



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
Republique Algerienne Democratique Et Populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa -

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie électrique

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de Master Académique

En : Electrotechnique

Spécialité : Electrotechnique industrielle

Par : Mahmoudi Mohammed

Sujet

Commande d'une éolienne à base d'une GSAP par des techniques avancées

Devant le jury composé de :

Dib Djalel

Nehal Ouassila

Boukadoum Aziz

Professeur

Maître assistant A

Maitre de conférences A

Président

Rapporteur

Examineur

Soutenu le : 21 / 06 /2021

Promotion : 2020/2021

Résumé

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie. Ce mémoire traite de la simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne à base de génératrice synchrone à aimants permanents destiné à un site isolé. Dans un premier temps, un modèle de chaque étage constituant la chaîne de conversion est proposée. Les différents constituants de la chaîne de conversion sont ensuite connectés entre eux afin de former le modèle complet qui est implémenté dans l'environnement Matlab. Les résultats de simulation obtenus ont permis d'analyser le comportement du dispositif éolien et ont fournis des informations pouvant être utiles à la mise en œuvre d'un système de commande et de contrôle adéquat.

ABSTRACT

Renewable energy, allows a decentralized electrical energy production, which contributes to the solution of supplying isolated area with the necessary energy. This memory calls the simulation of a wind energy conversion chains to basis a generator synchronous of permanent magnets for an isolated site. In a first time, a model of every floor constituting the chain of conversion is proposed. The different constituent of the chains of conversion are then connected between them in order to form the complete model that is implement in the Matlab environment. The results of simulation gotten permit to analyze the behavior of the wind device and provide some information capable to be useful to the setting in work of a system of order and appropriate control.

المخلص

الطاقة المتجددة، تسمح بإنتاج الطاقة الكهربائية اللامركزية، مما يساهم في حل إمداد المنطقة المعزولة بالطاقة اللازمة. تستدعي هذه الذاكرة محاكاة سلاسل تحويل طاقة الرياح لتأسيس مولد متزامن للمغناطيس الدائم لموقع معزول. في المرة الأولى، تم اقتراح نموذج لكل طابق يشكل سلسلة التحويل. ثم يتم ربط المكونات المختلفة لسلاسل التحويل فيما بينها من أجل تشكيل النموذج الكامل الذي يتم تنفيذه في بيئة المتلاب. حصلت نتائج المحاكاة على تصريح لتحليل سلوك جهاز الرياح وتقديم بعض المعلومات القادرة على أن تكون مفيدة للإعداد في عمل نظام الترتيب والتحكم المناسب.

REMERCIEMENTS

AU NOM D'ALLAH LE TOUT MISÉRICORDIEUX, LE TRÈS

MISÉRICORDIEUX

Louange à Lui pour m'avoir permis par Sa grâce de vivre ce jour, et de finaliser mon cursus par ce mémoire. Je Lui suis reconnaissante et Le prie de m'accorder de ces biens.

Je remercie également mes parents pour la confiance qu'ils ont su placé en moi, pour les bonnes valeurs qu'ils ont pu m'inculquer, soyez-en fiers. Je ne saurais vous récompenser pour tout ce que vous avez fait pour moi depuis toujours, seulement considérez ce mémoire comme gage de ma gratitude et mon humilité face à votre présence, vos encouragements, vos bénédictions et tous vos sacrifices. Qu'Allah vous rétribue de la meilleure manière.

Je remercie mon encadreur Mme ouassila nehal pour son soutien tout au long de ce travail.

Je tiens également à remercier le Professeur Boualem Sassia pour l'aide qu'elle m'a apportée durant mon travail.

Je remercie également le jury et son président, le Professeur Dib Djalel et le Dr Boukadoum Azzize, je vous dis un grand merci.

INDEX DES NOTIONS

- V** : la vitesse du vent.
- S** : la surface des pales.
- ρ** : densité du vent.
- ω_s** : Pulsation statorique
- ω_r** : Pulsation rotorique
- P** : nombre de paires de pôles.
- P_m** : puissance mécanique.
- C_p** : coefficient de puissance.
- GSAP** : Génératrice synchrone à aimant permanent.
- S, r** : indices d'axes correspondant au stator et rotor.
- A, b, c** : indices correspondant aux trois phases.
- V_{sa}, V_{sb}, V_{sc}** : tensions d'alimentation des phases statoriques.
- V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}** : tension d'alimentation des phases rotoriques.
- I_{sa}, I_{sb}, I_{sc}** : courants statoriques.
- V_{ra}, V_{rb}, V_{rc}** : courants rotoriques.
- $\phi_{sa}, \phi_{sb}, \phi_{sc}$** : flux statoriques.
- $\phi_{ra}, \phi_{rb}, \phi_{rc}$** : flux rotoriques.
- d, q, 0** : système d'axes dans le référentiel de PARK
- L_s** : la matrice des inductances statoriques.
- L_r** : la matrice des inductances rotoriques
- R_r, L_r** : résistance et inductance propre d'une phase statorique.
- R_s, I_s** : résistance et inductance propre d'une phase rotorique.
- Θ** : angle électrique.
- G** : gain de multiplicateur
- Jg** : Moment d'inertie du rotor de la génératrice
- J_t** : moment d'inertie de la turbine
- C_g** : Couple de la génératrice

INDEX DES NOTIONS

- Ω_{mec} : vitesse mécanique
- J : Moment d'inertie totale
- C_{mec} : Couple mécanique totale appliqué au rotor de l'éolienne
- f : Coefficient de frottement visqueux
- C_{em} : Couple électromagnétique
- C_f : Le couple résistant dû aux frottements
- R : Rayon de la turbine éolienne
- β : Angle de calage des pales de la turbine
- $C_{\text{aer_estimé}}$: Couple aérodynamique estimé
- MPPT** : Maximum power point tracking
- C_{p_opt} : Coefficient de puissance optimal
- λ_{cp_opt} : Vitesse spécifique optimal
- AC** : Courant alternatif
- DC** : Courant continue
- V_m : Tension moyenne
- U_{rd} : Tension redressé
- U_{dc} : Tension redresse et filtré
- f : Fréquence
- f_c : Fréquence de la coupure

LISTE DES FIGURES

Figures

Titre

- Fig.I.1:** Exemples d'éoliennes à axe vertical
- Fig.I.2 :** Principe de la traînée différentielle
- Fig.I.3:** Principe de l'incidence variable
- Fig.I.4:** Configurations à axe horizontal
- Fig.I.5:** Architecture d'une éolienne à axe horizontal
- Fig. I .6:** Exemple d'un système hybride
- Fig. I .7:** Projet simplifié du générateur d'une turbine éolienne à vitesse variable
- Fig.II.1:** tube de courant autour d'une éolienne
- Fig.II.2:** Limite de Betz
- Fig.II.3:** Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné
- Fig.II.4:** Eléments caractéristiques d'une pale
- Fig.II.5:** Directions du vent sur un tronçon de pale
- Fig.II.6:** Forces appliquées sur un tronçon de pale
- Fig.II.7:** Système mécanique de l'éolienne
- Fig.II.8:** Modèle simplifié de la turbine
- Fig.II.9:** schéma du système à modéliser
- Fig.II.10:** Organigramme de simulation de la turbine éolienne
- Fig.II.11:** caractéristiques puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation
- Fig.II.12:** Caractéristiques puissance, vitesse de vent
- Fig.II.13:** caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation
- Fig.II.14:** Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse
- Fig.II.15:** Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park
- Fig.II.16:** Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park
- Fig. II.17:** circuit équivalent de MSAP –convention moteur
- Fig.II.18:** Modèle de PARK pour la GSAP
- Fig. III.1:** Configuration interne d'un régulateur par logique floue
- Fig. III.2:** Configuration interne d'un régulateur par logique floue
- Fig.III.3:** schéma représentatif de l'orientation vers l'état désiré du système
- Fig. III.4:** Représentation de la solution de l'équation de contrainte d'évolution pour différentes conditions initiales
- Fig. III.5:** Les invariants typiques d'un système Electromécanique
- Fig. III .6:** Schéma de la structure avec ajout de la commande équivalente
- Fig.IV.1:** bibliothèque SIMULINK

LISTE DES FIGURES

- Fig.IV.2:** schéma bloc du modèle de la Coefficient aérodynamique (C_p) en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ)
- Fig.IV.3:** coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour un angle de calage optimale (2°)
- Fig. IV. 4:** coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour différents angles de calage
- Fig.IV.5:** schéma bloc du modèle de la turbine
- Fig. IV .6 :** profil du vent appliqué à la turbine
- Fig. IV.7 :** Vitesse du vent turbine
- Fig. IV .8:** Vitesse mécanique de la turbine
- Fig. IV .9:** Vitesse de la turbine
- Fig.IV.10:** Puissance de la Multiplicateur
- Fig.IV.11:** puissance de la turbine
- Fig.IV.12:** schéma bloc du modèle de la GSAP
- Fig.IV.13:** Vitesse oméga mécanique de la GSAP
- Fig.IV.14:** Vitesse mécanique de la GSAP
- Fig.IV.15:** couple électromagnétique de la GSAP
- Fig.IV.16:** Schéma bloc du modèle de la Mode Glissant
- Fig.IV.17:** couple référence et couple mécanique
- Fig. IV.18:** Zoom couple référence et couple mécanique
- Fig.IV.19:** Vitesse mécanique et référence vitesse
- Fig. IV.20:** Schéma fonctionnel de conversion de
- Fig. IV.21:** schéma bloc du modèle conversion de la tension modèle énergétique
- Fig. IV.22:** schéma bloc du modèle conversion de courants
- Fig.IV.23:** schéma bloc du modèle conversion de redresseur
- Fig.IV.24:** schéma bloc du modèle de la machine synchrone à aimant permanent
- Fig.IV.25:** la puissance active et la puissance réactive
- Fig.IV.26:** Allure de la Tension à la sortie de l'onduleur
- Fig.IV.27:** - (a) -Zoom Allure de la Tension à la sortie de l'onduleur
- Fig.IV.28:** Allure des courants.
- Fig.IV.29:** - (b) -Zoom Allure des courants
- Fig. IV.30:** Schéma bloc de la chaîne de la conversion éolienne

TABLE DES MATIÈRES

Introduction générale.....	2
----------------------------	---

Chapitre I : Généralités sur l'éolienne à GSAP

I.1. Introduction	5
I.2 Définitions des éoliennes	5
I.3 Différents types d'éoliennes et leurs utilisations.....	6
I.3.1 Eoliennes à axe vertical	6
I.3.1.a Traînée différentielle.....	6
I.3.1 .b Variation cyclique d'incidence.....	6
I.3.2 Eoliennes à axe horizontal.....	7
I.3.3 Eoliennes installées en mer « éolienne offshore».....	9
I.4 Application des éoliennes.....	9
I.4.1 Systèmes Isolés.....	9
I.4.2 Systèmes Hybrides	10
I.4.3 Systèmes liés au réseau	10
I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	11
I.5.1 Les avantages.....	11
I.5.2 Les inconvénients	12
I.6 Conclusion.....	13

Chapitre II : Modélisation d'une éolienne à GSAP

II.1 Introduction.....	15
II.2 Modélisation de la turbine éolienne.....	15

Sommaire

II.2.1 Conversion de l'énergie éolienne	15
II.2.1.1 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique	15
II.2.1.1-a) Loi de Betz	15
II.2.1.2 -b) Conversion en énergie mécanique.....	17
II.2.1.2 L'angle d'inclinaison (Blade pitch angle) :.....	18
II.2.1.3 Effort sur une pale d'éolienne.....	20
II.2.2 Modélisation du système éolien	21
II.2.2.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine	21
II.2.2.2 Modèle de la turbine	23
II.2.2.2. 1 Modèle du multiplicateur.....	23
II. 2.2.2.2 Equation dynamique de l'arbre de transmission.....	23
II.2.3 Stratégies de commande de la turbine éolienne.....	25
II.2.3.1 Système de contrôle de l'aéroturbine	26
II.2.3.2 Méthodes de recherche du point maximum de puissance.....	26
II.2.3.2.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse	27
II.2.3.2.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse	28
II.3 Équations de la génératrice synchrone à aimants permanents.....	31
II.3.1 Modèle de la MSAP	31
II.3.2 Equations électriques.....	31
II.3.3 Equations magnétiques.....	33
II.3.3.1 Expression du couple électromagnétique	34
II.3.4 Equations mécaniques	35
II.4 Conclusion.....	35

Chapiter III : Théories des commandes appliquées à GSAP

III.1 Introduction	37
III.2 Commande Par Logique Flou	37

Sommaire

III.2.1 correcteur flou avec optimisation	37
III.2.1.1 Rappels sur la logique floue.....	37
III.2.1.2 Structure interne du correcteur flou.....	37
III.2.1.3 Structure externe du correcteur flou.....	38
III.2.1.4 Correcteur flou avec optimisation	39
III.2.1.5 Optimisation de critères de performances	39
III.2.1.6 Détermination des paramètres d'adaptation d'un correcteur flou	40
III.2.1.7 Formulation du problème	40
III.2.1.8 Résolution du problème	40
III.3 Commande Synergétique	42
III.3.1 Présentation de la théorie de la commande synergétique.....	42
III.3.2 Principes de la commande synergétique	42
III.3.3 Synthèse du régulateur synergétique.....	44
III .4.3Les invariants pour un système électromécanique.....	46
III.4 Commande par Mode Glissant :.....	48
III.4.1 Définition des systèmes à structure variable	48
III.4.2 Généralités sur la théorie du contrôle par mode de glissement.....	48
III.4.3 Présentation de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente	49
III.4.4 Principe de la commande à régime glissant	49
III.4.5 Les systèmes à structure variable dans le mode glissant.....	50
III.4.6 Conception des régulateurs à structure variables	50
III.4.6.1 Choix des surfaces de glissement :.....	50
III.4.6.2 Condition d'existence et de convergence.....	51
III.4.6.3 Détermination de la loi de commande.....	51
III.5 Conclusion.....	52

Sommaire

Chapitre IV : Résultats et simulations obtenus

IV.1 Introduction.....	54
IV.2 L’outil Matlab/Simulink	54
IV.3 Simulation et résultats.....	55
IV.3.1 Courbes caractéristiques du coefficient de puissance	55
IV.3.2 Simulation du système avec turbine.....	58
IV.3.3 La génératrice synchrone à aimant permanent.....	60
IV.3.4 Simulation de Mode Glissant (MG).....	61
IV.4 La simulation de la machine synchrone à aimant permanent.....	63
IV.3.6 Résultats de la simulation MSAP.....	66
IV.4 Schéma de simulation d'éolienne	68
IV.5 Conclusion.....	69
Annexes.....	71
Conclusion générale.....	73
References bibliographiques.....	75

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation de charbon à la fin du 18e siècle, puis du pétrole au milieu du 20e siècle.

Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. L'eau des rivières faisant tourner les turbines d'un barrage hydroélectrique ; le vent brassant les pales d'une éolienne ; la lumière solaire excitant les photopiles ; mais aussi l'eau chaude des profondeurs de la terre alimentant des réseaux de chauffage. En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau,...etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie.

L'aérogénérateur est basé sur le principe des moulins à vent. Le vent fait tourner les pales qui sont elles-mêmes couplées à un rotor et à une génératrice. Lorsque le vent est suffisamment fort (15 km/h minimum), les pales tournent et entraînent la génératrice qui produit de l'électricité.

L'énergie éolienne est aujourd'hui l'énergie propre la moins coûteuse à produire, ce qui explique l'engouement fort pour cette technologie. Les recherches en cours pourraient lui laisser pendant encore de nombreuses années cette confortable avancée.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie. Dans ce cadre, le présent mémoire décrit une étude sur l'utilisation des machines de type synchrone à aimant permanent dans un système éolien.

Dans le premier chapitre, il est consacré au rappel des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, suivi d'une définition simplifiée du système de conversion, ainsi qu'à l'évocation des différents types d'éoliennes. Avec une liste de leurs applications et les avantages et inconvénients les plus importants des éoliennes.

La deuxième partie sera consacrée à la modélisation de la turbine éolienne et aux différents modes de son fonctionnement pour ainsi dresser une méthodologie de contrôle adéquate, alors que les algorithmes de contrôle de la turbine seront détaillés. Et aussi la modélisation d'une chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents.

Dans le troisième chapitre, On introduit de nouvelles stratégies de commande avancées (Logique Floue, Mode Glissant, régulateur synergétique). Les résultats de simulation sont analysés et comparés

Introduction générale

dans un but de montrer l'efficacité

Dans le quatrième chapitre. Les résultats de simulation de la chaîne complète Grâce à la technologie Mode Glissant, sont présentés pour mettre en évidence la validité de la stratégie choisie face aux fluctuations du vent.

Enfin, nous terminons notre mémoire par une conclusion générale suivie de quelques perspectives envisagées dans nos travaux futurs.

CHAPTER I:

Généralités sur l'éolienne à Génératrice
synchrone à aimants permanents

I.1. Introduction

Les ressources énergétiques fossiles proviennent de la combustion des matières premières comme le pétrole, le gaz et le charbon. Ces dernières sont polluantes, leurs réserves déclinantes et malheureusement non renouvelables. Par ailleurs, il existe une forte opposition politique contre le renforcement de l'énergie nucléaire dans de nombreuses parties du monde. Pour répondre à une demande mondiale continuellement croissante de l'énergie, les industriels s'investissent de plus en plus dans les énergies renouvelables.

Le contexte fluctuant des énergies fossiles, l'explosion de la demande mondiale en électricité et les prises de conscience environnementale, ont accentué le besoin de l'énergie propre et durable ou l'éolien occupe une place privilégiée. Fort de son potentiel mondial, celui-ci a ainsi attiré différents acteurs du monde économique et surtout de l'énergie. Ce qui se traduit par une profonde réorganisation et mutation du marché de l'éolien.

Dans ce chapitre, une brève définition des éoliennes sera fournie, leurs types et utilisations les plus importantes, ainsi que les avantages et les inconvénients les plus importants des éoliennes sont discutés.

I.2 Définitions des éoliennes

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

L'énergie éolienne est une énergie intermittente "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences. Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont 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 (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible). Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Depuis plus de 100 ans, elle est utilisée pour produire de l'électricité, source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel.

I.3 Différents types d'éoliennes et leurs utilisations

On classe les éoliennes en deux grandes familles : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal [1].

I.3.1 Eoliennes à axe vertical

Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines (Figure I.1), à savoir la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.



Eolienne de Musarov



Eolienne de Savonius



Eolienne de Darrieus

Fig.I.1: Exemples d'éoliennes à axe vertical.

I.3.1.a Traînée différentielle

Le principe de mise en mouvement de ce type de machines tel qu'il est schématisé dans la figure I.2 est identique à celui d'un anémomètre : l'éolienne est munie de deux pâles de forme creuse, sur lesquelles des efforts d'intensités différentes et de sens opposés sont exercés par le vent. Il en résulte donc un couple moteur qui fait tourner le rotor de l'éolienne. [2]

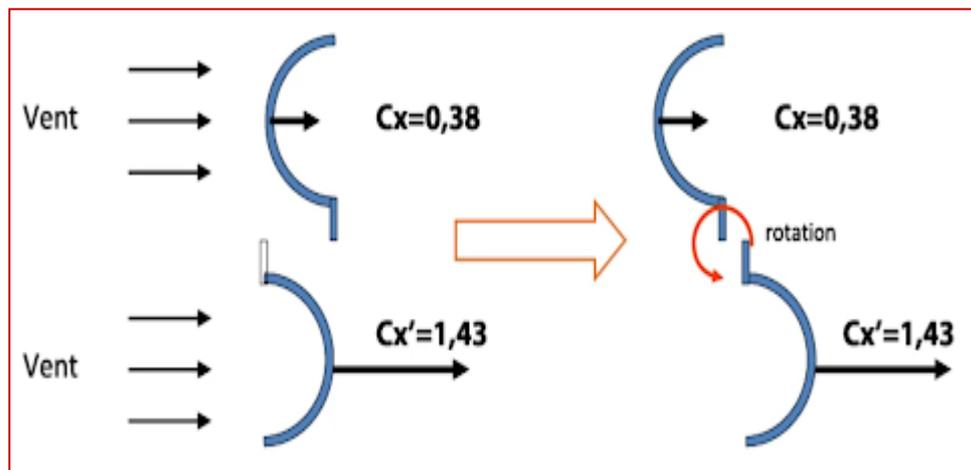


Fig.I.2 : Principe de la traînée différentielle.

I.3.1 .b Variation cyclique d'incidence

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables (Figure I.3).

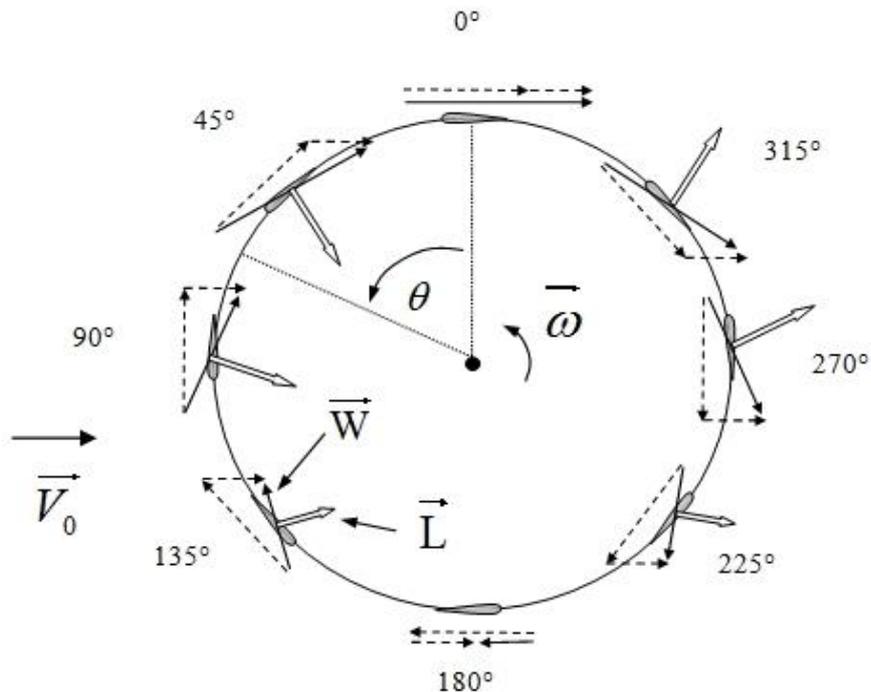


Fig.I.3: Principe de l'incidence variable

Avec : Vitesse axiale du vent en amont de l'éolienne, Vitesse angulaire de rotation des pales,
 R : Rayon de la pale : Vecteur unitaire tangent de la pale.

