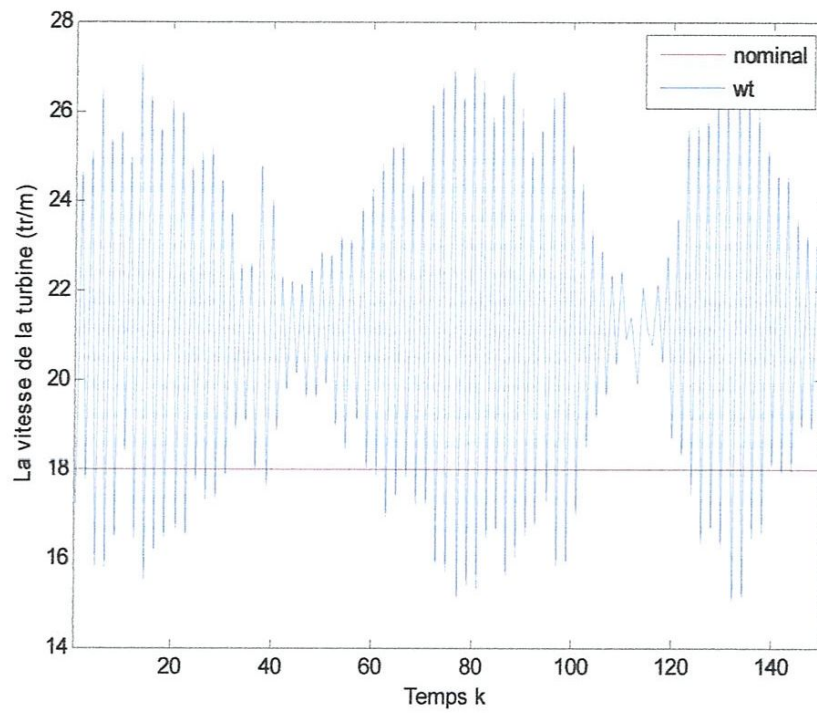


Figure 4.10. Vitesse de rotation de la turbine autour de la vitesse nominale (Tr/m)

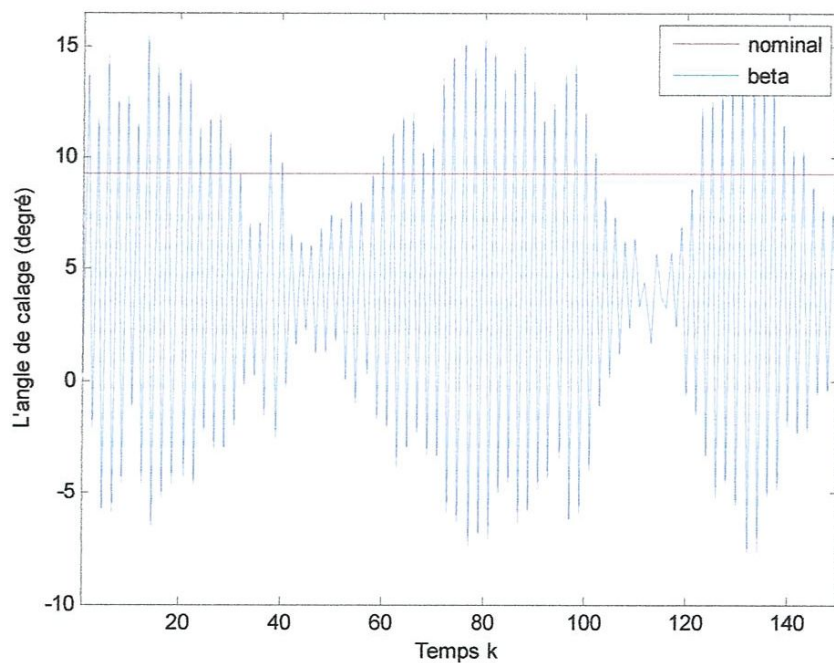


Figure 4.11. La commande $u_1(k) = \beta$ angle de calage autour de sa valeur nominale (°degré)

