REPUBLIQUEALGERIENNEDEMOCRATIQUEETPOPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHESCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIAFARESDEMEDEA



Faculté **d**e **T**echnologie

Département de **G**énie **E**lectrique

Mémoire de fin d'études de Master

Filière :Electrotechnique

Spécialité :énergie renouvelable en électrotechnique

Commande d'un émulateur de vent à base d'une machine à courant continu

Présenter par:

ALI KACEM ISLEM

BELHADJ MOHAMED AMINE

PROMOTION 2024

Proposés et Dirigés par :

Dr.BOULKHRACHEF

Pr.MOUALDIA

Remerciements:

Nous remercions le bon Dieu de nous avoir accordé toute la patience, le courage, la volonté et la motivation qui nous ont permis de mener à bien ce travail jusqu'à sa fin.

Nous tenons à présenter nos remerciements à notre promoteur Dr. Boulkrachef et pr .Moualdiya pour avoir accepté de diriger ce travail, pour l'aide, pour tous les conseils qu'il nous a apportés et l'encouragement constant qu'il n'a cessé de nous prodiguer tout au long de cette étude

Nous remercions les membres du jury de bien vouloir évaluer notre mémoire.

Nous souhaitons remercier tous nos enseignants du département de génie électrique

En fin nous remercions vivement tous ceux qui de près ou de loin, ont contribué d'une manière ou d'une autre à la réalisation de ce mémoire

Dédicace:

Je dédie cet humble travail à :

À mes très chers parents,

Qui m’ont toujours accompagné et soutenu durant mes

études, recevez ici le témoignage de mon amour d’une

profonde reconnaissance., mes deux frères aimenMohamed

À tous mes amis

islem

Dédicace:

Je dédie cet humble travail à :

À mes très chers parents,

Qui m’ont toujours accompagné et soutenu durant mes

études, recevez ici le témoignage de mon amour et d’une

profonde reconnaissance.