La combinaison de ces forces génère un couple moteur. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. Cependant, le fonctionnement intrinsèque faisant appel à la rotation des pales, implique que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de lancement s'avère donc nécessaire [2].

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, elle fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine), ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine.

I.3.2 Eoliennes à axe horizontal

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent. Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Deux types de configuration peuvent être rencontrés : les éoliennes « amont », sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent, et inversement, les éoliennes « aval ».

Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients : la formule « amont » requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration « aval » autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs, dans le cas d'une machine « amont », l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour.

L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine « aval ». Enfin, une machine « aval » est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont » [2].

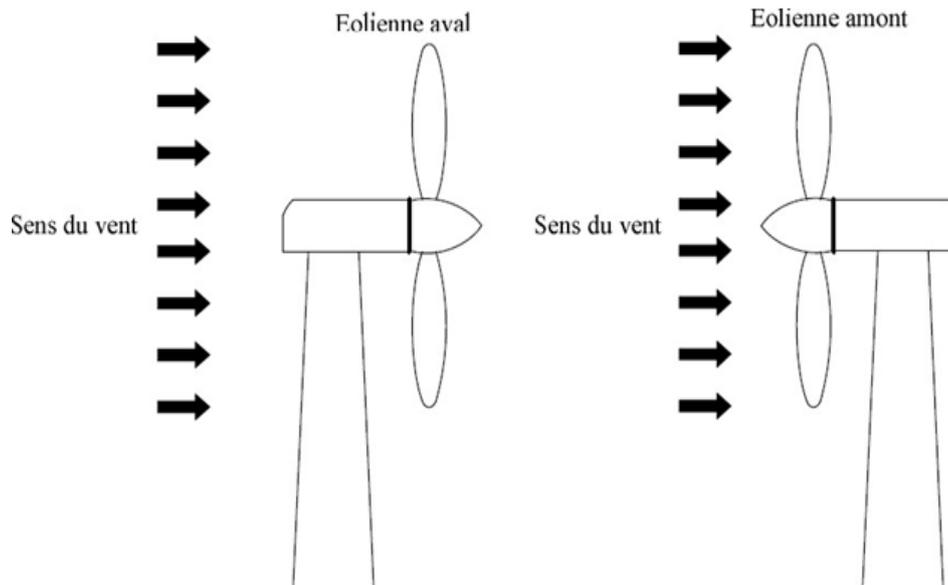


Fig.I.4: Configurations à axe horizontal

On peut considérer trois composantes essentielles dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour.

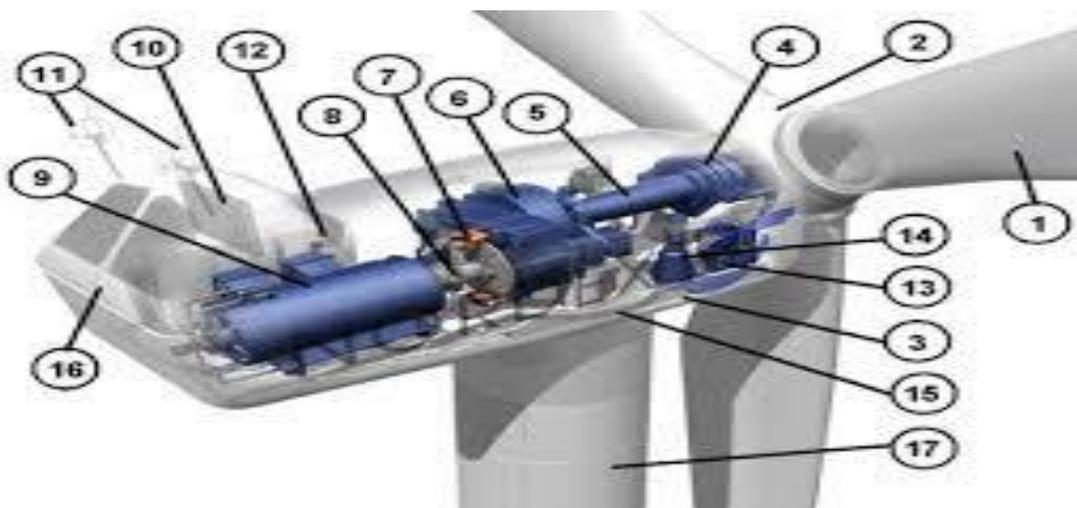


Fig.I.5: Architecture d'une éolienne à axe horizontal [3].

1: pales, 2: moyeu rotor, 3: nacelle, 4:cardan, 5: transmission, 6: multiplicateur de vitesse, 7: frein à disque, 8: accouplement, 9: génératrice, 10: radiateur de refroidissement, 11: centrale de mesures du vent, 12: contrôle, 13: centrale hydraulique, 14: mécanisme d'orientation face au vent, 15: paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque, 16: capot, 17: mât.

I.3.3 Eoliennes installées en mer « éolienne offshore»

L'énergie éolienne n'est pas à proprement dire une énergie marine, mais son exploitation en mer présente des caractéristiques particulières, les vents y sont plus stables, avec une vitesse moyenne de 8 à 9 m/s contre 6 à 7 m/s sur terre, la fatigue des machines y est moindre, le rendement meilleur, les risques sont très limités et la mer offre de grands espaces libres d'obstacles, où l'implantation des machines est possible en concertation avec les autres usagers de la mer, [4].

Les implantations d'éoliennes en mer permettent en outre de s'affranchir d'un certain nombre d'impacts, notamment sonores et visuels. Le choix des sites doit cependant respecter un certain nombre d'infrastructures ou d'activités existantes (zones militaires, zones de pêche, chenaux d'accès aux ports, câbles sous-marins...). La première ferme éolienne offshore au monde, à Vin Deby, au Danemark fut construite en 1991, [4].

I.4 Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes, [4] :

- Systèmes isolés.
- Systèmes hybrides.
- Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et, dans certains cas, d'une unité de stockage.

I.4.1 Systèmes Isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises.

Les systèmes isolés en général, utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes.

Pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (AC), il est nécessaire d'utiliser un onduleur.

I.4.2 Systèmes Hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme, par exemple, turbines éoliennes, génératrices Diesel, modules photovoltaïques, entre eux.

L'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources.

Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

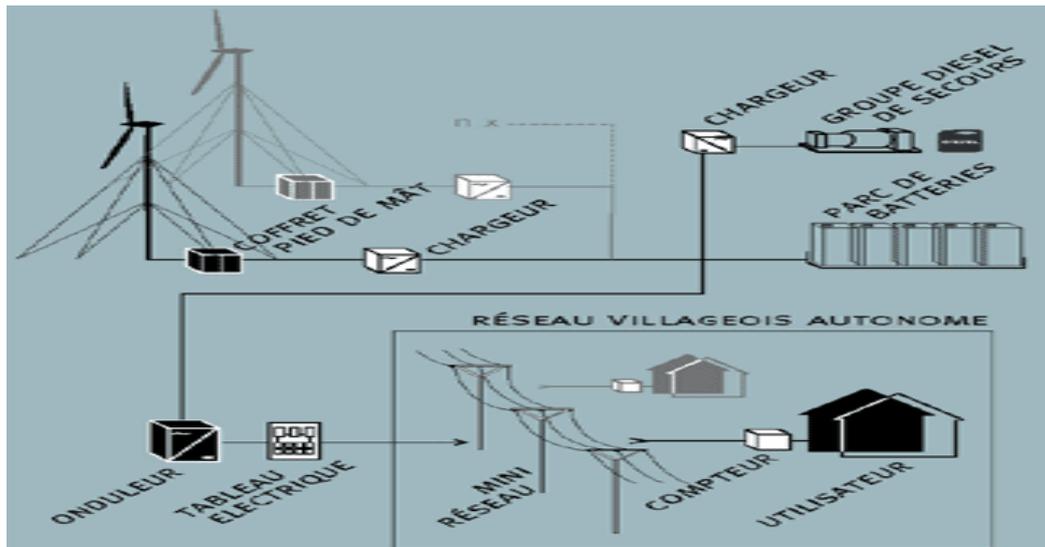


Fig. I.6: Exemple d'un système hybride.

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur.

I.4.3 Systèmes liés au réseau

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ; par conséquent, toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique.

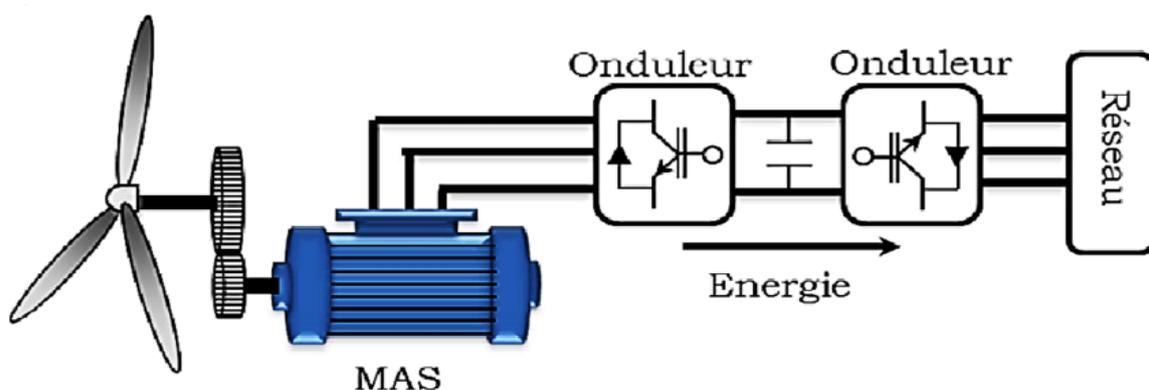


Fig. I.7: Projet simplifié du générateur d'une turbine éolienne à vitesse variable.

I.5 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

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

I.5.1 Les avantages

- L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.
- Bien que ne pouvons pas envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂, etc.
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuite, et inépuisable.
- Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique. Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres.
- Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, le coût de l'éolienne à diminuer presque de 90% depuis le début des années 80.
- Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à

l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines. Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement.

- Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer.
- L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple [6].

I.5.2 Les inconvénients

Même s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

- L'impact visuel : Cela reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien.
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc.
- et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux en étant un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. Plus le parc éolien est dense plus ce risque est grand. Des lumières sur les pales peuvent réduire ce danger. Cependant, aucune étude sérieuse ne semble actuellement avoir démontré la réalité du danger pour les oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien [6]

I.6 Conclusion

Une brève description du domaine des énergies renouvelables a été présentée dans ce chapitre. Dans ce contexte, quelques notions principales sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, la conception, les différents types d'éoliennes utilisés et la classification des éoliennes.

En fin, on a terminé ce chapitre par un état de l'art sur les configurations électriques utilisées et leurs influences sur le fonctionnement des aérogénérateurs ainsi que la synthèse des différentes éoliennes et leurs applications.

Le chapitre suivant, sera consacré à l'étude, la modélisation éoliennes et de la génératrice synchrone a aimants permanents.

CHAPITRE II:

Modélisation d'une éolienne à
Génératrice synchrone à aimants
permanents

II.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 et, d'une manière générale, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est indispensable. Pour parvenir à cet objectif, idéalement, une éolienne doit comporter :

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

L'évolution des aimants permanents modernes, qu'ils soient à base d'alliages métalliques ou à terres rares (par exemple du type manioc, samarium cobalt, néodyme fer bore ...) leur a permis d'être utilisés comme inducteurs dans les machines synchrones offrant ainsi beaucoup d'avantages: induction de saturation élevée, faible désaimantation, densité massique élevée, énergie maximale stockée plus grande par rapport aux autres types de machines.

Dans ce chapitre, le concept de la chaîne de conversion éolienne à base de la génératrice synchrone à aimant permanent est proposé. Un modèle mathématique de simulation de l'ensemble, en prenant en considération son caractère multi-physique (prise en charge des phénomènes mécaniques, magnétiques, électriques) est réalisé.

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne, basée sur les modèles du profil du vent, du comportement aérodynamique des pales, de l'aérogénérateur et des convertisseurs de puissance du système de commande, est détaillée dans ce chapitre.

II.2 Modélisation de la turbine éolienne

II.2.1 Conversion de l'énergie éolienne

II.2.1.1 Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique

II.2.1.1-a) Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la (Figure. II .1) sur lequel on a représenté la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur V_1 et 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 soit : $\frac{V_1+V_2}{2}$

La masse d'air en mouvement de densité ρ traversant une surface S des pales en une seconde est :

$$m = \rho S \frac{V_1+V_2}{2} \quad (\text{II-1})$$

La puissance $PPmm$ alors extraite s'exprime alors par la moitié du produit de la masse et de la

diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton). [8], [9]

$$P_m = m \frac{v_1^2 - v_2^2}{2} \quad (\text{II-2})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II-2)

$$P_m = \rho S \frac{(v_1 + v_2)(v_1^2 v_2^2)}{4} \quad (\text{II-3})$$

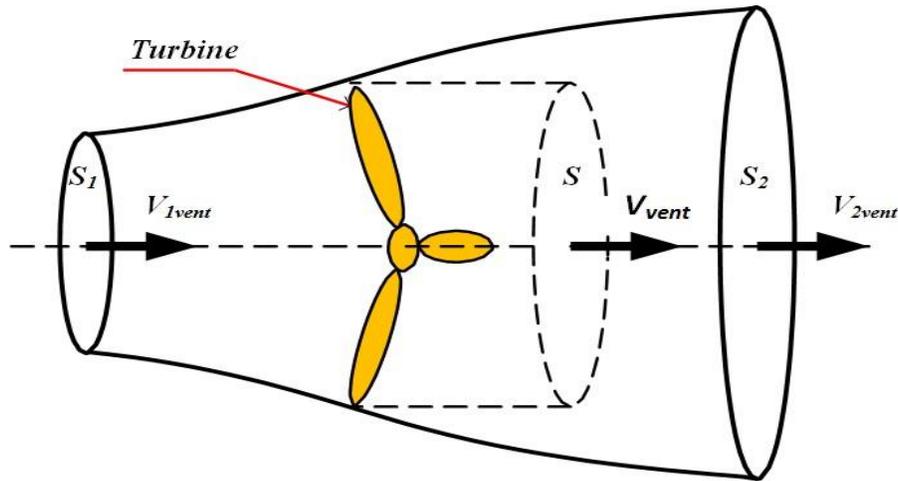


Fig.II.1: tube de courant autour d'une éolienne.

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

$$P_{mt} = \rho S \frac{V_1^3}{2} \quad (\text{II-4})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right) \left(1 - \left(\frac{V_2^2}{V_1^2}\right)\right)}{2} \quad (\text{II-5})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure. II .1), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de 16/27.

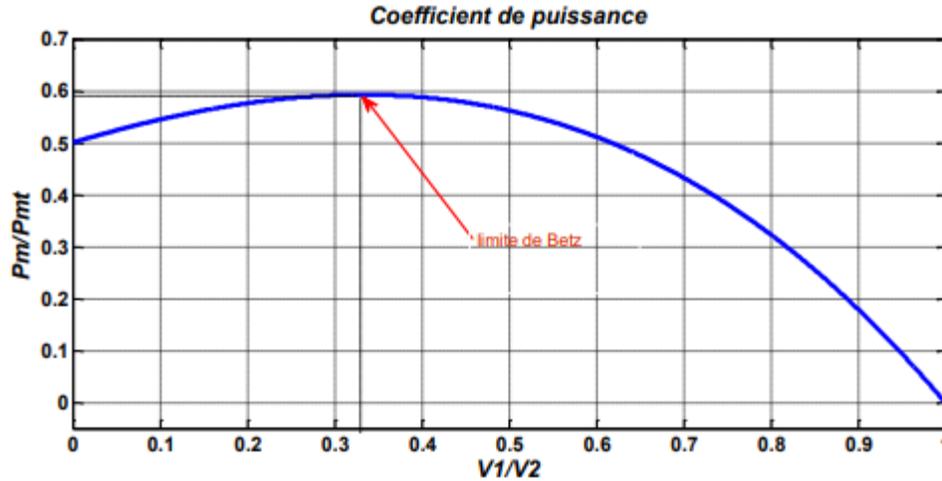


Fig.II.2: Limite de Betz

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. [8], [9]

II.2.1.2 -b) Conversion en énergie mécanique

En combinant les équations (II-1), (II-4) et (II-5), la puissance mécanique disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur est s'exprime comme suit :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} \cdot P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II-6})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_1} \quad (\text{II-7})$$

Appelée vitesse spécifique ou (Tip-speed-ratio).

Avec ΩR vitesse linéaire au bout des pales.

En tenant compte du rapport du multiplicateur G la puissance mécanique P_{mg} disponible sur l'arbre après le multiplicateur est :

$$P_{mg} = 1/2 C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{II-8})$$

Avec Ω_2 : vitesse mécanique après multiplicateur.

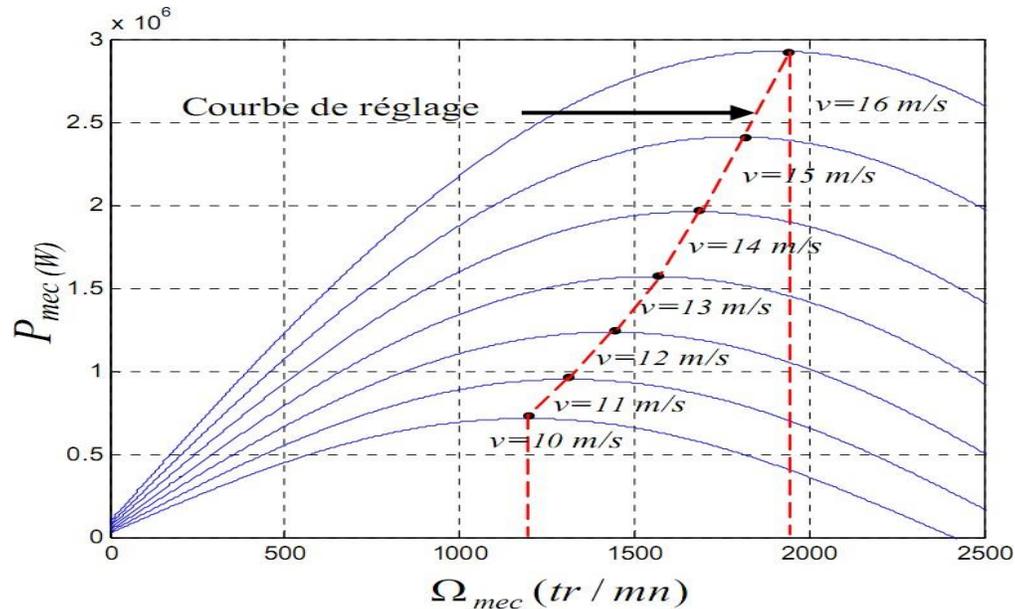


Fig.II.3: Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné [10].

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses du vent. (Fig.II.3).

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure10.II les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple [10].

II.2.1.2 L'angle d'inclinaison (Blade pitch angle) :

L'angle d'inclinaison ou de calage permet de faire varier directement le coefficient de puissance d'une turbine. Il peut être utilisé efficacement pour le contrôle de la puissance de sortie du rotor. La réduction mécanique de la puissance du rotor peut être réalisée en réduisant ou minimisant l'angle d'attaque au-dessus de sa valeur critique. En limitant le coefficient de puissance, la puissance extraite à partir du vent est limitée. Ce type de commande de puissance est également connu en tant que commande de l'angle de calage (pitch control). Cette commande peut être utilisée pour atteindre différent objectif :

- Optimisation de la puissance de l'éolienne, en maximisant la puissance mécanique de sortie pour une vitesse de vent donnée, ce qui est généralement appliqué pour des vitesses faibles et modérées du vent, tout en étant inférieur à sa vitesse nominale. [9]
- Prévenir l'excès de puissance mécanique de sortie pour les vents forts au-dessus des vitesses du vent

limite. Cela permet de maintenir un contrôle de la puissance mécanique et la maintient au-dessous de la valeur nominale dans le cas des vents forts.

- Pour prévenir le mouvement (rotation) des pales dans le cas de turbines déconnectées.

Il y'a deux façons communes dans lesquelles le contrôle de l'angle de calage peut être utilisé pour la régulation de la puissance de sortie d'éolienne.