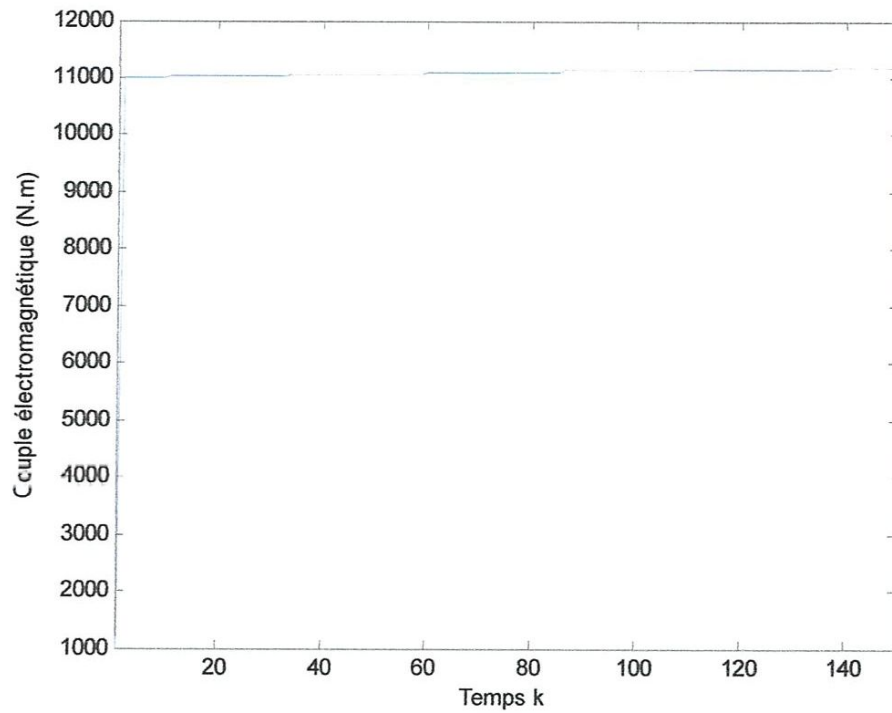


Figure 4.12. La commande $u_2(k) = T_{em}$ couple électromagnétique de la génératrice (N.m)

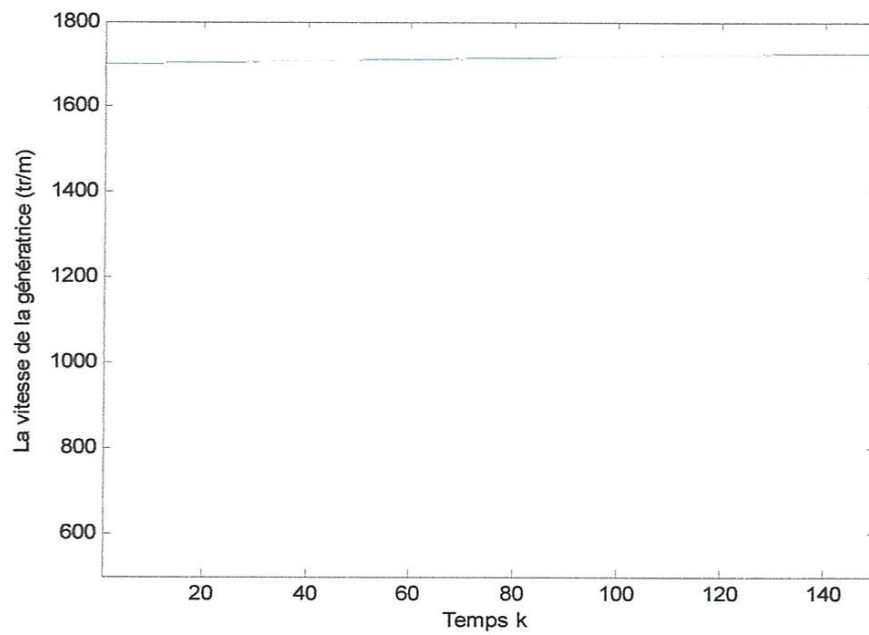


Figure 4.13. Vitesse de rotation de la génératrice (Tr/m)