amine

Sommaire

Chapitre1 : GENERALITE S SUR LES EIOLIENNES

I.1 Introduction 3

I.2 Historique 3

I.3Définition de l'énergie éolienne 3

I.4 Les différents types d'éoliennes 4

I.4.1 Les éoliennes à axe vertical 4

I.4.2 Les éoliennes à axe horizontal 4

I.5 Principaux composants d'une éolienne 5

I.5.1 La tour 5

I.5 .2 La nacelle 6

I.5.2.1 Arbre lent 7

I.5.2.2 Un multiplicateur 7

I.5.2.3 le système de refroidissement 7

I.5.2.4 la génératrice 7

I.5.2.5 Anémomètre 7

I.5.2.6 le système de control-commande 7

I.5.3 Le rotor et les pales 8

I.5.4 Le moyeu 9

I.6 Principe de fonctionnement 9

I.7 Conversion de l'énergie éolienne 9

I.8 Loi de BETZ 9

I.9 Production d'énergie mécanique 12

I.10 Système de régulation 12

I.10.1 Bilan des forces sur la pale 12

I.10.2 Moyens de réglage de la conversion de l'énergie 13

I.10 .3 Système à décrochage aérodynamique « stall » 13

I.10.4 Système d'orientation des pales « Pitch » 14

I.11 Intérêt de la vitesse variable 15

I.12 Modélisation de la turbine éolienne 16

I.13 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine..... 16

I.14 Modélisation de la vitesse du vent 16

I.15 Modélisation de la turbine 17

I.16 Modèle du multiplicateur..... 19

I.17 Equation dynamique de l'arbre de la génératrice 19

I.18 Conclusion 20

Chapitre II: Etude d'un émulateur à base d'une MCC

I. 1 Introduction 21

I.2. LA STRUCTURE D'Emulateur EOLIENNE.....21

I.3. Construction de l'émulateur..... 21

I.4. Modélisation de la turbine..... 23

I.5. Méthode de recherche de maximum de puissance(MPPT)..... 25

II.1. Modalisation de la machine é courant continu..... 27

1. Modèle de la MCC 27

2. Stratégie de commande de la MCC.....28

3. Mise en œuvre du régulateur 30

4. Structure de la commande PI 31

5. Avantages et Inconvénients de la machine à courant continu 31

6. Les résultats de simulations avec un régulateur PI.....31

—

III . Conclusion.....35

Chapitre III **: La commande M5P**

III .1 Introduction 36

III .2 GÉNÉRALITÉSSURLESALGORITHMESD'ARBRESDEDÉCISION 36

III .3 : Définition de L'algorithmeM5P 37

III .4 Arbre de décision 38

III .5 La régression linéaire 39

III .6 L'étape de l'élagage 40

III .7 Le processus de lissage 41

III .7.1 Avantagesdel'algorithmeM5P 41

III .7.2 Inconvénientsdel'algorithmeM5P 41

III.8 Aperçu sur logiciel WEKA 41

III.9 Préparation et transfert des données avec l'outil bureautique Excel 42

III.10 Démarche d'apprentissage sous WEKA 43

III.11 Interprétatio des résultats sous forme d'un programme MATLAB 44

III.11 .1 LA VITESSE 45

III.12 .application de la commande M5P sur l'émulateur de vent basé sur la MCC 46

III.13 Implémentation du M5P 48

III.14 le courant 49

III.15.1 .Étude comparative 51

III .15.2 Interprétation et évaluation 51

III.15 .3 Commande par régulateur PI 51

III .15 .4 Commande par algorithme M5P 51

III .16. Application du régulateur PI 51

III .16.1. Dimensionnement du PI 51

III.17 .résultats des simulations de régulateur PI 52

III.18 .résultats des simulations d'algorithme M5P 53

III.19. comparaison de résultats entre la régulateur classique PI et la commande M5P 54

III.19.1. LAVITESSE 54

III.19.1. LE COURANT 55
..

III.20. CONCLUSION.....55

Chapitre 1:GENERALITE S SUR LES EIOLIENNES

Figure I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent 4

Figure I.2: Type d'éolienne 5

Figure I.3: La tour 6

Figure I.4: La nacelle 7

Figure I.5:les pales 9

Figure I.6: Tube de courant d'air autour d'une éolienne 9

Figure I.7: Coefficient de puissance 11

Figure I.8: Bilan des forces sur une section de pale 13

Figure I.9: Variation de l'angle de calage d'une pale 14

Figure I.10: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance 15

Figure I.11: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et de la vitesse du vent 15

Figure I.12: Différents profils de vent 17

Figure I.13: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine () pour une éolienne de 1.5 MW [12]. 18

Figure I.14: Schéma bloc du modèle de la turbine 20

Chapitre II : Etude d'un émulateur à base d'une MCC

Figure II.1:schéma du système d'un émulateur éolienne à base d'une MCC 22

Figure II.2:la structure d'un émulateur de vent..... 22

Figure II.3: Coefficient de puissance en fonction de ratio de vitesse de la turbine(Lamda) ……..24

Figure II.4: Puissance théorique disponible pour une éolienne donnée en fonction de la vitesse de rotation de la machine (rad/s)..... 24

Figure II.5: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine ( ) pour une éolienne de 1.5 MW [12].....25