➤ **Commande actif de l'angle de calage :**

Pour des vitesses variables d'une éolienne, le fonctionnement d'une turbine ainsi que sa puissance de sortie peuvent être affectés soit par des changements de vitesse ou de variation de l'angle de calage des pales. Dessous de la puissance nominale, ces machines fonctionnent à la vitesse variable d'optimiser la vitesse relative au niveau de l'angle de calage fixe. Après la puissance nominale de sortie est obtenu un contrôle de couple de générateur est utilisé pour maintenir la puissance de sortie, tout en hauteur contrôle est utilisé pour maintenir la vitesse du rotor. A des vitesses de vent élevées, la puissance de sortie du générateur peut être maintenue constante, avec une augmentation de la vitesse du rotor. Cette augmentation de l'énergie disponible dans le vent est stockée sous forme d'énergie cinétique dans le rotor. Il en résulte à la fois la réduction du un couple aérodynamique et d'accélération du rotor. Si la vitesse du vent continue à rester élevée, l'efficacité aérodynamique du rotor peut être réduite en modifiant l'angle de calage, ce qui réduit la vitesse du rotor. [8], [9]

➤ **Commande passif de l'angle de calage :**

En cas de contrôle passif la vitesse du vent est utilisée pour fournir la puissance d'actionnement, ce qui permet d'ajuster l'angle des pas des pales. Dans ces modèles d'éoliennes, les effets des changements dans la vitesse du rotor ou la vitesse du vent sont liés aux changements de l'angle d'inclinaison des pales. L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la (Fig. II.4) :

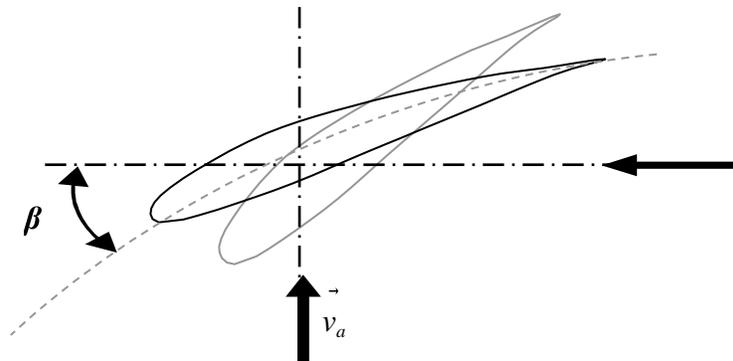


Fig.II.4: Eléments caractéristiques d'une pale.

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- Corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite.
- Angle de calage β (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation).
- Extrados : dessus des pales
- Intrados : dessous des pales.

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis. [8], [9]

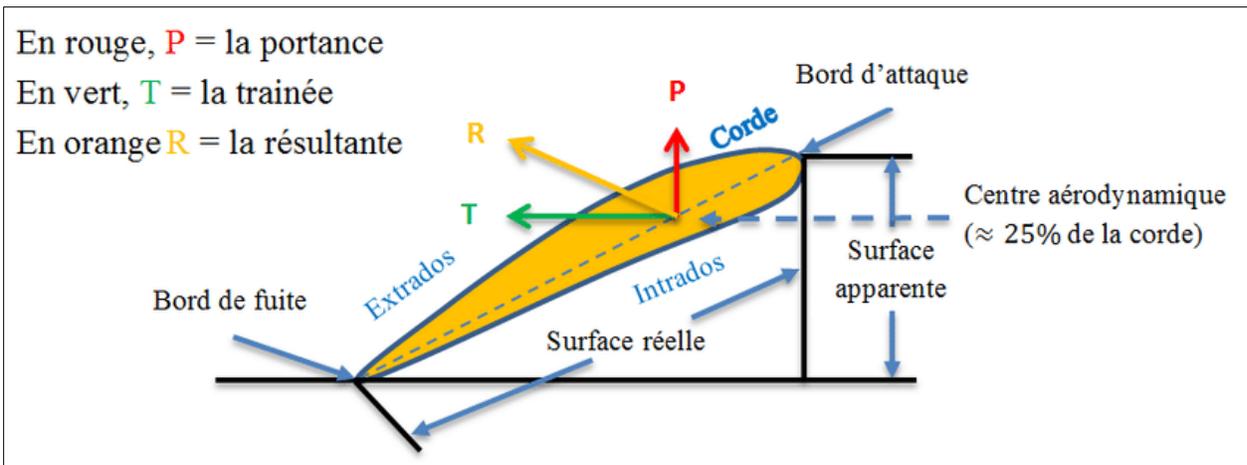


Fig.II.5: Directions du vent sur un tronçon de pale

II.2.1.3 Effort sur une pale d'éolienne

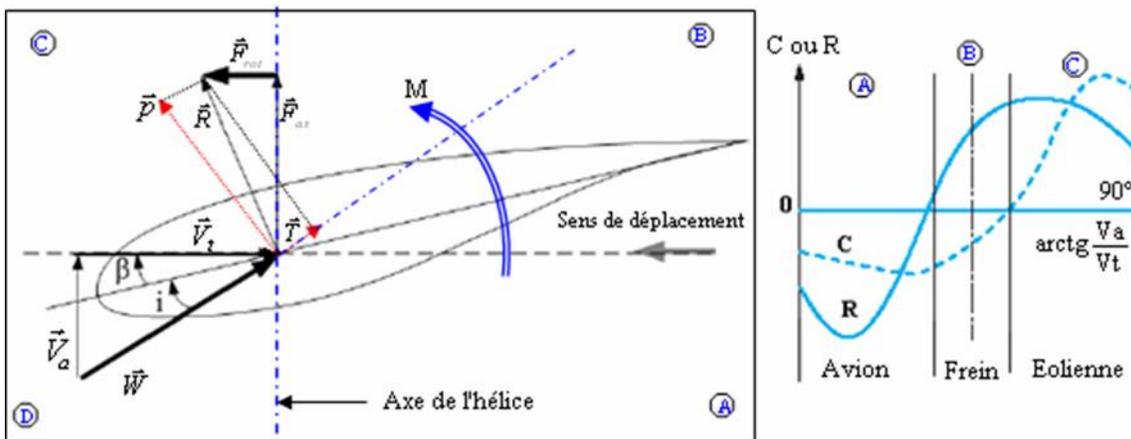


Fig.II.6: Forces appliquées sur un tronçon de pale

On peut décomposer la force résultante $d\vec{F}$ de la manière suivante :

- La portance $d\vec{L}$, normale à la direction du vent apparent.
- La force de traînée $d\vec{D}$, parallèle à la direction du vent.

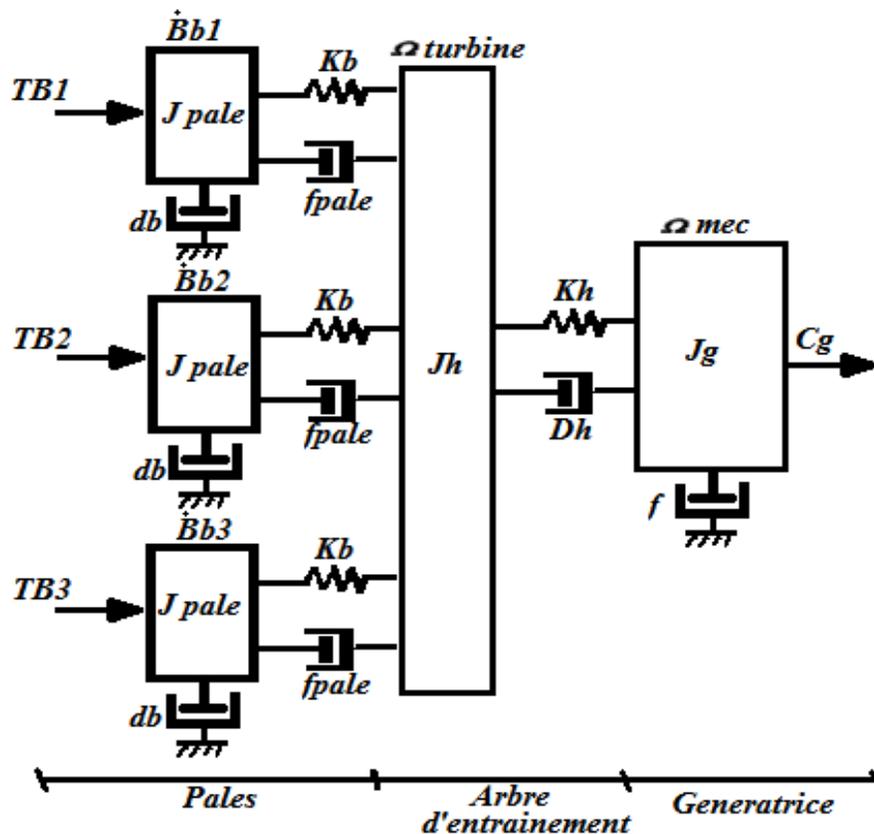
On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

- La poussée axiale $d\vec{F}_a$, perpendiculaire au plan de rotation.
- La poussée tangentielle $d\vec{F}_t$, dans la direction de rotation.

II.2.2 Modélisation du système éolien

II.2.2.1 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω turbine qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Fig.II.7). [11]



Fi g.II.7: Système mécanique de l'éolienne [11]

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

- la même inertie pales J
- 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 pales f . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont notées β_{b1} ; β_{b2} ; β_{b3} . Chaque pale reçoit une force T_{b1} , T_{b2} , T_{b3} qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée [15].

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

- son inertie J_h .
- son élasticité K_h .
- son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h .

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie J_J .
- un coefficient de frottement par rapport à l'air d_g .

Ce rotor transmet un couple (C_g) à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_{mec} .

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 par 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, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses (Figure .II 8) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée. [11]

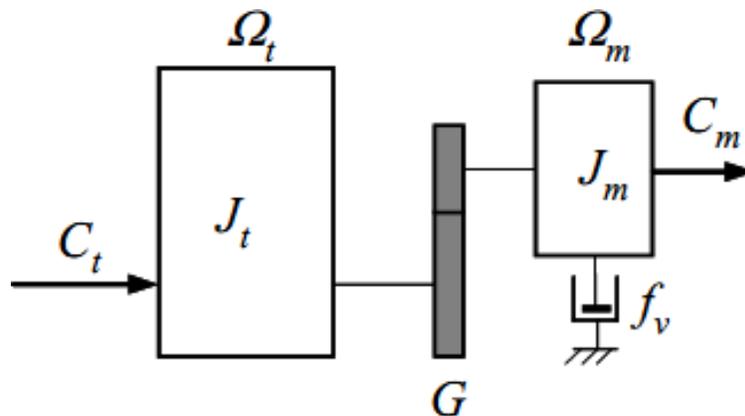


Fig.II.8: Modèle simplifié de la turbine

II.2.2.2 Modèle de la turbine

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

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

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes. [14].

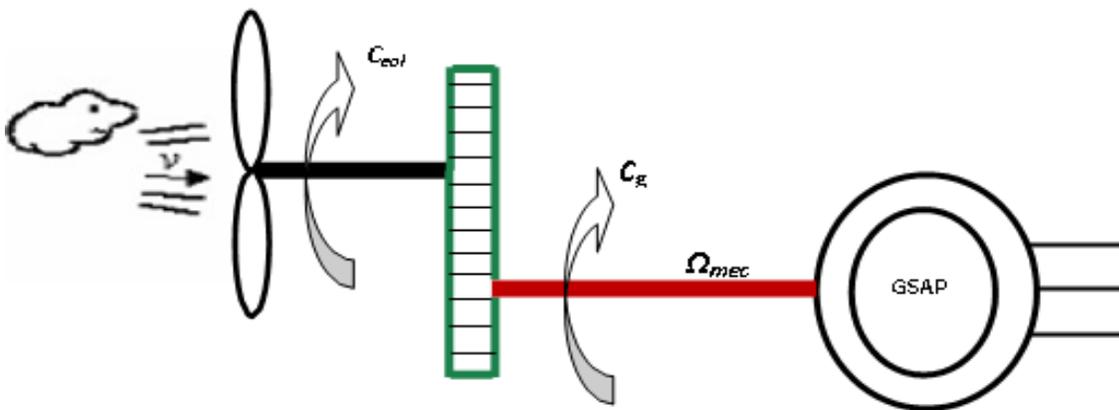


Fig.II.9: schéma du système à modéliser

II.2.2.2. 1 Modèle du multiplicateur

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

$$G = \frac{C_{aer}}{C_g} \quad (\text{II-9})$$

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_{tur}} \quad (\text{II-10})$$

II. 2.2.2.2 Equation dynamique de l'arbre de transmission

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

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II-11})$$

J : l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant l'inertie de la turbine, de la

génératrice, des deux arbres, et du multiplicateur.

f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

Le couple mécanique déduit de cette représentation simplifiée est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (II-12)$$

C_{mec} : Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f\Omega_{mec} \quad (II-13)$$

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} . [12]

L'organigramme de simulation de la turbine peut se présenter comme suit :

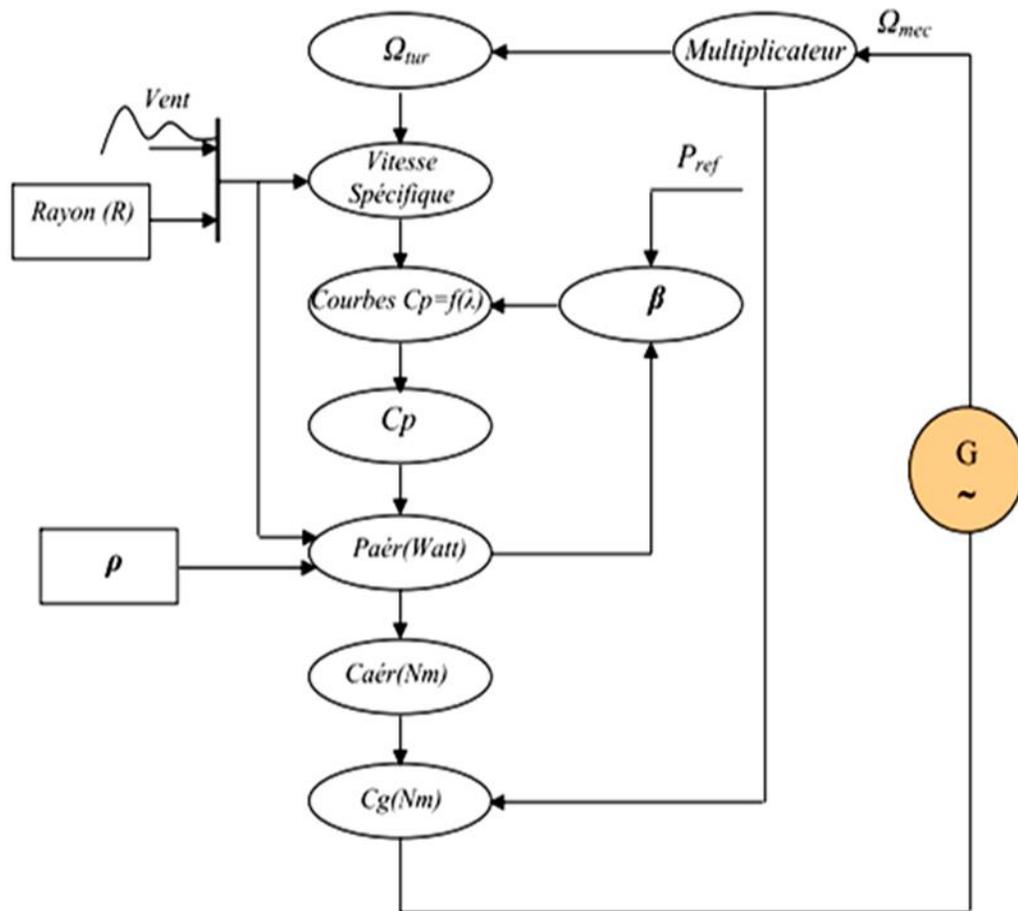


Fig.II.10: Organigramme de simulation de la turbine éolienne.[12]

II.2.3 Stratégies de commande de la turbine éolienne

Les stratégies de commande des systèmes de génération éoliens de moyenne et grande puissance à vitesses variables et à régulation de puissance « pitch » utilisées notamment pour les aérogénérateurs sont basées sur les deux courbes illustrées sur la Figure II.8, qui sont déduites des données aérodynamiques de la turbine [30], [01].

- (a) Puissance mécanique en fonction de la vitesse du vent.
- (b) Puissance électrique en fonction de la vitesse de rotation de la turbine.

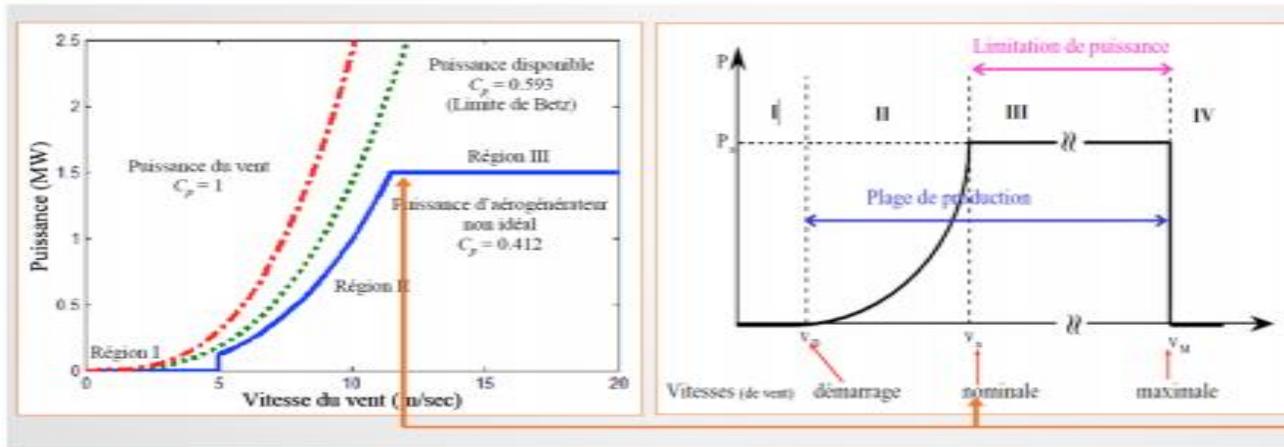


Fig.II.11: caractéristiques puissance, vitesse du vent et vitesse de rotation [13]

La Figure.II.12 représente une autre caractéristique de la turbine éolienne, qui est la puissance transmise de l'aérogénérateur en fonction de la variation de vitesse de vent.

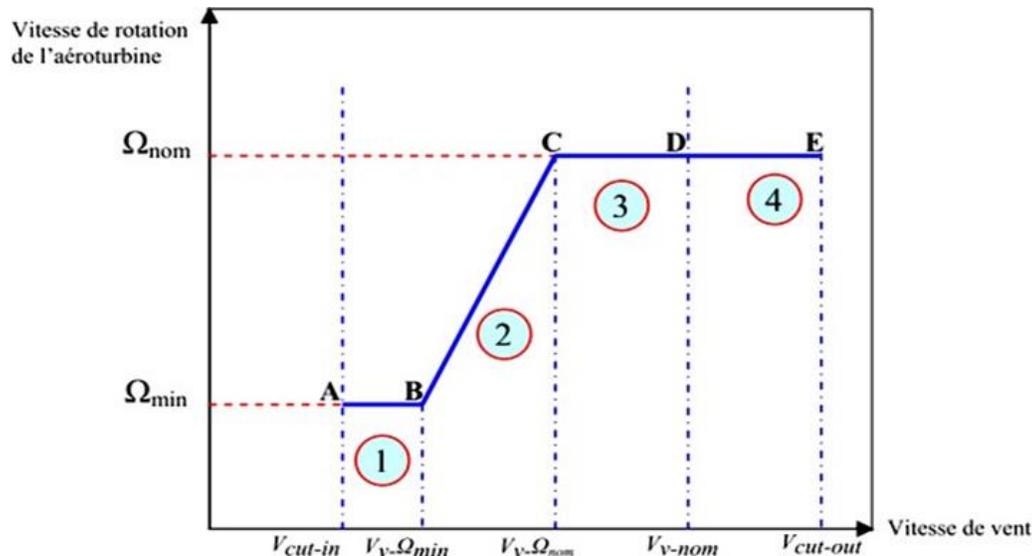


Fig.II.12: Caractéristiques puissance, vitesse de vent [28].

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_{nom} , au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale V_{max} qui pourrait endommager la turbine. On peut définir quatre zones de fonctionnement : [28]

- la zone I : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine.
- la zone II : la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent.
- la zone III : la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance P fournie reste égale à P_n .

- la zone IV : la vitesse de vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta = 90^\circ$).

II.2.3.1 Système de contrôle de l'aéroturbine

Le contrôle de l'aéroturbine est assuré par deux boucles de régulation, fortement liées [11], [13]:

1. Boucle de régulation de vitesse.
2. Boucle de régulation de puissance.

La première boucle est la boucle principale dans la stratégie d'optimisation de la puissance où la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique. Dans la stratégie de limitation de puissance, les deux boucles de régulation interviennent.

Quand la vitesse de vent est inférieure à 1 à vitesse nominale, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale β_{opt} , tandis que la vitesse de rotation est ajustée par la boucle de régulation de vitesse pour extraire le maximum de la puissance du vent. Lors d'une rafale de vent, la vitesse de rotation va augmenter et peut dépasser la vitesse nominale à cause de la lenteur du système d'orientation des pales qui a une dynamique plus lente que celle de la machine [26].

Dans ce cas, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice, et anticipe l'action du di positif d'orientation des pales en réglant le couple électromagnétique de manière à contrôler la vitesse de rotation dans la zone III [11], [13].

II.2.3.2 Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est fortement non linéaire et en forme de « Cloche » [29]. Pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la (Figure II.13) illustre les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque

courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent V_v donnée.