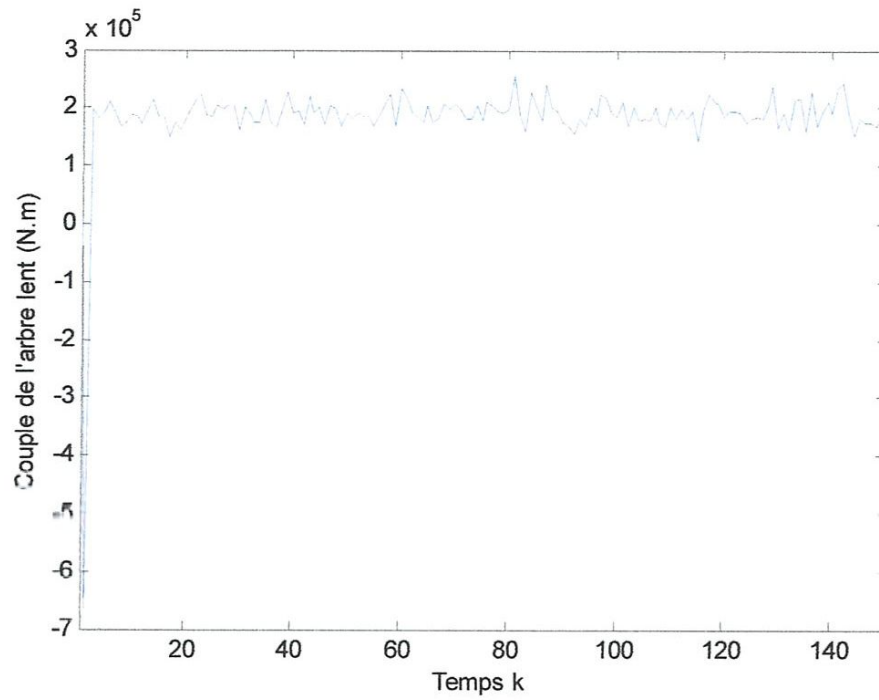


Figure 4.14. Couple de l'arbre lent (Tr/m)

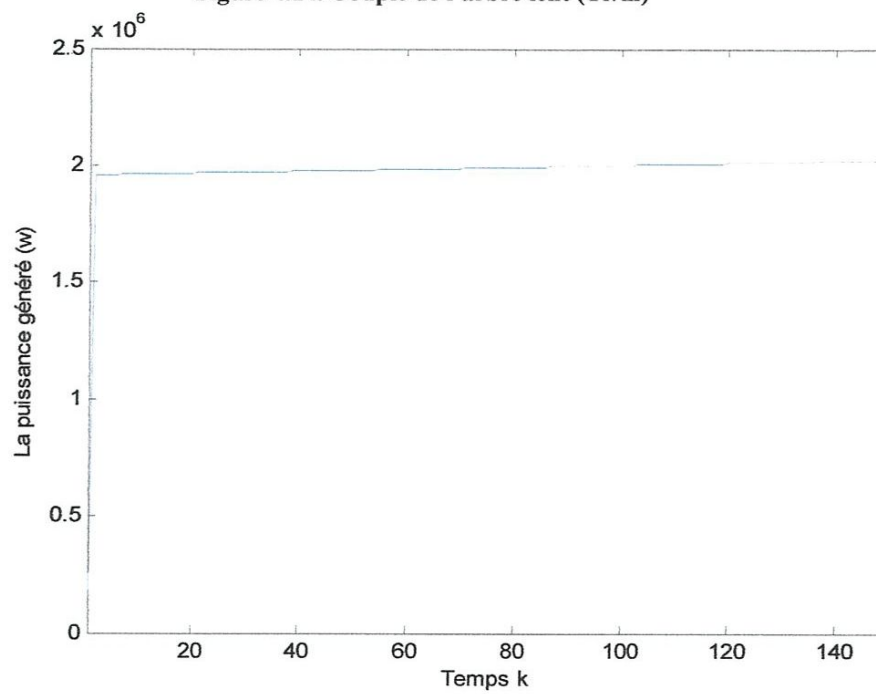


Figure 4.15. Puissance électrique générée par la génératrice (W)