Figure II.6:schéma fonctionnel de la turbine 26

Figure II.7: Modèle électrique de la MCC à excitation séparée.....27

Figure II.8:modèle équivalent de la machine à courant(MCC) 28

Figure II.9:le schéma bloc de la commande de la MCC 29

Figure II.10*:*schéma bloc d'un régulateur 30

Figure II. 11 : Profil de vitesse du vent (Ω**)(rad /s).....**32

Figure II. 12 :Vitesse de l'émulateur et sa référence (Ω**)(rad /s) .....** 32

Figure II. 13 :Le courant de la MCC **(Ia) (A) **33

Figure II. 14 :Le courant de la MCC et sa référence**(Ia et Iaref).....**33

Figure II. 15 : Le couple de l'émulateur **Ce (N .m).....**34

Figure II. 16 :Le couple résistant(Cr) **Ce (N .m) .....** 34

Figure II. 17 : Vitesse de vent **(tr/min) .....** 35

Chapitre III **: commande M5P**

Figure III .1: Architecture d'un arbre de décision avec différents nœuds 37

Figure III .2:Basique diagrammedel'algorithmeM5P.....38

Figure III .3 : Régression Multi-linéaire d'un ensemble de donnée 40

Figure III .4 Interface du logiciel WEKA 42

Figure III .5: Stockage des données sous MATLAB.....43

Figure III .6: Stockage des données sous EXCEL 44

Figure III .7*:* Étapes de formation du contrôleur mixte Fuzzy-M5P 45

Figure III .8*:* Modèleobtenud'arbreM5P de la vitesse 46

Figure III .9*:* Modèle des décisions obtenu sous WEKA de la vitesse 47

Figure I.10*:*Schéma block d'un système éolienne avec des régulateur (PI) de vitesse et de courant 48

Figure III .11: Schéma block d'un système éolienne de vitesse et sa programme dans logiciel Matlab 48

Figure III .12: Schéma d'entrainement et de test.....49

Figure III .13: Modèle obtenu d'arbre M5P de courant..... 50

Figure III .14: Modèle des décisions obtenu sous WEKA de courant..... 51

Figure I.15: Schéma block d'un système éolienne de courant et sa programme dans logiciel /matlab.....51

Figure. III .16 : Schéma du régulateur Plus utilisé.....53

Figure. III .17 : la vitesse Ω mesuré(PI) et la vitesse de référence Ω réf 54

Figure. III .18 : le courant I(A) mesuré(PI) et le courant de référence I réf.....54

Figure. III .19 : la vitesse Ω mesuré(M5P) et la vitesse de référence Ω réf.....55

Figure. III .20 : le courant I(A) mesuré(M5P) et le courant de référence Iréf..... 55

Figure. III .21 : comparaison de vitesse entre M5P et PI 56

Figure. III .22 : comparaison de courant entre M5P et PI 56

Liste des abréviations

- V:Lavitessedu vent nominale de l'aérogénérateur.
- β:L'angle d'orientation de pale.
- ρ: Masse volumique de l'air.
- R: Rayon de la surface balayée par la turbine.
- S:La surface balayée par la turbine.
- P_{aero}:La puissance absorbée par l'aérogénérateur.
- P_v:La puissance de la masse d'air.
- C_p:Le coefficient de puissance.
- λ: La vitesse relative de l'éolienne.
- λ_{opt}:La vitesse relative optimale de l'éolienne.
- Ω_{tur}:Vitesse de rotation de la turbine.
- Ω_{mec}:Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.
- G: Gain du multiplicateur.
- C_g:Couple résistant issue du multiplicateur.
- C_{aer}:Couple aérodynamique de l'éolienne.
- C_{vis}:Couple des frottements visqueux.
- C_{em}:Couple électromagnétique.
- C_{em_r}:Couple électromagnétique de référence.
- C_{mec}:couple mécanique.
- C_{t_est}:Couple de la turbine estimé.
- f:Coefficientdefrottement visqueux de l'arbre
- J_t:Inertie de la turbine.
- *Pi*: Proportionnel -Intégrateur.
- *MPPT*: maximum Power Point Tracking.

.

ملخص :

تقديم تحسينات على أمر MCC. يرتبط محاكي الرياح المعتمد علىMCC بـ MADA من أجل محاكاة السلوك الحقيقي لتوربينات الرياح. تم اقتراح إستراتيجية التحكم في تعظيم الطاقة)MPPT(لتطبيقها على المحاكي إلنشاء مرجع السرعة والتيار.

أوالً، تم تطبيق منظم PI الكالسيكي، باإلضافة إلى منظم PI للتحكم في التيار والسرعة، وتم تطبيق طريقة M5P السيتبدال منظم PI من أجل تحسين جودة التعديل. لتحويل تعقيد تكوين منظم PI. أخيرًا، نقترح نوعا آخر من خوارزميات الذكاء االصطناعي بعنوان خوارزمية M5P، وقد أتاحت لنا هذه الخبرة إجراء تحسينات، من حيث السهولة والبساطة في التطبيق من خالل الحصول على أداء ديناميكي جيد.