L'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation :

$$P_{\text{opt}} = \frac{1}{2} C_p^{\text{opt}} (\lambda_{\text{opt}}) \rho S V_v^3 \quad (\text{III- 14})$$

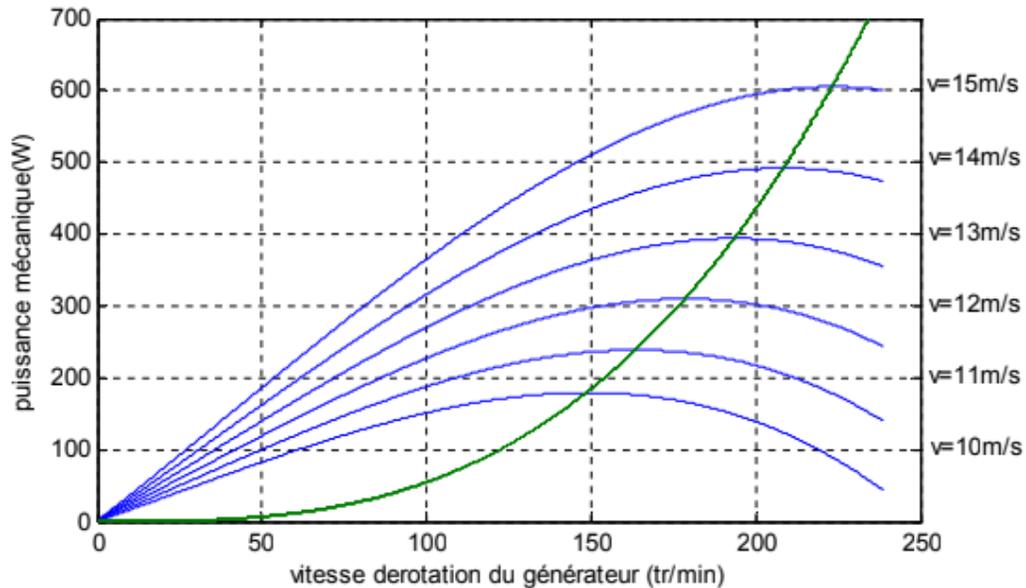


Fig.II.13: caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

Un fonctionnement idéal du système éolien nécessite un suivi parfait de cette courbe. Pour s'approcher de ce but, une commande spécifique connue sous la terminologie: Maximum Power Point Tracking (MPPT) correspond à la zone II doit être utilisée. La stratégie de cette commande consiste à contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée. On distingue deux approches possibles :

1- La première approche, la moins classique [29], ne considère que la caractéristique

$C_p = F(\lambda)$ n'est pas connue.

2- La deuxième approche considère que la caractéristique $C_p = F(\lambda)$ est connue. Il suffit de suivre la courbe optimale de puissance pour que l'éolienne soit dans les conditions optimales.

II.2.3.2.1 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien, et

créé des variations continues de puissance. De cet effet, il est supposé que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence quel que soit la puissance générée [11]

$$C_{em} = C_{em-ref} \quad (II-15)$$

Selon l'équation fondamentale de la dynamique permettant de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total appliqué au rotor, on peut régler cette vitesse à une référence. Ceci est obtenu en utilisant un asservissement adéquat de vitesse pour avoir un couple électromagnétique de référence.

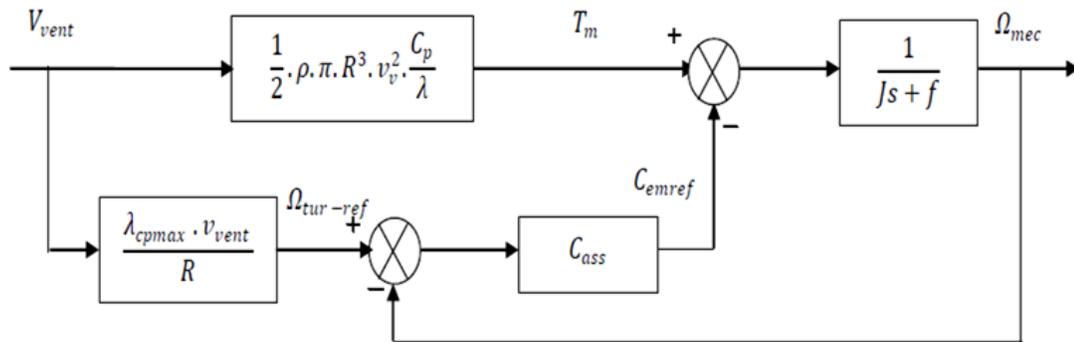


Fig.II.14: Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse

$$C_{em_ref} = K_{ass} (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (III-16)$$

K_{ass} : Régulateur de vitesse.

Ω_{ref} : Vitesse de référence.

Selon l'équation (II-16), la vitesse de rotation de la turbine est égal à :

$$\Omega_{turbine} = \frac{V_v \lambda}{R_t} \quad (III-17)$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{opt} et le coefficient de puissance maximale $C_{p\ max}$ peut se déduire de (II-18) :

$$\Omega_{aurbine\ ref} = \frac{V_v \lambda_{opt}}{R_t} \quad (III-18)$$

II.2.3.2.2 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

En pratique, une mesure précise de la vitesse du vent est difficile à réaliser. Ceci pour deux raisons :

1. L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui donne une lecture erronée de la vitesse du

vent.

2. Ensuite, le diamètre de la surface balayée par les pales étant important (typiquement 70 m pour une éolienne de 1,5 MW), une variation sensible du vent apparait selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales. [11]

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [30].

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent. Dans ce cas, à partir de l'équation dynamique de la turbine, on obtient :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} = 0 = C_g - C_{em} - C_f \quad (III-19)$$

Ceci revient à considérer le couple mécanique C_{mec} développé comme étant nul. Donc, en négligeant l'effet du couple des frottements visqueux ($C_f=0$), on obtient :

$$C_{em}=C_g \quad (III-20)$$

Le couple électromagnétique de réglage est déterminé à partir d'une estimation du couple éolien :

$$C_{em-ref} = \frac{C_{aer-estime}}{G} \quad (III-21)$$

Sachant que:

$$P_{aer} = C_p \cdot P_v = C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (III-22)$$

Et:

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} \quad (III-23)$$

Alors:

$$C_{ar_estime} = C_p \cdot \frac{\rho \cdot S}{2} \frac{1}{\Omega_{turbine_estimee}} V^3 \text{ estimer} \quad (III-24)$$

Ainsi :

$$\Omega_{turbine_estimee} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (III-25)$$

La mesure de la vitesse du vent apparaissant au niveau de la turbine étant délicate, une estimation de sa valeur peut être obtenue à partir de l'équation suivante :

$$V_{\text{estimée}} = \frac{\Omega_{\text{turbine_estimée}}}{\lambda} \quad (\text{III-26})$$

Après calcul et une série de combinaison on aboutit à l'équation suivante :

$$C_{em_ref} = \frac{C_p}{\lambda^3} \cdot \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (\text{III-27})$$

Pour extraire le maximum de la puissance générée, il faut fixer le ratio de vitesse à la valeur $\lambda_{C_p_opt}$ qui correspond au maximum du coefficient de puissance C_{p_opt} . Le couple électromagnétique de référence doit alors être réglé à la valeur suivante : [11]

$$C_{em_ref} = \frac{C_{p_opt}}{\lambda^3 C_{p_opt}} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2} \cdot \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3} \quad (\text{III-28})$$

L'expression du couple de référence peut se mettre donc sous la forme suivante :

$$C_{em_ref} = K_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2 \quad (\text{III-29})$$

Tel que:

$$K_{opt} = \frac{C_{p_opt}}{\lambda^3 C_D} \frac{\rho \cdot \pi \cdot R^5}{2 \cdot G^3} \quad (\text{III-30})$$

II.3 Équations de la génératrice synchrone à aimants permanents

II.3.1 Modèle de la MSAP

Le modèle mathématique de la machine synchrone électrique obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices [11]:

L'absence de saturation dans le circuit magnétique.

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

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

II.3.2 Equations électriques

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II-31})$$

$[V_a \ V_b \ V_c]^t$: Vecteur tension de phases statoriques.

$[i_a \ i_b \ i_c]^t$: Vecteur courant de phases statoriques

$[\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^t$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statoriques.

R_s : la résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé, d'où la somme instantanée des courants statoriques est nulle, et il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou flux, elle n'intervient pas dans le couple [15]. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

Passage au repère de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor (Figure 15-16).

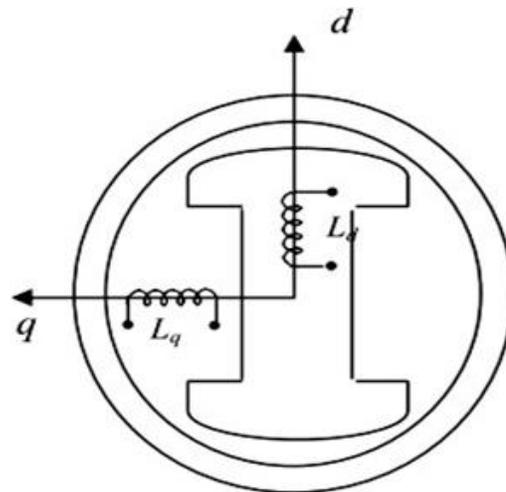


Fig.II.15: Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park.

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d’avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine [11]

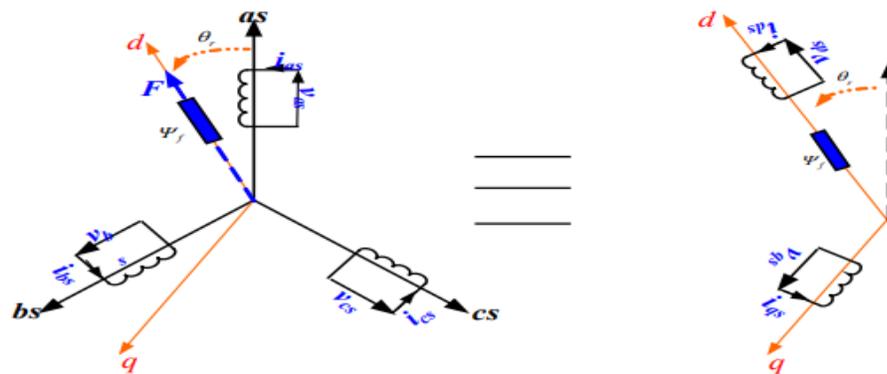


Fig.II.16: Passage de Repère naturel du stator au repère (d, q) de Park.

En appliquant la transformation de Concordia T_{32} définie par (40-46) :

$$\begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix} = T_{32}^t \begin{bmatrix} x_a \\ x_b \\ x_c \end{bmatrix}, \text{ avec : } T_{32} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -1 & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (\text{II-32})$$

Le variable x peut être v, i ou ψ .

On obtient:

$$\begin{bmatrix} v_\alpha \\ v_\beta \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_\alpha \\ i_\beta \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_\alpha \\ \psi_\beta \end{bmatrix} \quad (\text{II-33})$$

En appliquant la transformation de Park au système d'équations (33-45), on peut exprimer tous les vecteurs dans un repère lié au rotor. Si θ est l'angle électrique désignant la position du rotor par rapport au stator, nous avons :

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} + \theta P \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} \psi_d \\ \psi_q \end{bmatrix} \quad (\text{II-34})$$

$$\text{Où : } \begin{bmatrix} x_d \\ x_q \end{bmatrix} = p(-\theta) \begin{bmatrix} x_\alpha \\ x_\beta \end{bmatrix}, \quad \text{et} \quad p(\theta) = \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \quad (\text{II-35})$$

V_d, v_q, i_d et i_q sont les composantes directe et en quadrature de tension et de courant. Ψ_d et ψ_q sont les composantes directe et en quadrature du flux.

II.3.3 Equations magnétiques

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, ψ_d et ψ_q sont fonctions linéaires des courants i_d et i_q :

$$\begin{cases} \psi_d = L_d i_d + \psi_f \\ \psi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (\text{II-36})$$

L_d et L_q sont les inductances directe et en quadrature, et elles sont supposées indépendantes de θ . Ψ_f représente le flux des aimants. En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (33-46), on aboutit à

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \omega P \left(\frac{\pi}{2} \right) \begin{bmatrix} L_d & 0 \\ 0 & L_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_d \\ e_q \end{bmatrix} \quad (\text{II-37})$$

Où $\omega = p\Omega$, p étant le nombre de paires de pôles et Ω la vitesse angulaire du rotor.

e_d et e_q sont les composantes directe et en quadrature de f.e.m. données par :

$$\begin{cases} e_d = 0 \\ e_q = p\Psi_f\Omega \end{cases} \quad (\text{II-38})$$

Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés comme suit [12]:

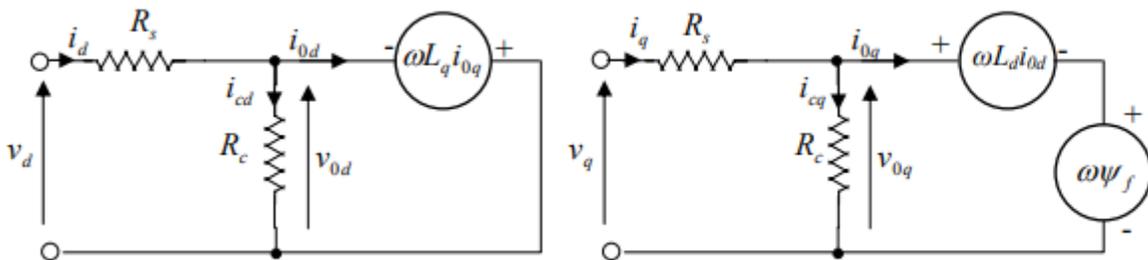


Fig. II .17: circuit équivalent de MSAP –convention moteur.

En utilisant la convention génératrice; on inverse le sens des courant i_d et i_q dans les repères de Park (figure -II .18), et le modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme [13], [17], [16]:

$$\begin{cases} V_d = -R_s I_d - L_d \frac{d}{dt} I_d + \omega L_q I_q \\ V_q = -R_s I_q - L_q \frac{d}{dt} I_q - \omega L_d I_d + \omega \psi_f \end{cases} \quad (\text{II-39})$$

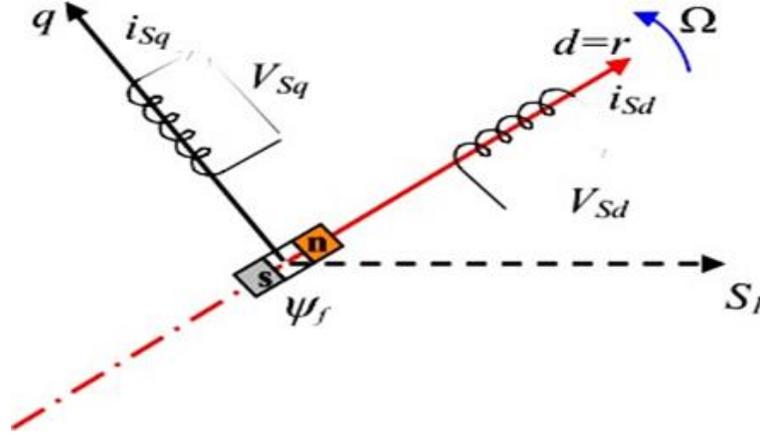


Fig.II.18: Modèle de PARK pour la GSAP.

II.3.3.1 Expression du couple électromagnétique

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [11]:

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dW_e}{d\theta_e} \quad (\text{II-40})$$

W_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

P : nombre de pair de pôle.

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par [11]:

$$P(t) = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \quad (\text{II-41})$$

En remplaçant V_d , V_q par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \left[-R_s (i_d^2 - i_q^2) - \left(i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt} \right) + \frac{d\theta}{dt} (\psi_d i_q - \psi_q i_d) \right] \quad (\text{II-42})$$

$\frac{3}{2} [-R_s (i_d^2 - i_q^2)]$: Représente la puissance dissipée en pertes Joule dans les enroulements du stator [11].

$\frac{3}{2} \left[i_d \frac{d\psi_d}{dt} + i_q \frac{d\psi_q}{dt} \right]$: Représente la puissance électromagnétique [11].

$$\text{Sachant que : } p\Omega = \omega \text{ et } P_e = C_{em} \cdot \Omega \quad (\text{II-43})$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2}p(\psi_d i_q - \psi_q i_d) \quad (\text{II-44})$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire [13], [17]:

$$C_{em} = \frac{3}{2}P[(L_q - L_d)i_d i_q + i_q \psi_f] \quad (\text{II-45})$$

II.3.4 Equations mécaniques

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

$$C_m - C_{em} - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II-46})$$

Avec :

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

Ωf : Le couple de frottement.

J : moment d'inertie total de la machine.

f : coefficient de frottement visqueux.

II.4 Conclusion

A travers ce chapitre, les modèles de deux parties essentielles du système de conversion éolienne ont été établis, la première partie représente la turbine et l'arbre de la génératrice. Quant à la deuxième partie, elle concerne la machine synchrone à aimants permanents en fonctionnement génératrice.

La modélisation des deux parties a permis de constater que le modèle de la turbine était très influencé par la variation du vent et que le modèle de la machine synchrone à aimants permanents correspondait à un système multi variable et fortement couplé, c'est pour cette raison que le recours à des stratégies de contrôle devient nécessaire, ce qui sera l'objet du troisième chapitre.

CHAPITRE III:

Techniques de commandes appliquées
au système éolien à base de la
Génératrice synchrone à aimants
permanents

III.1 Introduction

Un système non linéaire commandé est un ensemble d'équations (différentielles par exemple) non linéaires décrivant l'évolution temporelle des variables constitutives du système sous l'action d'un nombre fini de variables indépendantes appelées entrées ou variables de commande, ou simplement commandes, que l'on peut choisir librement pour réaliser certains objectifs.

Dans ce chapitre. Nous sommes intéressés par l'étude de différents types de techniques de contrôle avancées, en commençant par le contrôle de logique floue, puis régulateur synergétique et enfin mode glissant.

III.2 Commande Par Logique Flou

III.2.1 correcteur flou avec optimisation

III.2.1.1 Rappels sur la logique floue

Il y a énormément d'ouvrages qui traitent le principe de la logique floue depuis son apparition en 1965, suite à publication de LOTFI ZADEH, de l'université de Californie, Berkeley USA, d'un article célèbre qui s'intitule « les ensembles flous ».

Dans notre cas nous allons nous intéresser à la structure du correcteur flou, et la méthode d'optimisation adéquate et la moins coûteuse en temps de calcul. [11]

III.2.1.2 Structure interne du correcteur flou

Pour rappel, par opposition à un régulateur standard, le régulateur par logique floue ne traite pas une relation mathématique bien définie, mais utilise des inférences avec plusieurs règles se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par des opérateurs de la logique floue.

Dans la configuration interne d'un régulateur flou, on distingue trois parties comme la montre la (Figure .III.1)

1. La fuzzification : conversion des valeurs d'entrées (grandeurs physiques) en grandeurs floues réunies dans un vecteur « x ».
2. L'inférence (avec la base de règles) : prise des décisions (chaque règle activée donne un sous-ensemble flou de sortie).
3. La défuzzification : conversion des sous-ensembles flous de s ortie en valeurs numériques.

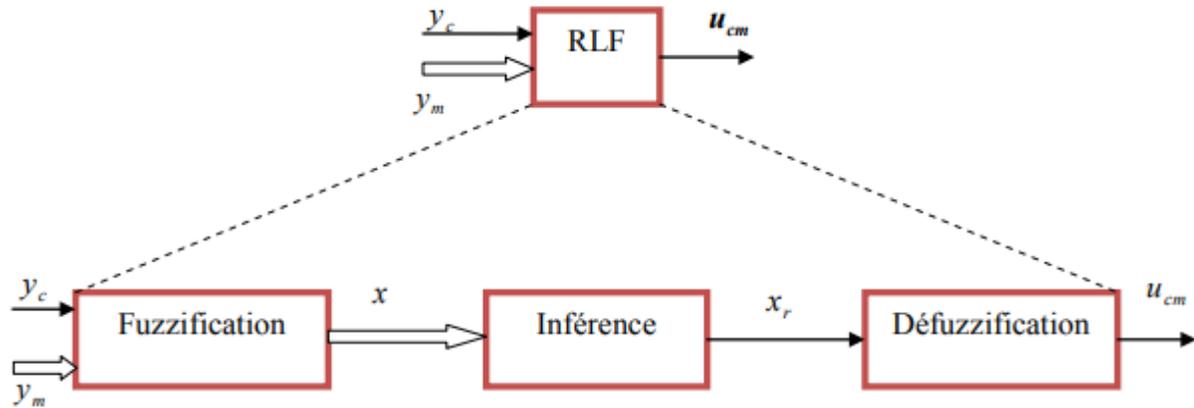


Fig. III.1: Configuration interne d'un régulateur par logique floue. [11]

Tel que :

- RLF : le régulateur par logique floue
- y_c : la grandeur de consigne
- u_{cm} : le signal de commande fourni par le RLF
- u : la grandeur de commande fournie par l'OCM
- d : une perturbation
- y : la grandeur à régler (ou sortie)
- y_m : le vecteur des grandeurs mesurées.
- OCM : l'organe de commande

Pour les différentes étapes de la régulation par logique floue plus de détails sont présentés en (Annexe II).

III.2.1.3 Structure externe du correcteur flou

La structure externe d'un régulateur flou est donnée par la (Figure.III .2)



Fig. III.2: Configuration interne d'un régulateur par logique floue. [11]

Où :

e : Représente l'erreur.

\dot{e} : Représente la dérivée de l'erreur.

u : Représente le signal de commande.

Et :

G_E , G_{CE} et G_{CU} sont les paramètres d'adaptations du régulateur flou.

Le problème majeur rencontré lors de la synthèse du correcteur flou et le choix de ces paramètres d'adaptations qui jouent un rôle des plus importants pour assurer les meilleures performances. Généralement, ces derniers sont déterminés par tâtonnement en faisant des essais de simulation. Ces dernières années, plusieurs méthodes ont été proposées pour la détermination de ces paramètres d'adaptations à partir des paramètres d'un correcteur classique, pour lequel plusieurs méthodes de synthèse ont été échafaudées. [11]

III.2.1.4 Correcteur flou avec optimisation

D'une façon générale, résoudre un problème d'optimisation revient à rechercher une fonction dite objective, dont le maximum ou le minimum correspondrait à la solution optimale du problème posé.

Dans notre cas, l'objectif recherché est d'avoir une erreur minimale entre la vitesse de référence déduite des paramètres optimaux de la turbine éoliennes et la vitesse mesurée à la sortie de celle-ci.

Les différentes méthodes d'optimisation seront détaillées en annexe.

III.2.1.5 Optimisation de critères de performances

L'objectif d'un correcteur, inséré dans une boucle de commande, est de minimiser l'écart entre la sortie d'un système et une valeur de consigne désirée. Cet écart peut être dû, soit à un changement de consigne, soit à des perturbations agissant sur le système. Pour choisir un bon réglage d'un correcteur, on prend en compte à la fois l'amplitude maximale de l'écart, et la durée nécessaire pour qu'il s'annule après une perturbation ou un changement de consigne.