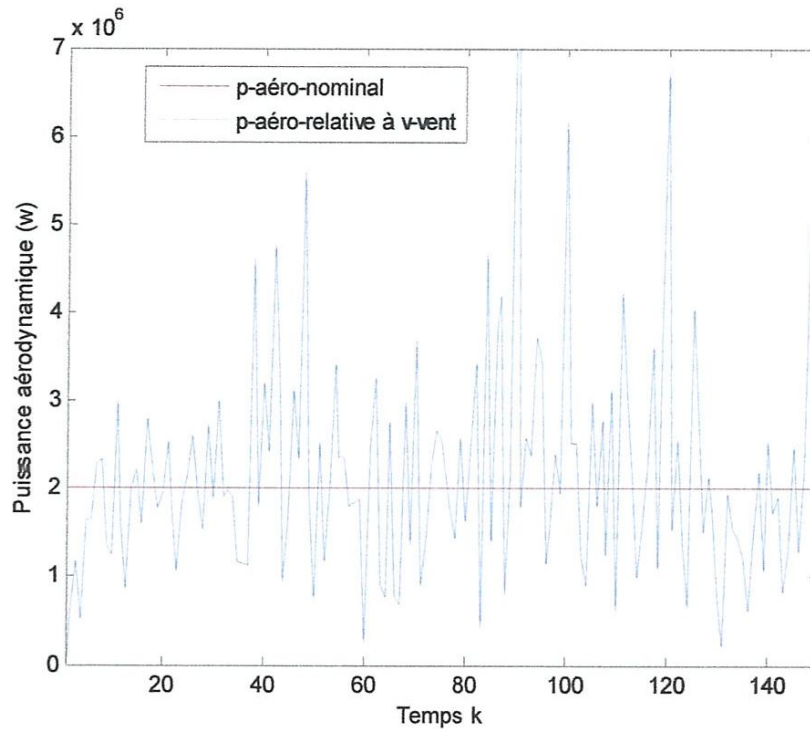


Figure 4.16. Puissance aérodynamique relative à la vitesse du vent généré (W)

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons représenté l'évolution des différentes variables du modèle souple du système éolien muni d'un contrôleur LQ, pour des vents variables de vitesse faible égale à 8 m/s et vitesse fort égale à 18m/s. Les résultats obtenus s'avèrent bien satisfaisants de point de vue des objectifs préfixés de la commande : la puissance générée garde une valeur quasi constante et égale à la valeur de la puissance nominale, la vitesse de rotation de la turbine varie très peu autour de sa valeur de nominale et ce pour un coût acceptable traduit par des variations souples des signaux de commande à savoir l'angle pitch et le couple électromagnétique Par contre, le couple mécanique de l'arbre lent admet une allure un peu fluctuante qui traduit l'activité de la structure mécanique

Conclusion Générale

Conclusion générale

L'objectif principal de la commande des éoliennes est d'assurer une bonne qualité de la puissance électrique générée, et ce à partir d'une source primaire variable qui est le vent, un objectif très important surtout avec l'évolution des réseaux électriques dans le monde. C'est donc pour cette raison que la commande des éoliennes a, pour les dernières décennies, fait l'objet de plusieurs travaux de recherche qui visent à améliorer les performances de ces machines. Aujourd'hui, la quasi-totalité des systèmes éoliens implémentés partout dans le monde utilisent des correcteurs classiques de types : proportionnel (P), proportionnel-intégral (PI) ou proportionnel-intégral-dérivé (PID). C'est la raison pour laquelle que plusieurs chercheurs se sont intéressés à l'utilisation et l'amélioration de ces correcteurs, soit en les utilisant sous leur forme classique, soit en y combinant d'autres stratégies telle que l'approche d'adaptation du gain, ou la logique floue.

Les commandes classiques montrent leurs limitations dans le cas de structure souple. La commande par retour d'état avec synthèse du correcteur par placement de pôles permet d'amortir le système. Cependant, il n'est pas possible de distinguer la dynamique du réglage de la vitesse de celle de la puissance. Nous allons donc passer à une autre forme de synthèse de commande par optimisation d'un critère quadratique.