تم إجراء هذه الدراسة الحالية وإنجازها من خالل اختبارات المحاكاة التي تم إجراؤها عبر برنامج .MATLAB/SIMULINK

الكلمات المفتاحية: الطاقات المتجددة. توربينات. توليد السرعة. منظم PI خوارزميات m5p

Résumé:

Ce travail a l'objectif de traiter la commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine a courant continu(MCC), une étude comparative entre différents régulateurs est mise au point dont le but est d'apporter des améliorations à la commande dela MCC. Un émulateur éolien à base d'une MCC est associé à la MADA afin de simuler le comportement réel d'une turbine éolienne. Une stratégie de commande de maximisation de puissance (MPPT) était proposée pour l'appliquer à l'émulateur afin de générer la référence de la vitesse et le courant.

En premier lieu, le conventionnel PI classique en mis en œuvre, ainsi de régulateur PI pour le contrôle des courants et de vitesse., on applique la méthode M5P vient remplacer le régulateur PI afin d'améliorer la qualité du réglage. Pour détourner la complexité de configuration du régulateur PI, .Enfin on propose un autre genre d'algorithme d'intelligence artificiel intitulé algorithme M5P, ce dernier nous a permis d'apporter des améliorations, du point de vu, facilité, simplicité d'application en obtenant de bonnes performances dynamiques.

Cette présente étude est réalisée et accomplis à travers des tests de simulation effectués via le logiciel MATLAB/SIMULINK

Mots clés : le conventionnel PI. Enrgie rnnouvnable . les tourbines . les matricsse m5p

Abstract :

This work aims to deal with the control of a wind energy conversion system based on a direct current machine (MCC), a comparative study between different regulators is developed, the aim of which is to provide improvements to the MCC command. A wind emulator based on a MCC is associated with the MADA in order to simulate the real behavior of a wind turbine. A power maximization control strategy (MPPT) was proposed to apply to the emulator to generate the speed reference and current.

Firstly, the classic PI regulator is implemented, as well as the PI regulator for current and speed control. The M5P method is applied to replace the PI regulator in order to improve the quality of the adjustment. To divert the complexity of configuring the PI regulator. Finally, we propose another type of artificial intelligence algorithm entitled M5P algorithm, the latter allowed us to make

Improvements, from the point of view, ease, simplicity of application by obtaining good dynamic performances.

This present study is carried out and accomplished through simulation tests carried out via MATLAB/SIMULINK soft war

Kywords : conventional PI sustainable enrgy. The turbines. M5pa matrices

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'énergie éolienne, souvent désignée comme l'une des plus anciennes formes d'énergie renouvelable utilisées par l'humanité, est aujourd'hui au cœur des efforts mondiaux pour la transition vers des sources d'énergie plus durables. Cette forme d'énergie tire sa puissance des vents qui circulent à travers notre atmosphère. L'histoire de l'énergie éolienne remonte à des millénaires, où les premiers moulins à vent étaient utilisés pour moudre le grain et pomper l'eau.

De nos jours, les éoliennes modernes utilisent des technologies avancées pour convertir l'énergie cinétique du vent en électricité. Ces éoliennes se dressent souvent en rangées sur des terres ou dans des eaux ouvertes, formant des parcs éoliens. L'énergie éolienne est devenue une composante essentielle du bouquet énergétique de nombreux pays, offrant une source d'électricité propre et renouvelable, contribuant ainsi à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à lutter contre le changement climatique [1].

Outre son aspect environnemental, l'énergie éolienne présente également des avantages économiques, créant des emplois dans l'industrie éolienne, stimulant l'innovation technologique et fournissant une source d'électricité fiable et stable.

Cependant, l'énergie éolienne n'est pas sans défis. Elle dépend de la disponibilité des vents et peut donc être intermittente, nécessitant des solutions de stockage d'énergie ou des sources d'énergie complémentaires pour garantir une alimentation électrique constante. De plus, les parcs éoliens peuvent susciter des préoccupations environnementales, notamment en ce qui concerne leur impact sur la faune aviaire et terrestre, ainsi que sur les paysages [2].

Malgré ces défis, l'énergie éolienne continue de gagner en importance dans le paysage énergétique mondial, offrant un moyen prometteur de répondre à nos besoins énergétiques tout en préservant notre planète pour les générations futures.