Il est possible de définir des indices numériques permettant de mesurer la qualité d'un réglage donné.

Les plus employés sont :

1. Le critère ISE (Integral of the Squared Error).

$$ISE = \int_0^{+\infty} |e(t)|^2 dt \quad (\text{III-47})$$

2. Le critère IAE (Integral of the Absolute Value Error)

$$IAE = \int_0^{+\infty} |e(t)|^1 dt \quad (\text{III-48})$$

(Pour plus de détails voir Annexe II)

III.2.1.6 Détermination des paramètres d'adaptation d'un correcteur flou

Pour simplifier le choix des paramètres d'adaptation d'un correcteur flou, plusieurs auteurs ont proposé de les déterminer en fonction des paramètres d'un correcteur classique. La démarche consiste, en premier lieu, à choisir la loi de commande et la détermination des paramètres du correcteur classique, puis en le discrétisant, on détermine les relations donnant les paramètres d'adaptation du correcteur flou en fonction des paramètres du PID classique, c'est-à-dire [11] :

$$\begin{cases} GE = f(K_c, K_i, K_d) \\ GCE = f(K_c, K_i, K_d) \\ GCU = f(K_c, K_i, K_d) \end{cases} \quad (\text{III-49})$$

Où

K_c, K_i, K_d : Paramètres du correcteur classique

GE, GCE, GCU : Paramètres d'adaptation du correcteur flou.

III.2.1.7 Formulation du problème

Pour illustrer la procédure proposée, pour la détermination des paramètres optimaux, on considère le cas d'un correcteur proportionnel intégral flou, présentée dans le chapitre précédent, et comme critère à minimiser nous considérerons l'ISE, qui représente la fonction objective. Dans ce cas, on cherche à minimiser :

$$J = ISE = T_s \sum_i^{+\infty} |e_i|^2 \quad (\text{III-50})$$

Tel que : $e_i = F(GCU, GEG, CE)$.

Alors :

$$J = T_s \sum_i^{+\infty} |F(GCE, GE, GCU)|^2 \quad (\text{III-51})$$

Ainsi :

$$\min_{GE, GCE, GCU} J = \min_{GE, GCE, GCU} (T_s \sum_i^{+\infty} |F(GE, GCE, GCU)|^2) \quad (\text{III-52})$$

III.2.1.8 Résolution du problème

La résolution analytique du problème d'optimisation (II-53) est impossible, car la détermination de l'expression mathématique de l'erreur $e(t)$, en fonction des paramètres d'adaptation GCE, GE et GCU , est très difficile voire très compliquée vu la caractéristique non linéaire f du correcteur flou. Ainsi, il est intéressant de rechercher la solution d'une manière numérique en utilisant, conjointement, le langage de programmation Matlab et l'outil Simulink en tant que simulateur des systèmes dynamiques. [11]

Nous allons utiliser les boites à outils « Optimisation », « logique floue » et « Simulink ».

Vu l'absence de l'expression mathématique de la fonction objective, alors nous allons faire appel à des fonctions Matlab de recherche de l'optimum basées sur des méthodes itératives qui à partir d'une valeur initiale (estimé de départ) $GCE^{(0)}$, $GE^{(0)}$ et $GCU^{(0)}$ permettent de calculer la suite des valeurs :

$$\begin{aligned} J(GE^{(0)}, GCE^{(0)}, GCU^{(0)}) &> J(GE^{(1)}, GCE^{(1)}, GCU^{(1)}) > \dots \\ &> J(GE^{(k)}, GCE^{(k)}, GCU^{(k)}) \end{aligned} \quad \text{(III-53)}$$

III.3 Commande Synergétique

III.3.1 Présentation de la théorie de la commande synergétique

Certaines méthodes avancées telles que les techniques de linéarisation ou la commande par modes glissants, permettent à des concepteurs d'éviter quelques problèmes de non-linéarité, mais la multiconnectivité et la multi-dimensionnalité restent encore insurmontables. Ceci a obligé les chercheurs à s'orienter vers d'autres techniques plus efficaces entre autre celle synergétique.

En effet, la théorie de ce type de commande dit « synergétique » est l'une des nouvelles options prometteuses dans la théorie des commandes modernes et émergentes. Elle ouvre de nouveaux horizons dans la conception efficace de commande des systèmes non linéaires complexes et autres. [26]

Cette nouvelle approche permet la conception analytique des lois de commande qui assurent non seulement la stabilité globale du système en boucle fermée, mais aussi la réduction de son ordre par des décompositions successives.

Par conséquent, la théorie de la commande synergétique permet aux concepteurs de résoudre efficacement beaucoup de problèmes difficiles de commande, lesquels n'ont toujours pas été résolus par les méthodes classiques connues. Ces problèmes sont liés non seulement, à la stabilité globale de fonctionnement du système dans une boucle fermée ou à l'optimisation globale du comportement de ce dernier, mais également à la simplification de la transition d'une stratégie de partage de puissance à une autre, ou à la minimisation des pertes de l'énergie dans le système.

En général, la théorie de la commande synergétique fournit des méthodes pour concevoir des contrôleurs optimaux pour les systèmes dynamiques, lesquelles ont des secteurs d'attraction qui correspondent aux buts de la commande utilisée.

La représentation de tels secteurs d'attraction des systèmes dynamiques ou attracteurs, est un des concepts principaux de cette théorie de commande. Un attracteur est une région dans l'espace d'état d'un système dynamique dont laquelle toutes les trajectoires des secteurs voisins de l'espace d'état convergent vers elle.

III.3.2 Principes de la commande synergétique

La théorie de la commande synergétique est une nouvelle tendance dans le domaine du contrôle des différents processus dans divers domaine d'application, laquelle est basée sur les principes

d'autoorganisation orientée et sur l'utilisation des propriétés dynamiques des systèmes non-linéaires. [26][27]

Les principes de base de la théorie de ce type de commande sont comme suit :

1- Les conditions de la réalisation ou de développement sont présentées sous forme d'un ensemble d'invariants (techniques, de puissance, électromagnétique, etc.) qui décrivent les modes de fonctionnement désirés des objets à commander.

2- Les attracteurs artificiels - des manifolds invariants – sont formés dans l'espace d'état du système. Sur ces attracteurs, nous assurons l'organisation des qualités dynamiques et statiques désirées de fonctionnement. De plus, la formation des attracteurs est la réflexion d'un processus d'auto-organisation orienté,

3- Le principe dominant de la méthode synergétique de synthèse des commandes, correspond au principe de la compression- décompression de l'espace de phase de système à contrôler et cela, par l'imposition des manifolds.

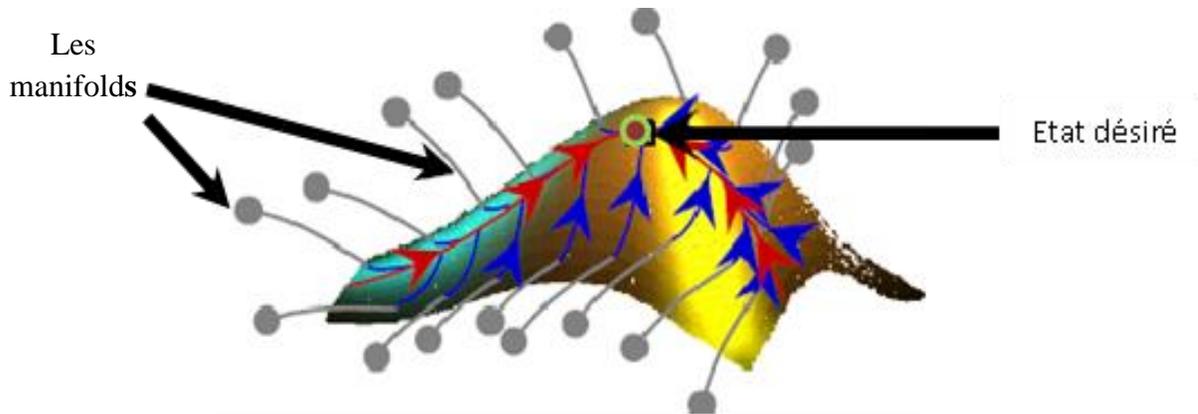


Fig. III.3: schéma représentatif de l'orientation vers l'état désiré du système.

Les attracteurs créés dans l'espace d'état de l'objet simplifient le modèle, tout en réduisant sa dimension qui est complètement non-linéaire et qui décrit les caractéristiques dynamiques du système. En conséquence, il est possible de modéliser le système entier par un sous-système simple, dont la dimension peut être trouvée selon la relation suivante :

$$A = n - k * m$$

Où: A - dimension du système décomposé;

n - dimension du système initial;

m - dimension du vecteur de commande;

k - nombre d'attracteurs séquentiellement utilisés.

III.3.3 Synthèse du régulateur synergétique

Considérons le système dynamique non-linéaire SISO de dimension n qui peut être écrit par l'équation non linéaire suivante : [19][20]

$$\frac{dx}{dt} = f(x, u, t) \quad (\text{III-54})$$

Où X :

Représente le vecteur d'état du système et u : représente le vecteur de commande. La synthèse du contrôleur synergétique débute par la définition d'une macro-variable par le concepteur, pour satisfaire le cahier des charges et considérer d'éventuelles contraintes de contrôle [19], qui est donnée par :

$$\psi = \Psi'(x) \quad (\text{III-55})$$

Où ψ est-la macro-variable et $\Psi(x)$ est une fonction définie par l'utilisateur, en général fonction des variables d'état.

L'objectif de la commande synergétique est de forcer le système à évoluer sur le domaine choisit au préalable par le concepteur :

$$\Psi = 0 \quad (\text{III-56})$$

Les caractéristiques de la macro - variable peuvent être choisies par le concepteur, selon les paramètres tels que l'objectif de commande, le temps de réponse, les limitations de la commande, etc.... La macro- variable peut être une combinaison linéaire simple des variables d'état, et elle est forcée d'évoluer d'une façon désirée exprimée par une contrainte choisie par le concepteur comme indiqué en exemple par l'équation suivante :

L'évolution dynamique désirée de la macro-variable est :

$$L\psi + \dot{\psi} = 0 \quad (\text{III-57})$$

Avec $L > 0$

Où, L est un paramètre de conception indiquant la vitesse de convergence aux manifolds indiqués par les macro-variables.

La solution de l'équation (III.58) donne la fonction suivante:

$$\Psi(t) = \Psi_0 e^{-t/T} \quad (\text{III-58})$$

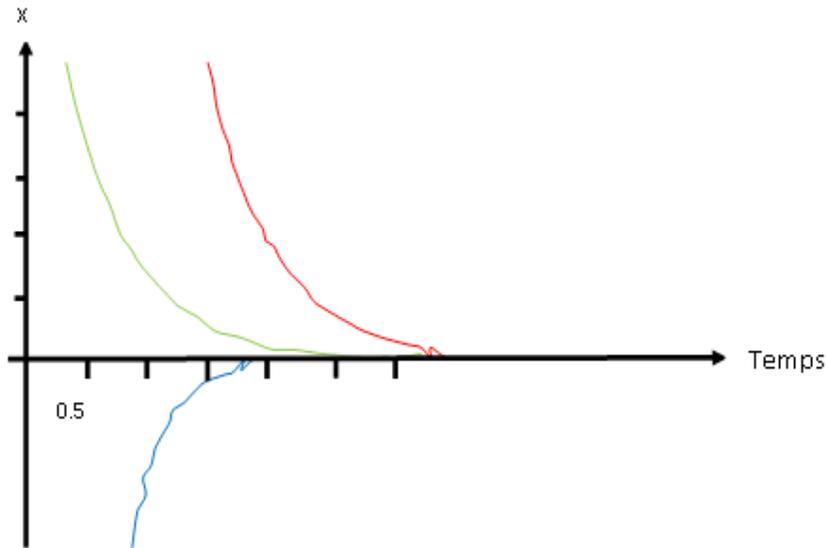


Fig. III.4: Représentation de la solution de l'équation de contrainte d'évolution pour différentes conditions initiales

La figure.4.III montre que la macro- variable $\Psi(t)$ converge vers l'attracteur $\Psi= 0$ pour des conditions initiales différentes Ψ_0 où t : représente le temps, et T : est un paramètre de contrôle qui indique la vitesse de convergence du système en boucle fermée vers le domaine indiqué.

En tenant compte de la chaîne de la différentiation donnée par :

$$\frac{d\Psi(x,t)}{dt} = \frac{d\Psi(x,t)}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} \quad (\text{III-59})$$

La substitution de(III.59) et de (III.60) et de (III-61) permet d'écrire :

$$T \frac{d\Psi'(x,t)}{dx} f(x, u, t) + \Psi(x, t) = 0 \quad (\text{III-60})$$

En résolvant (III .44) pour u , la loi de commande peut être ainsi obtenue :

$$u = g(x, \Psi(x, t), T, t) \quad (\text{III-61})$$

On peut voir que la commande dépend non seulement des variables d'état du système, mais

également de la macro- variable et de la constante de temps choisie T.

En d'autres termes, le concepteur peut choisir les caractéristiques du contrôleur en choisissant une macro-variable appropriée et une constante de temps spécifique T. En synthétisant le contrôleur, chaque domaine présente une nouvelle contrainte sur le domaine de l'espace d'état et réduit l'ordre du système d'un degré.

III .4.3 Les invariants pour un système électromécanique

Dans la théorie de la commande synergétique les exigences des qualités dynamiques et statiques des systèmes à commander, sont représentées sous forme d'un ensemble d'invariants lesquelles entrent dans la structure des manifolds invariants formés dans l'espace d'état du système selon la méthode de synthèse synergétique qui sera longuement détaillées ici. Ces manifolds servent à attirer le système dans une boucle fermée. [19]

Pour les systèmes électromécaniques, nous pouvons déterminer trois groupes d'invariants: technologique, électromagnétique et d'énergie.

La forme d'un invariant technologique est déterminée par la tâche pratique spéciale réalisée par le système électromécanique dans un certain processus technologique et caractérise l'état statique ou dynamique désiré de la vitesse mécanique (position, couple...).

Les invariants énergétiques sont des corrélations entre les coordonnées de l'objet caractérisant la plupart des modes énergiques avantageux de travail, par exemple la minimisation de la consommation de l'énergie par le système ou bien la minimisation des pertes de ce dernier.

Par contre, les invariants d'un système électromécanique sont reliés à la constance de flux magnétique (les invariants électromagnétique) et méritent une particulière attention. Un système électromécanique, est généralement décrit par un système d'équations différentielles non linéaires multi-variables et peut être sujet à des perturbations d'environnement externes. Aussi les invariants typiques qui lui correspondent peuvent être résumées et présentées dans le tableau suivant [19] :

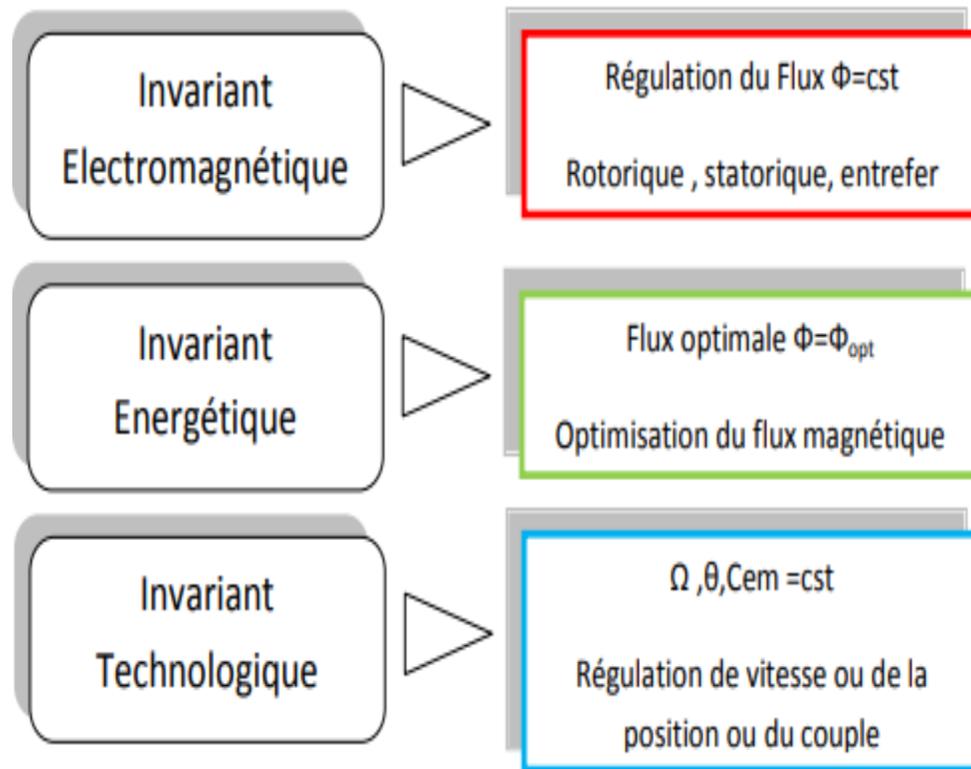


Fig. III.5: Les invariants typiques d'un système Electromécanique

III.4 Commande par Mode Glissant :

La commande par mode glissant, en raison de sa robustesse vis-à-vis des incertitudes et des perturbations externes, peut être appliquée aux systèmes non linéaires incertains et perturbés [17][19]. Il s'agit de définir une surface dite de glissement en fonction des états du système de façon qu'elle soit attractive. La commande globale synthétisée est composée de deux termes : le premier permet aux trajectoires d'évoluer vers la surface, le second permet le maintien et le glissement le long de celle-ci. Ainsi, plusieurs travaux de robustification de la commande adaptative floue par mode glissant ont été élaborés [17] [19].

III.4.1 Définition des systèmes à structure variable

Un système à structure variable est un système dont la structure change pendant son fonctionnement, à cause de la commutation (variation discontinue) du système et de son contrôleur (ou observateur). Cela est principalement dû aux propriétés de stabilité que peut avoir le système global indépendamment de celles de chacun des sous-systèmes pris seuls.

III.4.2 Généralités sur la théorie du contrôle par mode de glissement

La théorie du mode glissant est le prolongement de l'étude des systèmes à structure variable. Les premiers travaux concernant ces systèmes de commande ont été proposés et élaborés au début des années 50 par Emelyanov, puis par d'autres chercheurs comme Utkin à partir des résultats des études du mathématicien Filippov. [20]

Par la suite, ces travaux ont été repris ailleurs, soit pour compléter l'étude théorique, soit pour étudier quelques applications. Aux Etats-Unis, cette théorie fut introduite par Stokich et au Japon par Young, Harasaka et Hashimoto. Il a fallu attendre les années 80, pour que les systèmes de commande soient parmi les techniques de contrôle non linéaire les plus efficaces et les plus robustes.

Dans les systèmes à structure variable utilisant la commande par mode de glissement, on peut trouver trois configurations de base pour la synthèse des différentes commandes :

- **Structure par commutation au niveau de l'organe de commande** : Cette structure de commande est la plus classique et la plus usitée. Elle correspond au fonctionnement tout ou rien des interrupteurs de puissance associés dans une grande majorité d'application aux variateurs de vitesse.

- **Structure par commutation au niveau d'une contre-réaction d'état** : c'est la structure la moins exigeante au niveau de la sollicitation de la commande. Elle s'appuie sur la commande par contre réaction d'état classique où le réglage de la dynamique du système est réalisé par les gains de

réglage. Le non linéarité provient de la commutation entre les gains, donc on crée une commutation au niveau de la dynamique du système.

- **Structure par commutation au niveau de l'organe de commande avec ajout de la "commande équivalente" :**

Cette dernière structure est retenue pour la suite dans notre étude

III.4.3 Présentation de la structure par commutation au niveau de l'organe de commande, avec ajout de la commande équivalente

Cette structure présente l'avantage de pré positionné l'état futur du système grâce à la commande équivalente qui n'est rien d'autre que la valeur désirée du système en régime permanent. L'organe de commande est beaucoup moins sollicité, mais on est plus dépendant des variations paramétriques du fait de l'expression de cette commande équivalente. [20][21]

Le principe de cette commande est illustré sur la (Figure .III 6)

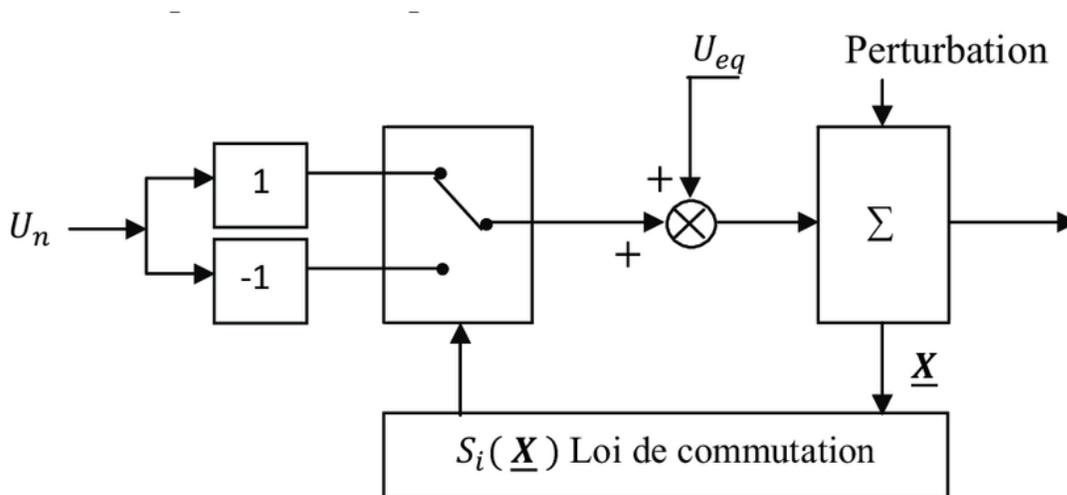


Fig. III .6: Schéma de la structure avec ajout de la commande équivalente

III.4.4 Principe de la commande à régime glissant

L'idée de base est d'attirer les états du système dans une région correctement sélectionnée, puis de concevoir une loi de commande qui maintiendra toujours le système dans cette région. La

commande par régime glissant est divisée en trois parties:[22][23] .