Nous nous intéressons dans ce travail de mémoire à la commande linéaire quadratique LQ d'une éolienne à modèle souple. L'avantage majeur de la commande quadratique est qu'elle permet d'attribuer à chaque variable de sortie ou d'entrée un coefficient de pondération spécifique d'une manière indépendante des coefficients attribués aux autres variables. Ceci permet d'afficher sur le critère, d'une manière claire, les exigences que l'utilisateur souhaite imposer sur chaque grandeur à contrôler.

L'étude que nous avons menée a montré que l'utilisation d'une seule entrée pour la commande d'une éolienne à vitesse et calage variables permettait de satisfaire seulement de façon partielle les objectifs fixés. La commande en couple permettait de bien réguler la puissance mais avec des fluctuations qui peuvent être remarquable sur la vitesse du rotor.

La commande multi-variable en couple et en pitch que nous avons proposée, permet de joindre les avantages des deux approches (commande en puissance seule et commande en pitch seule), tout en simplifiant la formulation de chacune. Elle a conduit à de bonnes performances aussi bien en régulation de la vitesse du rotor qu'en régulation de la puissance, avec des efforts de commande très acceptables.

Bibliographie

- [1] <http://dSPACE.univ-tlemcen.dz/bitstream/112/387/8/Introduction-generale.pdf>
- [2] N. Hamdi, « Sur Modélisation et commande des génératrices éoliennes », Thèse de magister, Université mentouri de constantine, 2008.
- [3] N. KHEZAMI, « Sur Commande multimodèle optimale des éoliennes : Application à la participation des éoliennes au réglage de la fréquence », Thèse de doctorat, école centrale de lille école supérieure des sciences et techniques de tunis, 2011.
- [4] B. BOUKHEZZAR, « sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable », Thèse de doctorat, L'université paris xi orsay, 2006.
- [5]. I. M. De Alegria, J. Andreu, J. L. Martin, P. Ibañez, J. L. Villate, et H. Camblong, « Connection requirements for wind farms. A survey on technical requirements and regulation », *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2007, 11, 1858-1872
- [6]. D. Marin, H. Camblong, X. Guillaud et M. Rodriguez, « Comparison of wind turbines technical regulations », *ICIT*, 2005
- [7]. C. Sloth, T. Esbensen, M. O. K. Niss, J. Stoustrup et P. F. Odgaard, *Robust LMI-Based Control of Wind Turbines with Parametric Uncertainties*, *IEEE International Conference on Control Applications*, Russie, 2010
- [8], Poulsen, N. K., Larsen, T. J., and Hansen, M. H., *Comparison between a PI and LQ-regulation for a 2 MW wind turbine*. Technical report, Risø National Laboratory-I-2320, 2005
- [9], X. Yao, S. Liu, G. Shan, Z. Xing, C. Guo et C. Yi, *LQG Controller for a Variable Speed Pitch Regulated Wind Turbine*, *IEEE International Conference on Intelligence Human-Machine Systems and Cybernetics*, 2009
- [10] M. H. Hansen, A. Hansen, T. J. Larsen, S. Øye, P. Sørensen, et P. Fuglsang, «Control design for a pitch-regulated, variable speed wind turbine. Technical report», *Risø National Laboratory-R-1500*, 2005.
- [11]. Venne, P., Guillaud, X., Teodorescu, R. and Mahseredjian, J., *Generalized gain scheduling for deloaded wind turbine operation*. *Wind engineering*. 2010
- [12]. N. A. Cutululis, H. Bindner, I. Munteanu, A. Bratcu, E. Ceanga, et P. Soerensen, «LQ Optimal Control of Wind Turbines in Hybrid Power Systems». *European Wind Energy Conference and Exhibition*, Athènes, 2006
- [13] : S . A. De La Salle, D . Reardon, W. E. Leithead, and M . J . Grimble . *Review of wind turbine control* . *International Journal of Control*, 52(6) :1295-1310, 1990
- [14] . M . Canini. *Les différentes technologies pour les générateurs éoliens* . In *Productio n*

Décentralisée et Eolien : Etat et Perspectives, Paris-Nord Villepinte, 2004. Club 15:
Réseau d'énergie électrique .