Dans le deuxième chapitre en va dit la définition de l’émulateur de vent et le but d’utilisation de l’émulateur un émulateur de vent est un outil essentiel pour simuler et étudier les effets du vent dans des environnements contrôlés, ce qui permet de mieux comprendre et d'améliorer la performance des objets et des systèmes soumis à des conditions aérodynamiques.

Une machine à courant continu est un convertisseur électromécanique. Elle est réversible, elle transforme l’énergie mécanique en énergie électrique (génératrice) ou inversement, c’est-à-dire qu’elle transforme l’énergie électrique en énergie mécanique (moteur).

Dans le dernier chapitre on va dit la définition de la algorithme M5P et application de de cette algorithme et les avantage et les inconvénient.

Nous allons adopter une nouvelle stratégie de contrôle basée sur la combinaison du contrôleur PI etl'algorithmed'arbrededécisiontypeM5Ppourunsystèmed'énergiéolienne. L'objectif est de bénéficier à la fois des avantages de raisonnement de la logique floue et de la fonctionnalité de traitement rapide et précis de l'algorithme M5P. Ce contrôle mixte a la capacité de contourner les problèmes de temps de calcul important, en particulier lorsque des systèmes embarqué sou une implémentation en temps réel sont envisagés [25].

Chapitre I

GENERALITE SUR LES EIOLIENNES

I.1 Introduction

Depuis l'utilisation des moulins, les capteurs éoliens ont évolué pour capter l'énergie éolienne. Différentes technologies sont utilisées et leurs structures deviennent plus efficaces. L'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est cruciale. De nombreux dispositifs éoliens utilisent des synchrones et des machines asynchrones, avec des stratégies de contrôle et des interfaces réseau visant à maximiser la capture d'énergie sur les variations de vitesse du vent.

I.2 Historique

Il y'a plus de 3000 ans déjà, l'énergie du vent était transformée en énergie mécanique, d'une part sur terre par les moulins et des systèmes de pompage de 1'eau, d'autre part en mer, par les bateaux [4]. La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du 19eme siècle. Parmi les pionniers on peut citer **Paul La Cour** au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950. **Johannes Jule** (élève de Paul La Cour) devient aussi un pionnier dans l'utilisation de 1'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif.

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller 1'intérêt pour 1'énergie éolienne dans plusieurs pays. Les USA ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7MWen 1981 à 386 MW en 1985.

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration de l'aérogénérateur ainsi que sur la chaine de conversion de 1'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pâles par 1'intermédiaire d'une boite de vitesse, fonctionnant à vitesse fixe et directement reliée au réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie est surtout employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec 1'insertion d'électronique entre la génératrice et le réseau, et d'autre part vers l'utilisation de génératrices spéciales tournant à basse vitesse afin de s'affranchir du réducteur de vitesse [5].

I.3 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'un générateur (Fig. I.1).

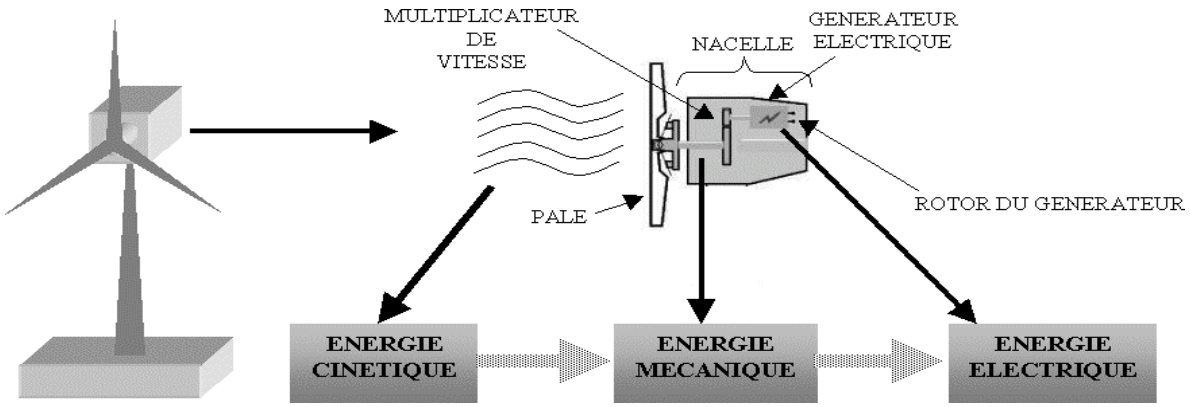


Figure I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie non dégradée, non atmosphérique et non radioactive, mais assez complexe et élévatoire. Cette énergie constitue des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée, proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire. Les installations peuvent être réalisées sur terre ou maritime, notamment les nuisances sonores et la présence de vent.