- Le choix de la surface.
- L'établissement des conditions de la convergence.
- La détermination de la loi de commande.

III.4.5 Les systèmes à structure variable dans le mode glissant

Les systèmes à structure variable sont caractérisés par le choix d'une fonction et d'une logique de commutation. Soit le système décrit par l'équation différentielle suivante :

$$\dot{X}=f(X, t)+g(X, t) u(X, t) \quad (\text{III-62})$$

Où X : est le vecteur d'état, f et g : sont des fonctions non linéaires, et u est l'entrée de commande.

III.4.6 Conception des régulateurs à structure variables

III.4.6.1 Choix des surfaces de glissement :

En général, pour un système défini par l'équation d'état précédente Il faut choisir " m " surfaces de glissement pour un vecteur [U] de dimension " m ". Le chercheur J.J. Stolone a proposé une forme d'équation générale pour déterminer la surface de glissement qui assure la convergence d'une variable d'état x vers sa valeur de consigne X_{ref} [Slo91].

$$S = e(x) + \lambda_1 \frac{d}{dt} e(x) + \lambda_2 \frac{d^2}{dt^2} e(x) + \lambda_3 \frac{d^3}{dt^3} e(x) + \dots + \lambda_m \frac{d^m}{dt^m} e(x) \quad (\text{III-63})$$

Avec

x : variable à réguler.

e(x) : l'écart de la variable à réguler = $x_{ref} - x$

λ_i (i=1... m) : Constantes positives.

L'objectif de cette commande est de garder la surface qui tend à zéro. Cette dernière est une équation différentielle linéaire dont l'unique solution est $S(X)= 0$, pour un choix convenable du paramètre λ . Ceci revient à un problème de poursuite de trajectoire, ce qui est équivalent à une

linéarisation exacte de l'écart, tout en respectant la condition de convergence.

III.4.6.2 Condition d'existence et de convergence

Les conditions de convergence permettent aux variables à contrôler du système de converger vers la surface de glissement en régime permanent. Il s'agit donc de formuler une fonction scalaire positive $V(x)$ appelée fonction de Lyapunov pour les variables d'état du système et de choisir ainsi une loi de commande u qui fera décroître cette fonction.

$$(V(x) < 0) \quad (III-64)$$

En définissant la fonction de Lyapunov [Utk 93] :

$$V_x = \frac{1}{2} S^2(x) \quad (III-65)$$

Sa dérivée sera:

$$\dot{V}(x) = S(x)\dot{S}(x) \quad (III-66)$$

Pour que la fonction de Lyapunov décroisse, il suffit d'assurer la condition suivante :

$$\dot{V}(x) = S(x) \cdot \dot{S}(x) < 0 \quad (III-67)$$

Cette condition est nécessaire pour d'une part estimer les performances de la commande, et d'autre part assurer la robustesse et garantir la stabilité du système non linéaire global [19], [23].

III.4.6.3 Détermination de la loi de commande

Une fois la surface de glissement choisie, il reste à déterminer la commande nécessaire pour attirer la variable à contrôler vers la surface et ensuite vers son point d'équilibre (origine du plan de phase) tout en assurant la condition d'existence du mode de glissement [19], [23]. Une des hypothèses essentielles dans la conception des systèmes à structures variables est que la commande doit commuter entre les extremums de la loi de commande U_{\max} et U_{\min} .

$$u(x, t) = \begin{cases} u_i^+(x, t) & \text{si } S(x) > 0 \\ u_i^-(x, t) & \text{si } S(x) < 0 \end{cases} \quad (III-68)$$

Le rôle de ces lois de commande et de faire en sorte que chaque vecteur d'état x , se trouvant en dehors de la surface de glissement régie par la condition $S(x)=0$, est attiré vers la même surface, en un temps fini. Une fois la surface atteinte, le mode de glissement à lieu, et les dynamiques désirées du système sont effectives. De ce fait, le système devient insensible aux incertitudes paramétriques et aux

perturbations externes. Il existe plusieurs types de systèmes de commandes à structures variables dont la plus fréquemment utilisée et qui a fait l'objet de notre travail est appelée commande équivalente. La structure du contrôleur à structure variable dans ce cas est donnée par l'équation :

$$U = U_{eq} + U_n \quad (III-69)$$

Elle est constituée de deux parties, une première concernant la linéarisation exacte et une deuxième stabilisante, représentant la dynamique du système durant le mode de convergence. Cette dernière est très importante dans la technique de commande non linéaire, car elle est utilisée pour éliminer les effets d'imprécision du modèle et les perturbations extérieures.

Ou:

U_{eq} : correspond à la commande de linéarisation proposée par Filippo et Utkin (commande équivalente), permettant d'avoir la trajectoire de l'écart sur la surface de glissement de la variable à contrôler et obtenue en imposant $S(x)=0$.

U_n : Commande d'atteignabilité.

III.5 Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude des techniques appliquées à notre système, nous avons débuté par les notions de base de la régulateur synergétique et du logique Flou et du système d'orientation des pales et enfin nous avons terminé par la mode glissant. Dans le but de valider ces techniques, nous avons appliqué ces techniques à notre système, comme il est détaillé dans le chapitre suivant.

CHAPITRE IV :

Resultats et simulations obtenus

IV.1 Introduction

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique ou, à défaut, la simulation du processus est nécessaire. La chaîne de conversion a été modélisée et simulée à l'aide du logiciel Matlab-Simulink. Les convertisseurs électroniques présentés précédemment ont besoin, pour fonctionner, de recevoir des ordres de commande. A l'aide du logiciel de simulation Matlab-Simulink, on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc.

Dans la première partie de ce chapitre, un modèle analytique de la turbine éolienne est décrit ainsi que l'identification des différents paramètres qui régissent le fonctionnement de cette dernière à savoir le coefficient de puissance (C_p), l'angle de calage (β) et la vitesse spécifique du vent (λ).

Dans ce chapitre, nous allons faire des simulations avec un contrôle de base en mode glissant.

IV.2 L'outil Matlab/Simulink

MATLAB fait partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et
- Simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulink spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communication et de traitement du signal.

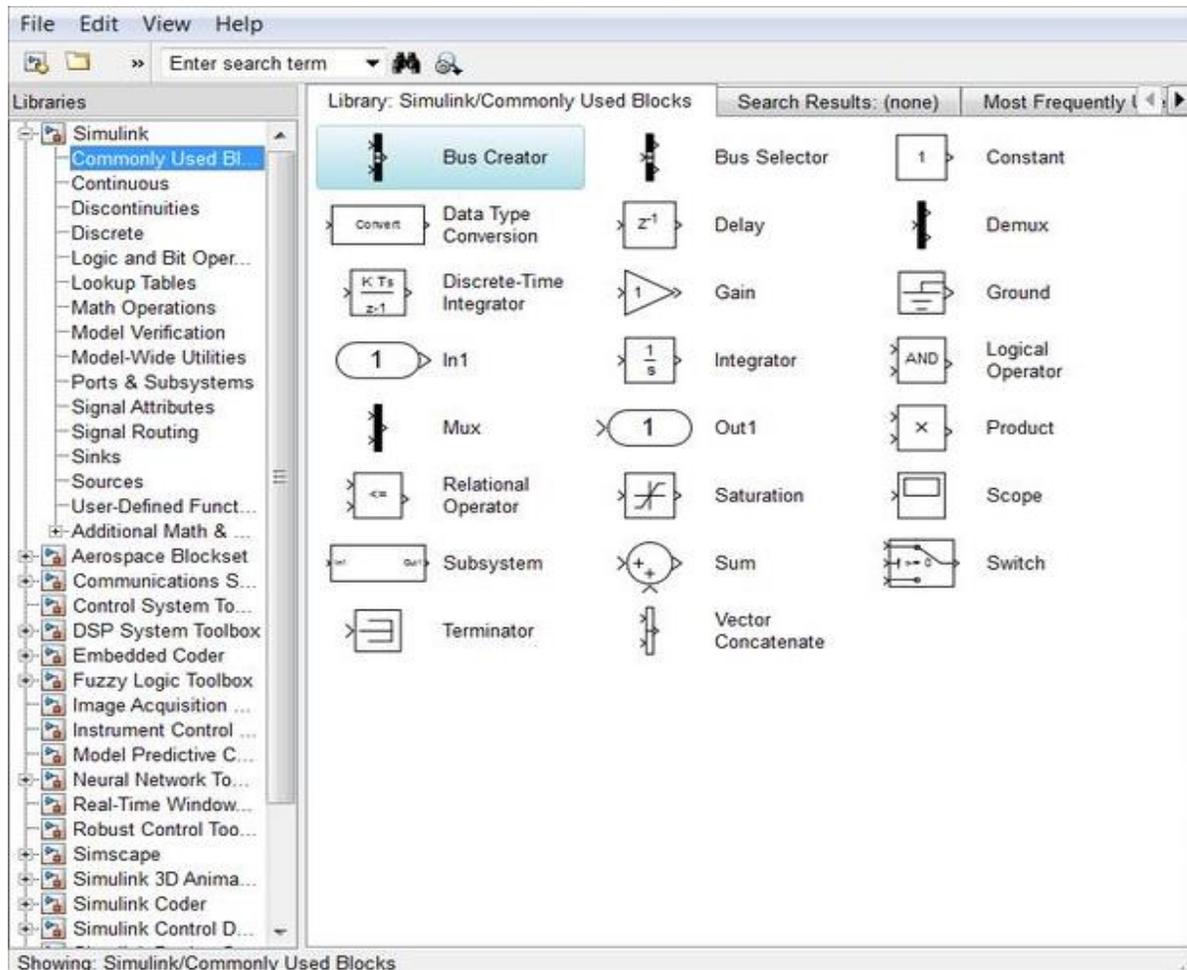


Fig.IV.1: bibliothèque SIMULINK

IV.3 Simulation et résultats

IV.3.1 Courbes caractéristiques du coefficient de puissance

Les performances de la turbine éolienne à vitesses variables et à réglage par orientation de pale, sont déterminées par les caractéristiques des courbes reliant le coefficient de puissance, la vitesse spécifique, et l'angle de calage. Ces courbes peuvent être obtenues à partir des relevés réels réalisés sur différentes catégories d'éoliennes, ou par des formules non linéaires [14], [32].

Le coefficient de puissance utilisé dans notre modélisation est donné par la formule suivante :

$$C_p = C_1 \cdot (C_2 - C_3 \cdot \beta - C_4 \cdot \beta^x - C_5) \cdot e^{-c_6(\lambda_1)} \quad (IV-70)$$

$$\text{Tel que : } C_1=0,5 ; C_2=\frac{116}{\lambda_i} ; C_3=0,4 ; C_4=0 ; C_5=5 ; C_6=\frac{21}{\lambda_i}$$

$$\text{Et : } \frac{I}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0,08 \cdot \beta} - \frac{0,035}{\beta^3 + 1} \quad (IV-71)$$

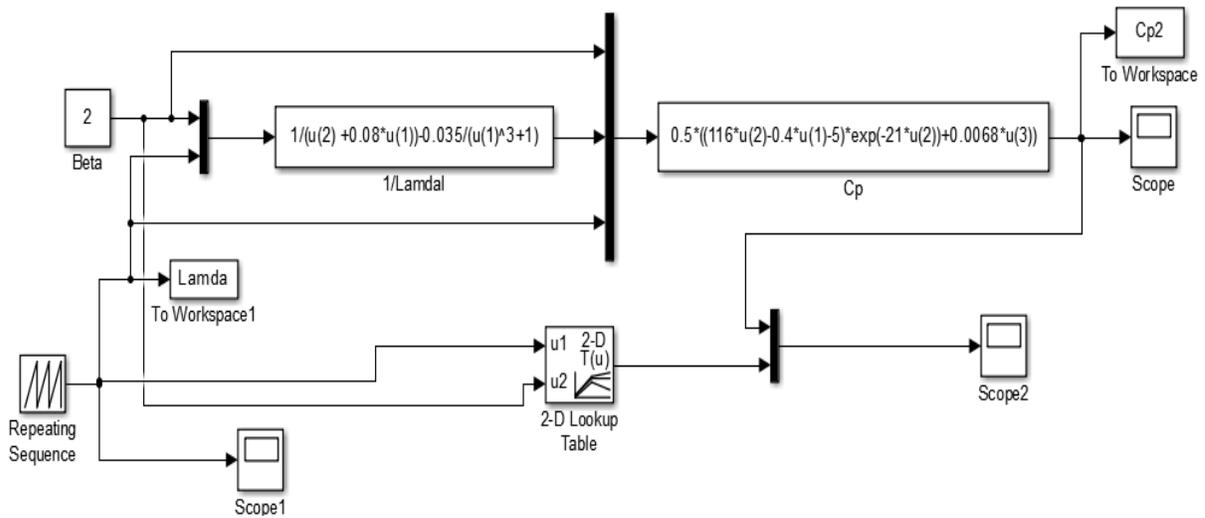


Fig.IV.2: schéma bloc du modèle de la Coefficient aérodynamique (C_p) en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ)

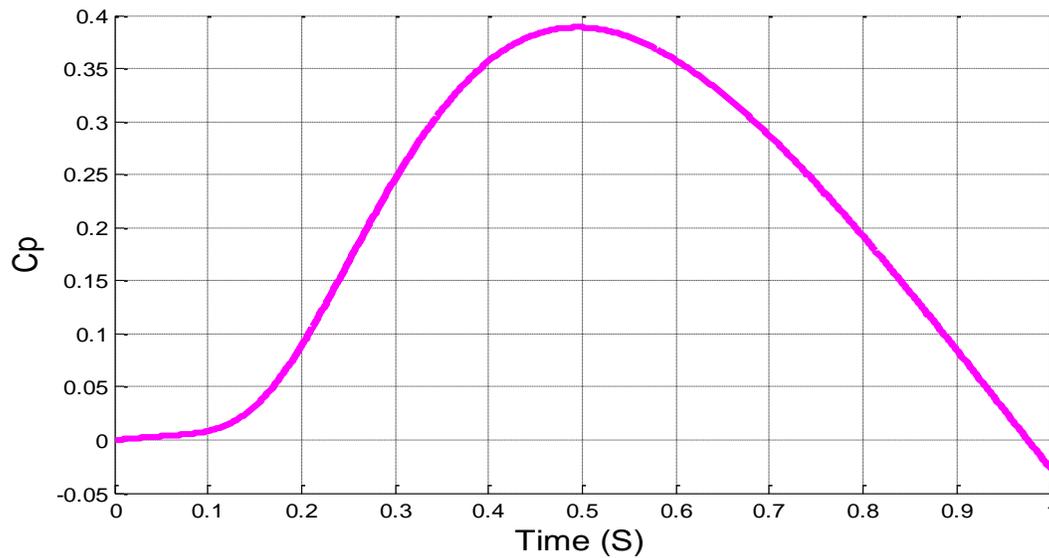


Fig.IV.3: coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour un angle de calage optimale (2°).

La (Figure.IV.4) montre les différentes courbes obtenues pour plusieurs angles de calage. Nous constatons que la vitesse spécifique ait relativement une large gamme pour un angle de calage de 2 degré. Ceci représente un a avantage pour les turbines éoliennes destinées pour fonctionner avec une large gamme de vitesses de vent. Avec l'augmentation de l'angle de calage, la vitesse spécifique et le coefficient de puissance diminuent considérablement.

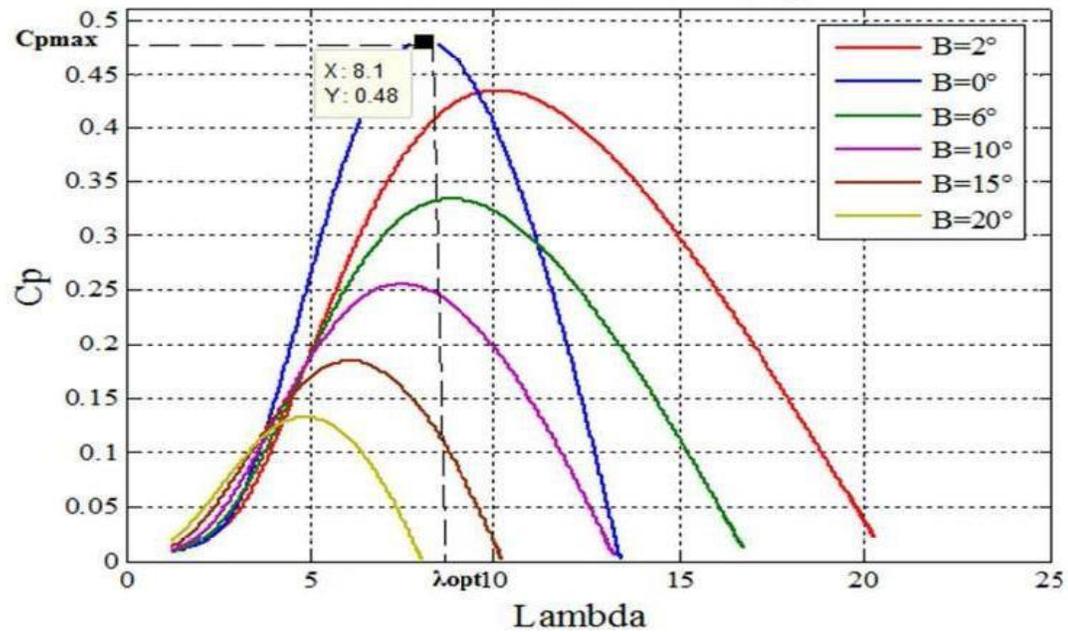


Fig. IV. 4: coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour différents angles de calage

De la (Figure.IV.4) on déduit le coefficient de puissance optimal ainsi que la vitesse spécifique optimale

$$C_{p_pt} = 0.48 \quad \lambda_{Cp_opt} = 8.1$$

IV.3.2 Simulation du système avec turbine

La turbine est entraînée par une GSAP, dont le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine est représenté dans la (figure .IV.5)

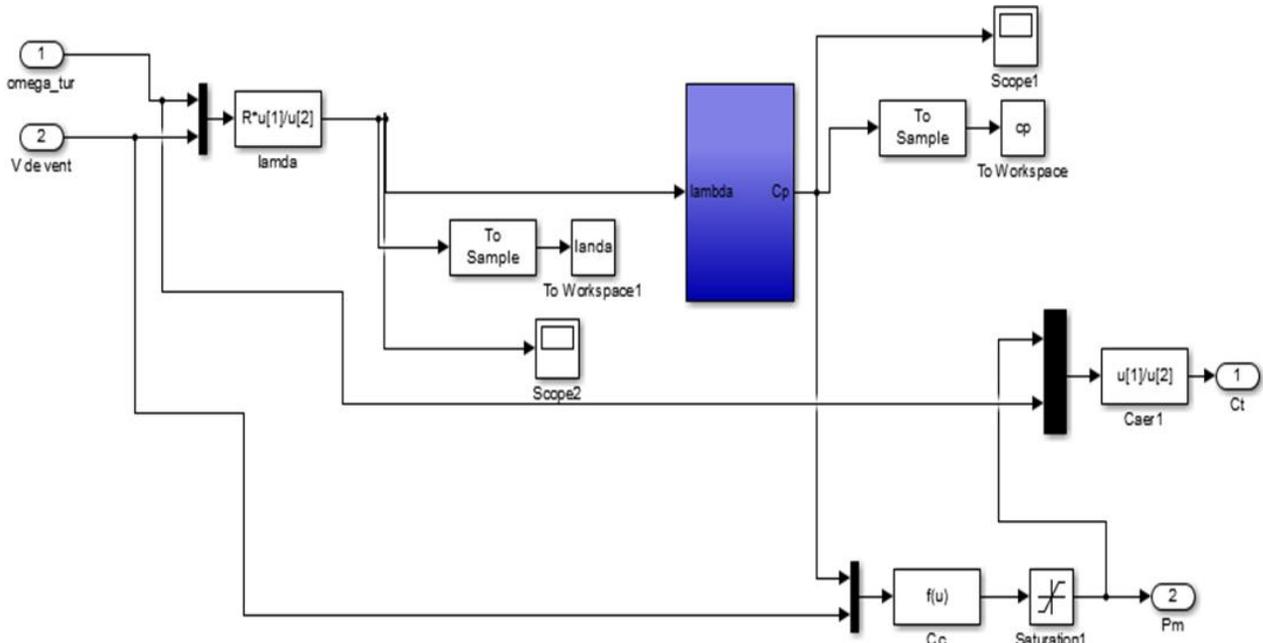


Fig.IV.5: schéma bloc du modèle de la turbine

Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur, le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

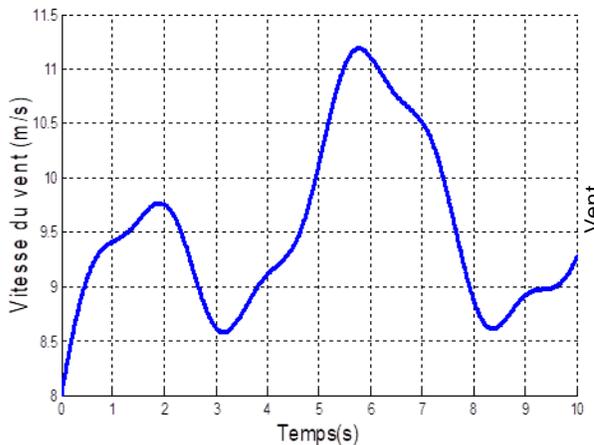


Fig. IV .6 : profil du vent appliqué à la turbine

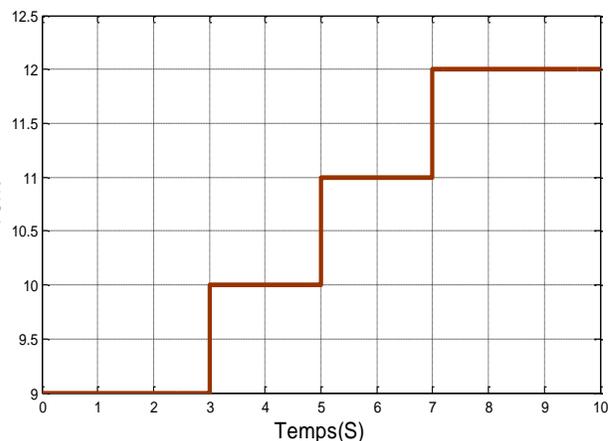


Fig. IV.7 : Vitesse du vent turbine

Le modèle de la turbine a été validé par simulation sous l'environnement Matlab/Simulink. Les résultats présentés dans la suite sont obtenus pour une turbine de 11kW dont les paramètres sont définis dans l'annexe. Ils sont réalisés en boucle ouverte afin d'observer le comportement de la turbine face aux fluctuations du vent.

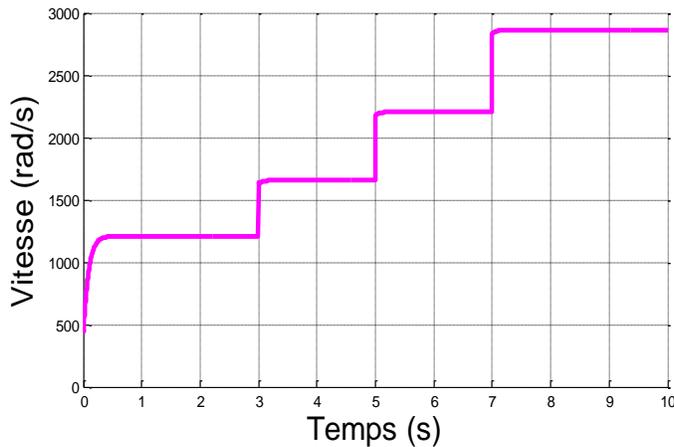


Fig. IV .8: Vitesse mécanique de la turbine

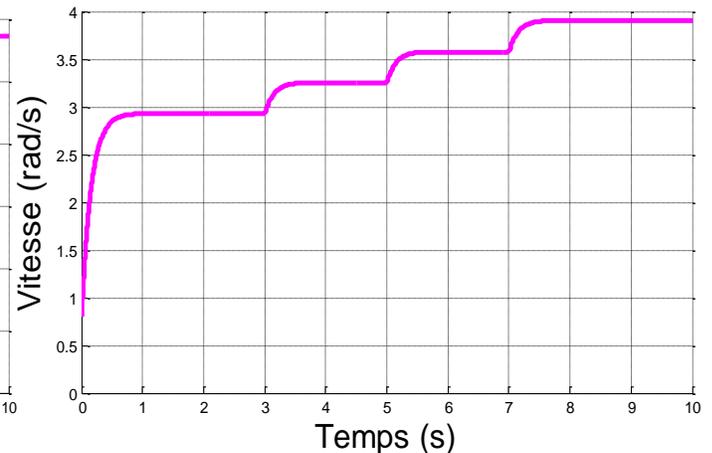


Fig. IV .9: Vitesse de la turbine

D'après la (Figure IV.8), la variation de la vitesse mécanique est adaptée à la variation du vent, ce qui montre l'influence directe du vent sur la vitesse de rotation de l'arbre. On note aussi un grand écart entre la vitesse mécanique et sa valeur de référence.

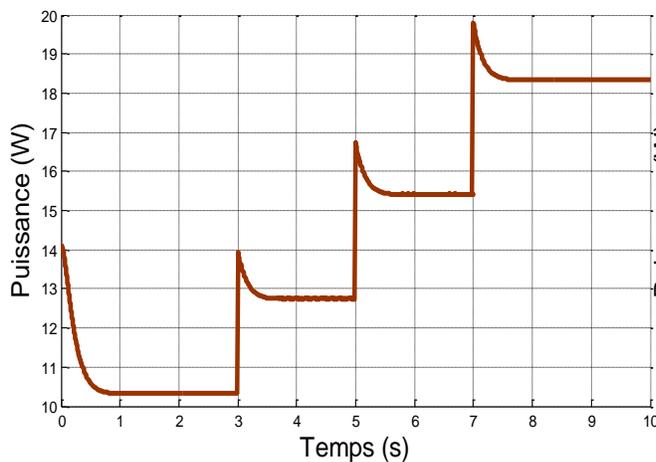


Fig.IV.10: Puissance de la Multiplicateur

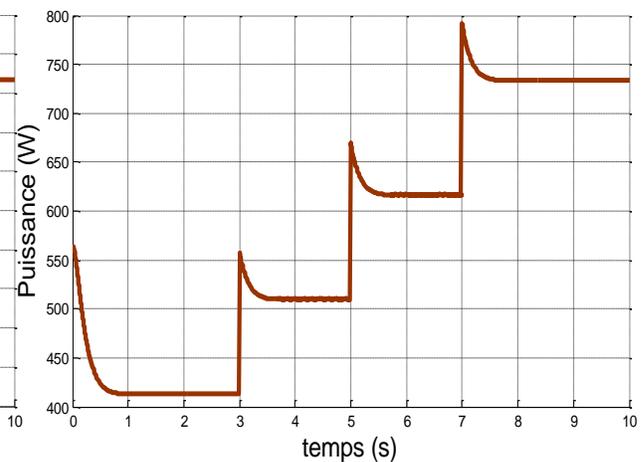


Fig.IV.11: puissance de la turbine

Le multiplicateur permet de transformer la puissance à vitesse lente et à un couple élevé produite par le rotor de l'éolienne, en une puissance à grande vitesse et à un couple faible utilisée par la génératrice.

IV.3.3 La génératrice synchrone à aimant permanent

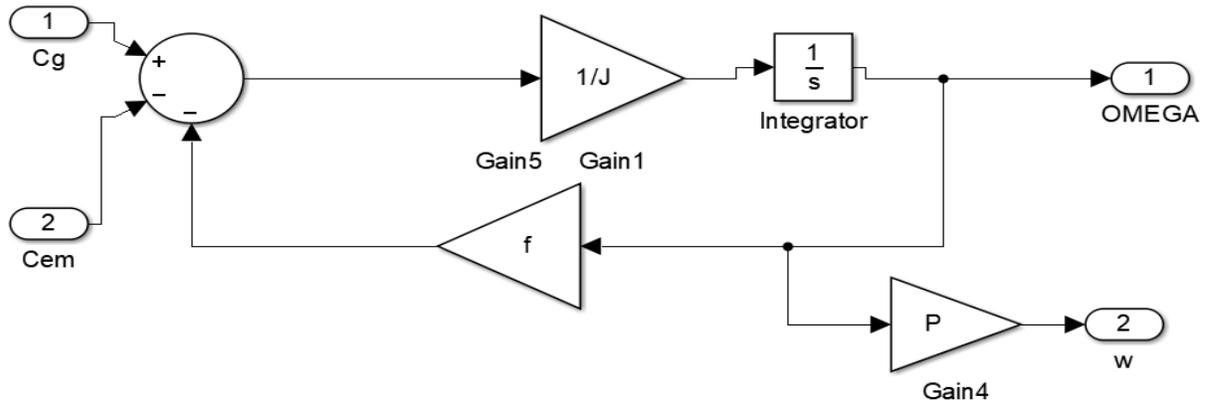


Fig.IV.12: schéma bloc du modèle de la GSAP.

L'association de la génératrice à la turbine permet la génération de l'énergie électrique, c'est pourquoi nous avons procédé à des simulations sous Matlab-Simulink afin de voir le comportement de la génératrice synchrone en visualisant sa vitesse de rotation ainsi que les tensions et courants.

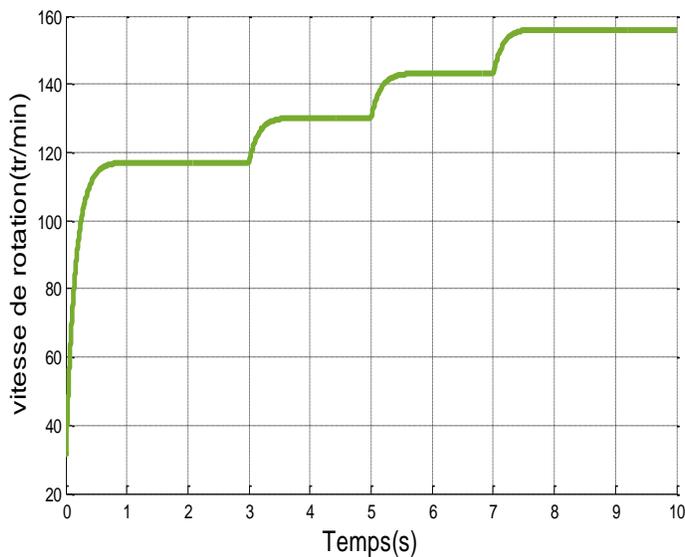


Fig.IV.13: Vitesse oméga mécanique de la GSAP

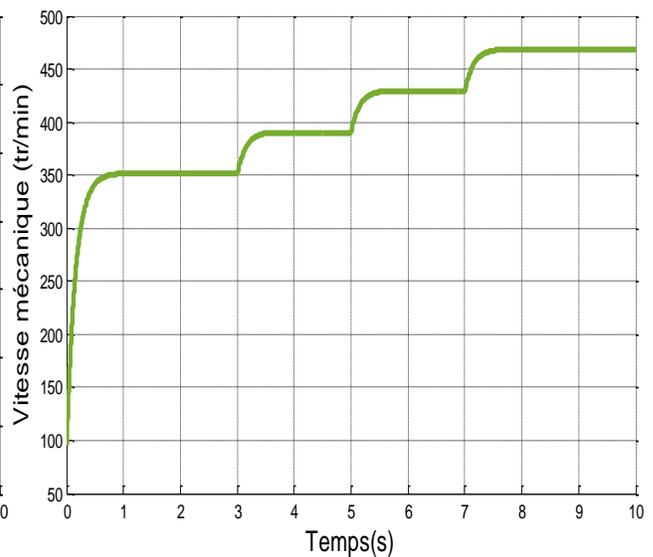


Fig.IV.14: Vitesse mécanique de la GSAP

Puissance électrique en régime permanent sont bien adaptées aux variations de la vitesse du vent.

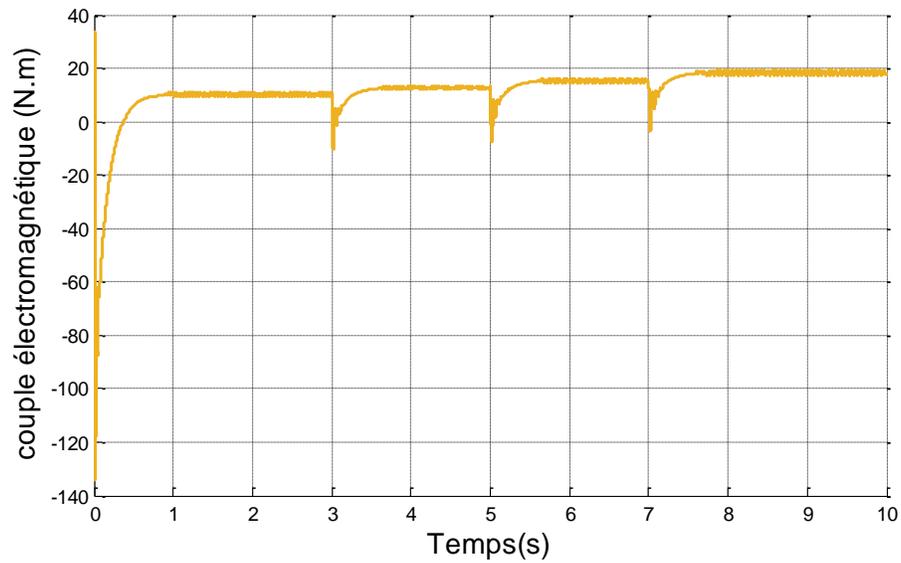


Fig.IV.15: couple électromagnétique de la GSAP

On note que le couple électromagnétique est proportionnel à la puissance générée, avec une stabilité à la valeur 20, et ce couple est considéré comme bon.

IV.3.4 Simulation de Mode Glissant (MG)

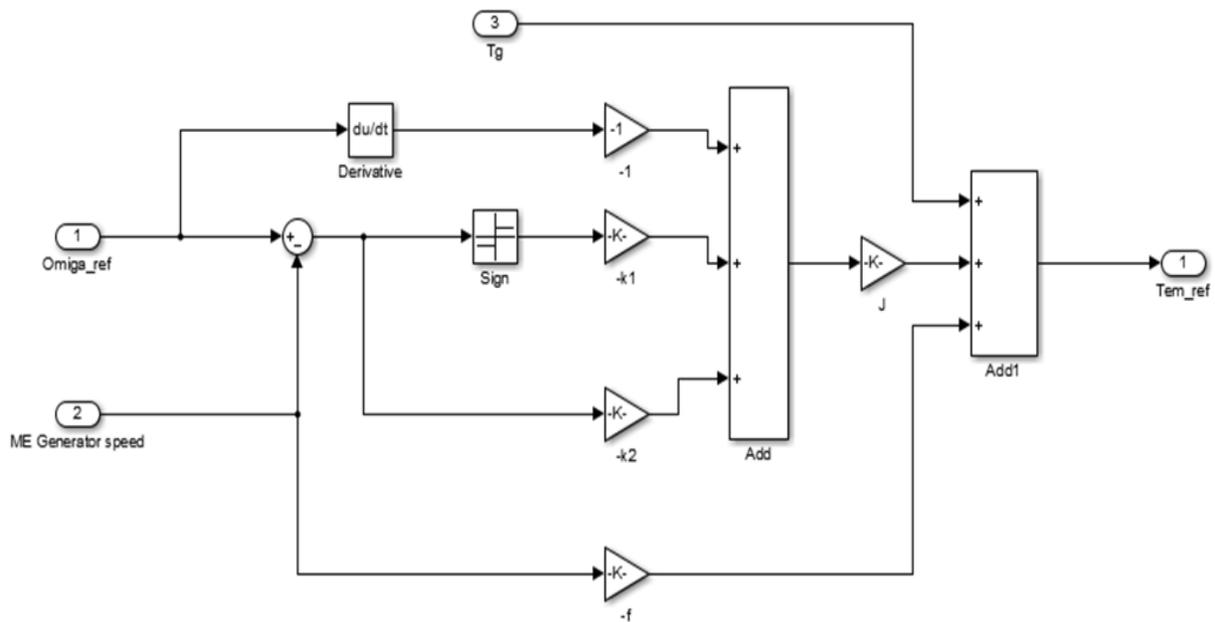


Fig.IV.16: Schéma bloc du modèle de la Mode Glissant

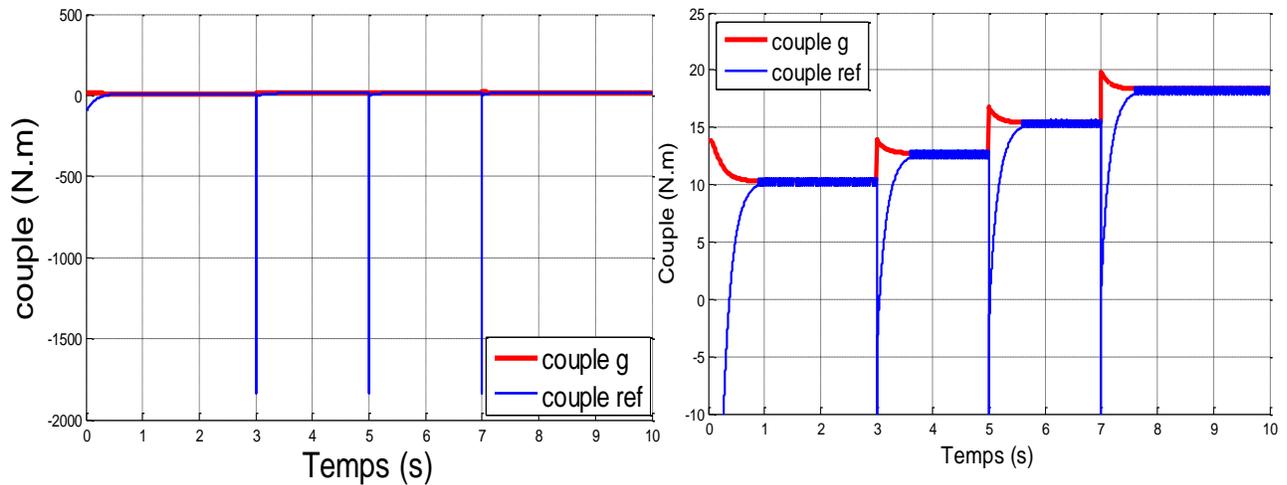


Fig.IV.17:couple référence et couple mécanique

Fig. IV.18: Zoom couple référence et couple mécanique

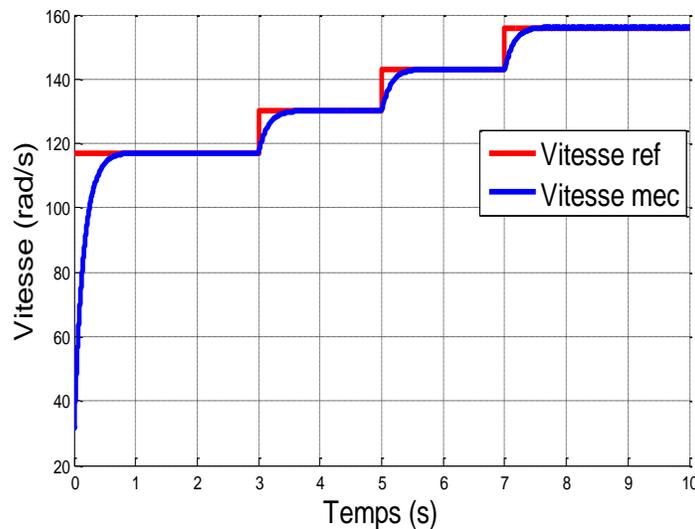


Fig.IV.19: Vitesse mécanique et référence vitesse

La turbine montre une bonne adaptation quant aux variations de la vitesse du vent néanmoins nous remarquons sur le zoom que l'action (avance de phase) pour palier à l'action du couple issu de la turbine est bien apparente la vitesse mesurée est au-dessus de la vitesse de référence.

Représentent la régulation de la vitesse mécanique utilisant un régulateur Mode Glissant. Lorsque la turbine atteint son régime de fonctionnement permanent, sa vitesse est alors la réplique exacte de la vitesse de référence : ceci indique l'efficacité de la technique de contrôle utilisée.

IV.4 La simulation de la machine synchrone à aimant permanent

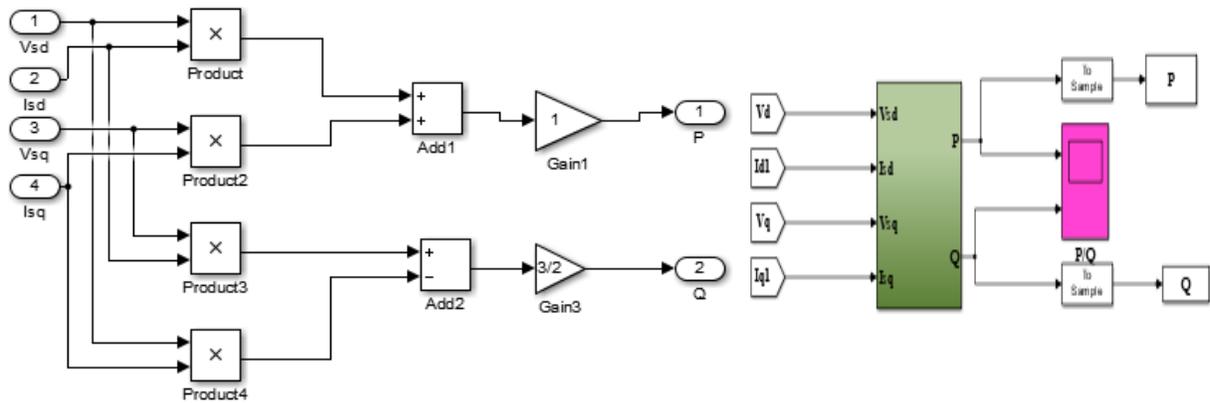


Fig. IV.20: Schéma fonctionnel de conversion de modèle énergétique

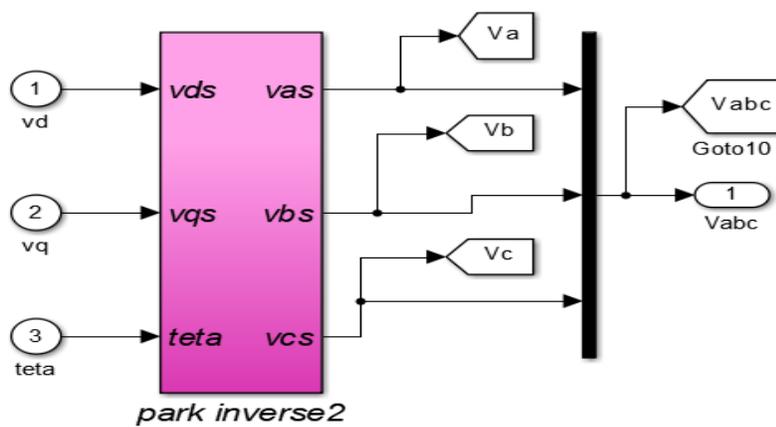


Fig. IV.21: schéma bloc du modèle conversion de la tension

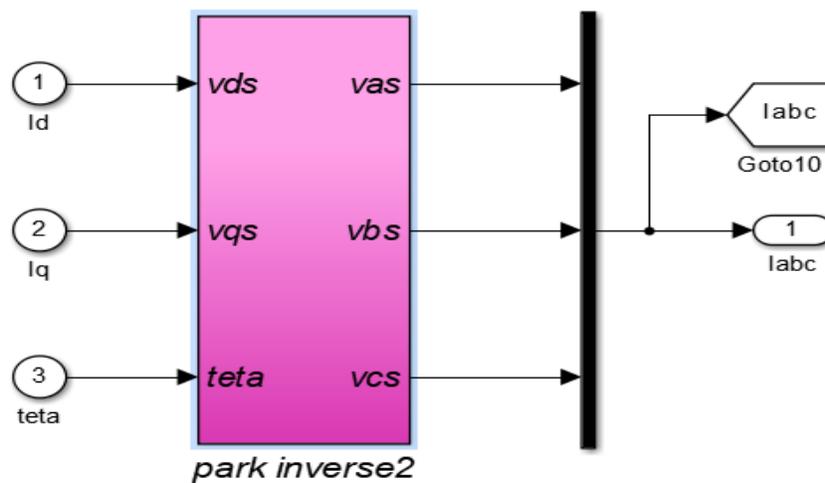


Fig. IV.22: schéma bloc du modèle conversion de courants

IV.3.6 Résultats de la simulation MSAP

A partir des résultats illustrés sur la figure (Fig.25.IV), on remarque que les puissances (active et réactive) sont adaptées à la variation de la vitesse du vent et on constate que la courbe de la puissance mécanique de la turbine est bien suivie par celle de la puissance électrique produit par la GSAP.