I.4 Les différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice on classe les éoliennes selon deux types [6]:

I.4.1 Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance [7]. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [6].

I.4.2 Les éoliennes à axe horizontal

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

Dans ces types d'éoliennes l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue

un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien, ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [8].

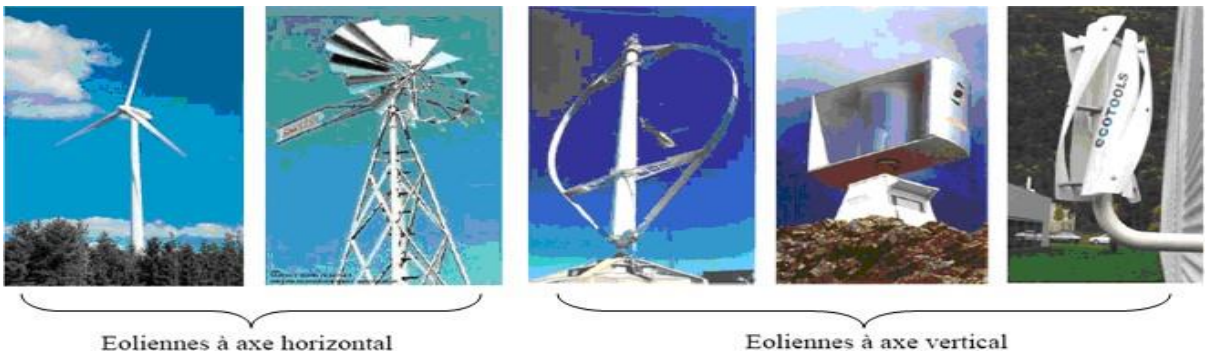


Figure I.2: Type d'éolienne.

Outre l'aspect visuel des éoliennes, leur impact sur l'environnement est réduit. Une éolienne ne couvre qu'un pourcentage très réduit de la surface totale du site sur laquelle elle est implantée, permettant alors à la plupart des sites de conserver leurs activités industrielles ou agricoles. Leurs nuisances sonores sont de plus relativement faibles. Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale

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

I.5 Principaux composants d'une éolienne

- Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux : la tour ou mat, la nacelle et l'ensemble rotor-pales.

I.5.1 La tour

- C'est un élément porteur, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, il doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. La tour a une forme d'un tronc en cône où à l'intérieur sont disposés les câbles de transport d'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'accès à la nacelle (Fig. I.3).



Figure I.3 : La tour.

I.5 .2 La nacelle

Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande (Fig. I.4) :