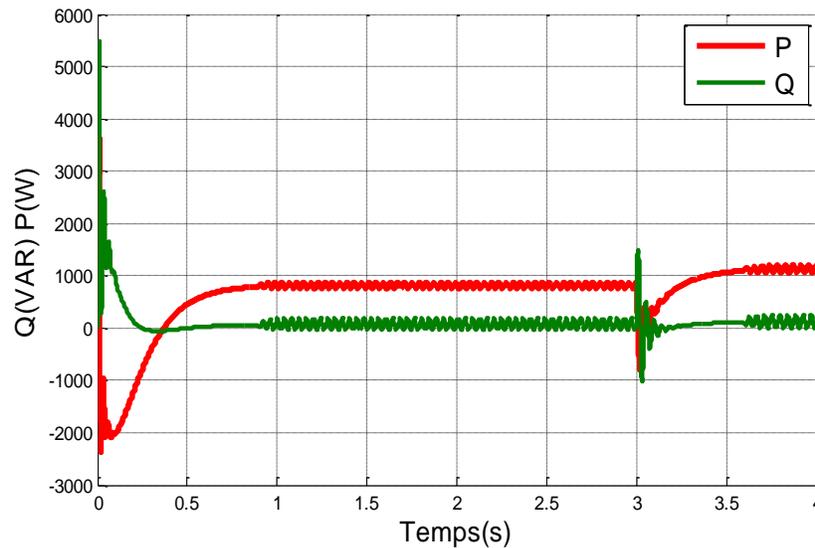


Fig.IV.25: la puissance active et la puissance réactive

La puissance réactive oscille autour de sa référence $Q_{ref} = 0\text{Var}$, elle est d'une valeur moyenne presque nulle. Tandis que la puissance active est superposée à sa référence, elle est parfois positive (fonctionnement générateur de la machine, phase d'injection au réseau) et d'autre part négative (fonctionnement moteur de la machine en absorbant de l'énergie du réseau pendant une courte durée transitoire), donc les résultats sont acceptables.

La figure (Fig. IV. 26) représente l'allure de la tension à la sortie de l'onduleur. Il est clair que l'amplitude de la tension devient plus importante avec l'augmentation de la vitesse du vent.

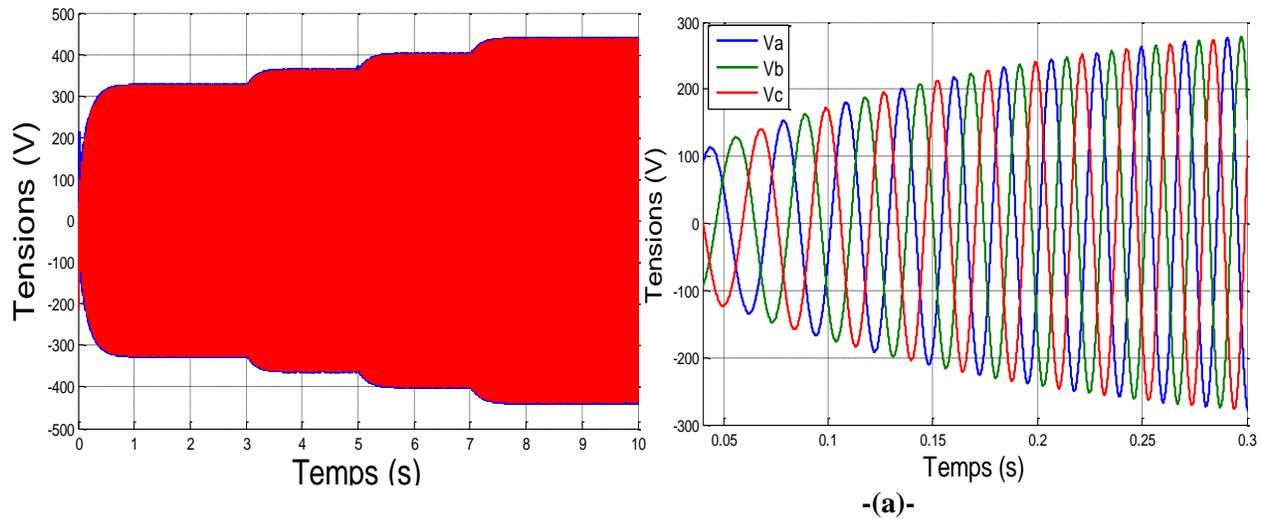


Fig.IV.26: Allure de la Tension à la sortie de l'onduleur

Fig.IV.27:- (a) -Zoom Allure de la Tension à la sortie de l'onduleur

Les tensions statoriques de la GSAP représentées sur la figure (Fig. IV. 26), ont pris leurs formes sinusoïdales et sont aussi adaptées à la variation de la vitesse du vent.

Les courants statoriques représentés sur la figure (Fig.IV. 27), ont pris leurs formes sinusoïdales et sont aussi adaptés à la variation de la vitesse du rotor. La fréquence rotorique dépend de la variation de rotation de l'éolienne

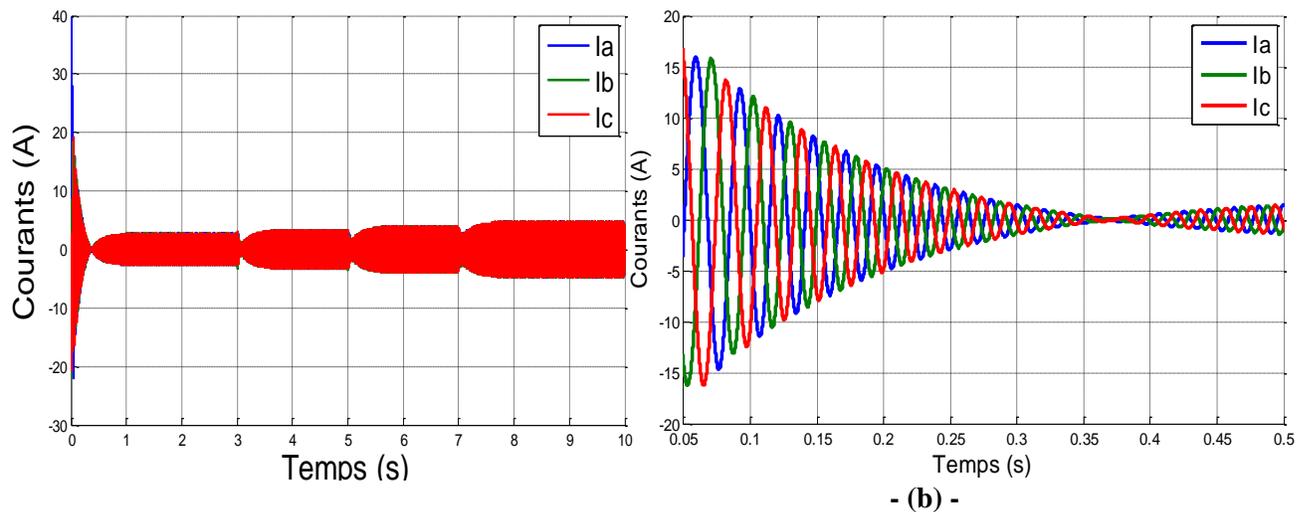


Fig.IV.28: Allure des courants.

Fig.IV.29: - (b) -Zoom Allure des courants

A partir des figures précédents, on observe l'influence de la vitesse du vent, et par la suite son énergie cinétique sur les amplitudes des courants et des tensions. Avec l'augmentation de la vitesse du vent, les valeurs du courant et de la tension deviennent plus importantes, que ce soit du côté génératrice ou bien du côté charge.

IV.4 Schéma de simulation d'éolienne

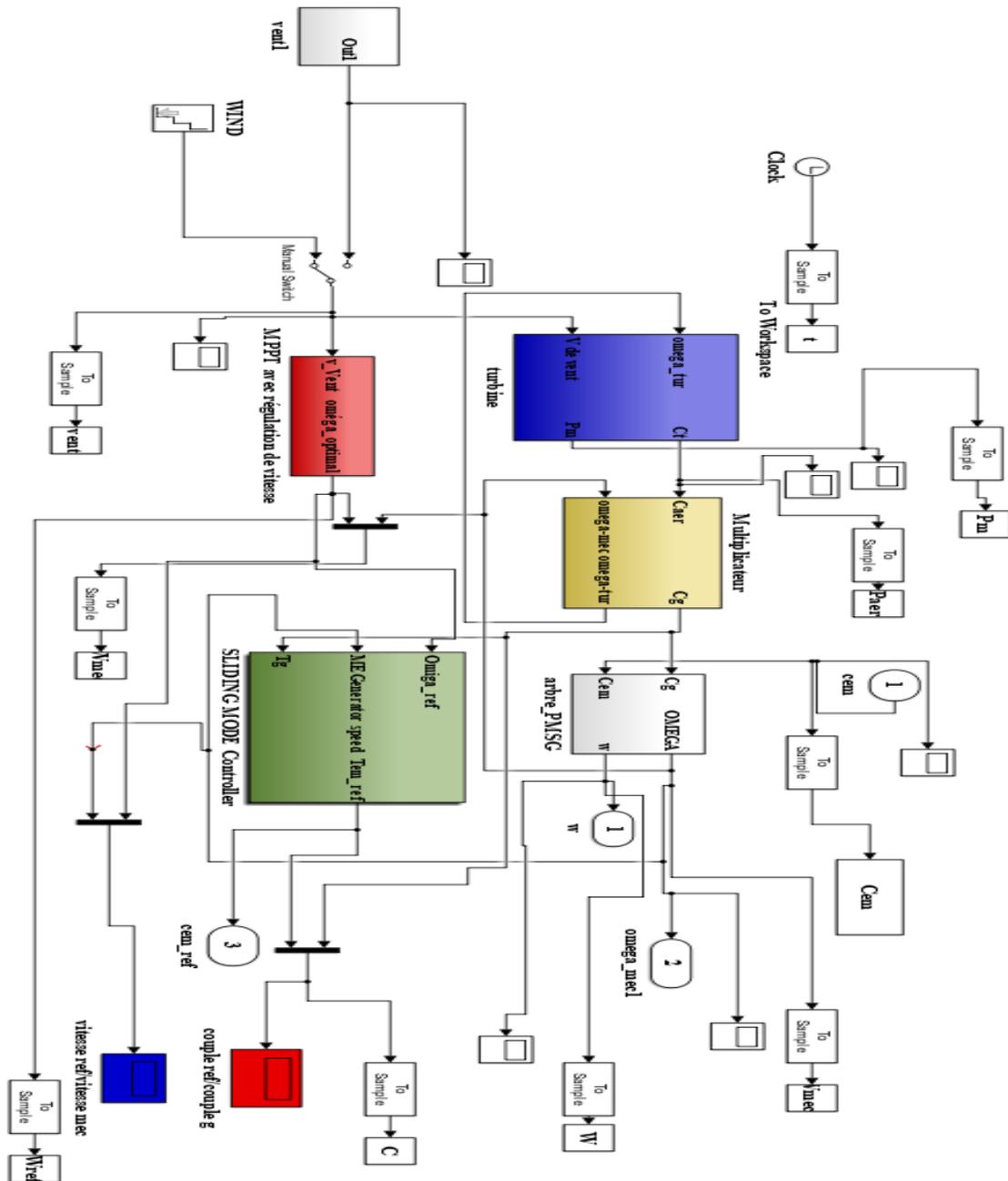


Fig. IV.30: Schéma bloc de la chaîne de la conversion éolienne

IV.5 Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre la commande à structure variable fonctionnant en mode de glissement appliquée à la génératrice synchrone à aimants permanents. Après la présentation de la théorie de base de cette commande, nous avons défini la méthodologie de conception nécessaire pour cette commande ; nous constatons que le choix convenable des surfaces de commutation permet d'obtenir des hautes performances. La commande par mode glissant présente plusieurs atouts tel que, la robustesse, précision importante, la stabilité, la simplicité et un temps de réponse faible.

Dans ce chapitre, un modèle d'optimisation de puissance a été réalisé. Il est basé sur l'estimation de la vitesse de vent. Une application de ce modèle pour es différentes formes de C_p a été réalisée.

Nous avons également créé des modèles analytiques pour d'autres membres utilisés dans la chaîne de conversion d'une éolienne synchrone à aimant permanent.

Annexes

Annexes

Paramètre de la génératrice

$$R_s = 0.895 \Omega;$$

$$R_s = R_s;$$

$$L_D = 0.012H ;$$

$$L_Q = 0.0211H ;$$

$$J = 0.00141Kg. m^2$$

$$F = 0.001 Nm/rd/s ;$$

$$p = 3;$$

$$K = 0.9 ;$$

$$R_{CH} = 50\Omega ;$$

$$L_{CH} = 0.002H \text{ f}i\text{f}$$

Paramètre de la turbine:

$$Rho = 1.25m^{-3};$$

$$G = 40; 28; 15; 75;$$

$$J = 0.00176Kg. m^2;$$

$$f = 3.8e - 4 Nm/rd/s;$$

$$R = 2m; 0.5m;$$

$$H = 10m;$$

$$S = 2 * R * H;$$

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'utilisation de la machine synchrone à aimant permanent avec des convertisseurs statiques de puissance dans un système de conversion d'énergie éolienne.

Dans un premier temps, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, le gisement éolien mondial est considérable puisqu'il est très supérieur à la consommation énergétique actuelle de l'humanité. Cependant le développement de son exploitation dépendra, non pas des difficultés technologiques surmontées actuellement côté pratique, mais de données économiques et politiques favorisant ou non les diverses formes d'énergies exploitables. Dans ce contexte, quelques notions principales sur la technologie éolienne ont été données concernant principalement, la conception, les différents types d'éoliennes utilisés et les avantages et les inconvénients des éoliennes.

Dans le chapitre deux, nous avons modélisé le vent qui est la source principale d'énergie. Nous avons ensuite modélisé les différentes parties de la chaîne éolienne à savoir la turbine.

Nous avons ensuite abordé le problème lié à la puissance électrique produite par la génératrice grâce à son entraînement par le vent. Nous avons élaboré des stratégies de commande permettant d'atteindre plusieurs objectifs concernant la puissance active et la puissance réactive à savoir une commande de la puissance active variable, et une commande de la puissance réactive égale à zéro.

Dans le troisième chapitre, nous avons également présenté les techniques de contrôle avancées les plus importantes (Logique Floue, Mode Glissant, régulateur synergétique).

Le dernier chapitre, a été consacré à la présentation des résultats de cette expérience avec des interprétations et comparaison des courbes entre le résultat de simulation et expérimental.

Références bibliographiques

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAFIQUES

- [1] M.Yin, G.Li, M. Zhou, C.Zhao, << Modeling of the wind turbine with a permanent magnet synchronous generator for integration >>, Power Engineering Society General Meeting, June 2007, pp 1-6.
- [2] J-C. Sabonnadière, << Nouvelles technologies de l'énergie 1 >>, Lavoisier, 2006.
- [3] M.Crappe, << Commande et régulation des réseaux électriques >>, Lavoisier, 2003
- [4] <http://www.ader.ch/energieaufutur/energies/eole/>
- [5] A. Smadi, M. Farida, «contribution à l'étude des systèmes éoliennes, application aux génératrice : A courant continue, Synchrone a pôles saillant et à aimant permanent », thèse ingénieur de l'université de EL Hadj Lakhdar –Batna, option maintenance, 27 juillet 2007.
- [6] REDJEM. R, “ Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne Département d'électrotechnique Université de Constantine 2009.
- [7] M.Aydin, S.Huang, T.A Lipo, « Torque Quality and Comparison of Internal and External Rotor Axial Flux Surface-Magnet Disc Machines », IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.53, n°3, Juin, 2006.
- [8] T.Burton, D.Sharpe, N. Jenkins, E.Bossanyi « Wind Energy Handbook », John Wiley & Sons, 2001.
- [9] M. Stieber « Wind Energy Systems for Electric Power Generation » Springer Series in Green Energy and Technology, Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 2008.
- [10] F.Poitiers ; « Etude et Commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : - Machine asynchrone à cage autonome - Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de doctorat, 19 Décembre 2003, Ecole polytechnique de l'université de Nantes.
- [11] S. El aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Cohabité avec L'université des sciences et technologies de Lille 1 (USTL) Spécialité : Génie électrique - Electronique - Automatique, 06 décembre 2004.
- [12] S.R.Guda, « Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation ». Thèse de master de l'université de Bozeman, Monata. Juillet 2005.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [13] A.D. Hansen, C.Jauch, P.Sørensen, F.Iov, F. Blaabjergm, « Dynamic wind turbine models in power system simulation tool DIgSILENT », projet de recherche, laboratoire national de Risø, Roskilde. Décembre 2003.
- [14] A.M. El Refaie, T.M. Jahns, D.W. Novotny, « Analysis of Surface Permanent Magne Machines with F ractional Slot Concentrated Windings », IEEE Transactions o n Energy Conversion 2006.
- [15] J. Wilkie, W.E. Leithead, C. Anderson, « Modelling of wind turbines by simple models » Wind engineering, vol. 14, No 4, 1990, pp. 247-274. [37] S.R.Guda, « Modeling and power management of a hybrid wind-microturbine power generation ». Thèse de master de l'université de Bozeman, Monata. Juillet 2005.
- [16] A.M. El-Refaie, T.M. Jahns, « Comparison of Synchronous PM Machine Types for Wide Constant-Power Speed Range Operation », IAS'05, 2005.
- [17] V.Courtecuisse, « Supervision d'une centrale multi source à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique. », Thèse Doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers. Spécialité : Génie Electrique. 20 Novembre 2008.
- [18] Batna, 2007 A. Chaiba, "Commande par la Logique Floue de la Machine Asynchrone à Double Alimentation Alimentée en Tension," Mémoire de Magister, Université de Batna, 2004. [17] E. Slotine and W. Li, Applied nonlinear control, Ed. Prentice Hall, N.J., 1991.
- [19] V.I. Utkin, and H. Lee, « Chattering problem in Sliding Modes Control Systems » , pp 346 - 350, Alghero Italy, 2007.
- [20] MEDJBEUR LEMYA, « Contribution au Contrôle Adaptatif Flou des Systèmes non Linéaires» , thèse de Doctorat, Université de Batna, 2014. [20] ABDERREZEK Hadjer, «Contribution à la commande robuste des systèmes non linéaires» , thèse de Magistère, Université de Sétif, 2014.
- [21] M. E. Emna, K. Adel, et M. F. Mimouni, The Wind Energy Conversion System Using PMSG Controlled by Vector Control and SMC Strategies , International Journal of Renewable Energy Research. IJRER, Vol. 3(Issue 1), pp. 41–50, 2013.
- [22] Y. Errami, M. Ouassaid, M. Cherkaoui, M. Maaroufi, Variable Structure Sliding Mode Control and Direct Torque Control of Wind Power Generation System Based on The PM

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Synchronous Generator, *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 66 (Issue. 3), pp. 121–131, 2015.
- [23] N. Huang, J. He, et N. A. Demerdash, Sliding mode observer based position self-sensing control of a direct-drive PMSG wind turbine system fed by NPC converters , *IEEE International in Electric Machines & Drives Conference (IEMDC)*, pp. 919–925, Chicago, IL , May 2013.
- [24] L. Medjbeur , M.N. Harmas, Adaptive Fuzzy Terminal Synergetic Control, *IEEE Communications, Computing and Control Applications (CCCA)*, pp. 1–16, Hammamet , March 2011.
- [25] Z. Bouchama, and M.N. Harmas, Optimal robust adaptive fuzzy synergetic power system stabilizer design, *Elsevier, Electric Power Systems Research*, vol. 88 (Issue 1), pp. 170–175, February 2012
- [26] N. Bounasla, K. E. Hemsas, H. Mellah, Synergetic and sliding mode controls of a PMSM: A comparative study, *Journal of Electrical and Electronic Engineering*; Vol 3(1-1): pp.22-26, February 2015.
- [27] A. Kolesnikov, G. Veselov, et al., A Synergetic Approach to the Modeling of Power Electronic Systems, the 7th Workshop on Computers in Power Electronics, COMPEL, pp.259-262, Blacksburg VA, 2000.
- [28] A.Petersonn, « Analysis, Modeling and Control of Doubly-Fed Induction Generators for Wind Turbines », thèse de doctorat de l'université de Chalmers, Goteborg, 2003.
- [29] E. Muljadi, « Pitch-Controlled Variable-Speed Wind Turbine Generation », *IEEE Transaction on Industry Applications*, Vol. 37, No 1, Jan. /Feb. 2001.
- [30] P.R.Johansen, D.Patterson, C.O'Keefe, J.Swenson « The use of an axial flux permanent magnet in wheel direct drive in an electric bicycle », *World Renewable Energy Conference*, Perth, Australia, 2001, vol.22,n°123, pp 151