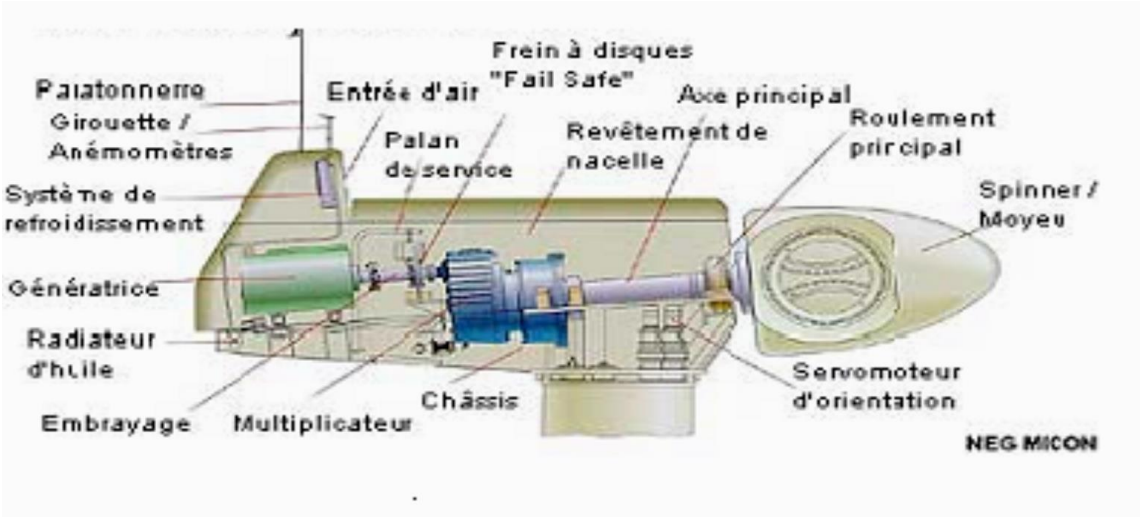


Figure I.4 : La nacelle.

I.5.2.1 Arbre lent

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

I.5.2.2 Un multiplicateur

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné aux environs de 1500tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

I.5.2.3 le système de refroidissement

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

I.5.2.4 la génératrice

La fonction de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines: une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone.

I.5.2.5 Anémomètre

Les signaux électriques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de control-commande de l'éolienne pour la démarrer lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5m/s. De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25m/s pour assurer la protection de l'éolienne.

I.5.2.6 le système de control-commande

Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation à titre d'exemple en cas de surchauffe du multiplicateur ou de génératrice, le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

I.5.3 Le rotor et les pales

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59% (limite de Betz). Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne. Plus le nombre de pale est grandplus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisque elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.

Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante (Fig. I.5)

.



Figure I.5: les pales.

I.5.4 Le moyeu

C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

I.6 Principe de fonctionnement

Une éolienne produit un vent à grande vitesse, inférieure à la vitesse du vent. Le système s'arrête lorsque la vitesse est détectée par un astronome. Le système de contrôle guide la turbine face au vent et la puissance de la turbine est transmise au générateur. Cette puissance mécanique est ensuite convertie en puissance électrique par la machine.

I.7 Conversion de l'énergie éolienne

La capacité de l'aérogénérateur à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de rotation a été la déduction logique et inévitable, de son utilisation pour la production de l'énergie électrique.

Cependant, il est à noter que pour l'emploi efficace de cette ressource il est indispensable d'étudier les caractéristiques aérodynamiques de la turbine utilisée.

I.8 Loi de BETZ

La théorie du moteur éolien à axe horizontal a été établie par BETZ. Il suppose que « *le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini amont d'une vitesse V1 et à l'infini aval d'une vitesse V2* » [10].

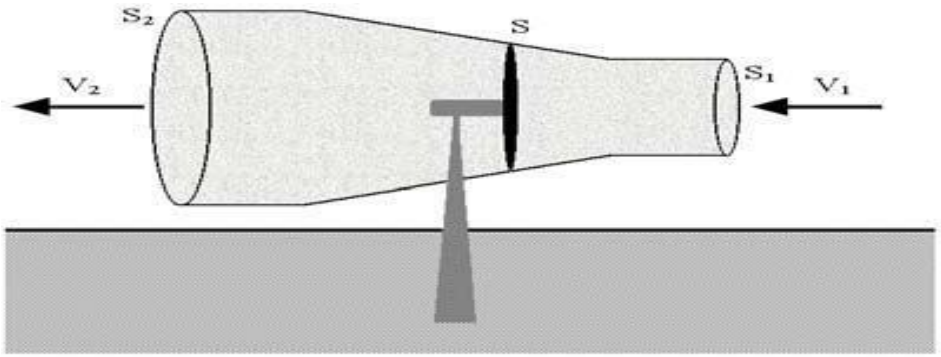


Figure I.6: Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

Considérant le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (I-6) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

Désignant par V la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par S_1 et S_2 les sections amont et aval du tube d'air et par S la surface balayée par l'hélice. L'égalité qui traduit l'incompressibilité de l'air et la permanence de l'écoulement s'écrit [11]:

$$S_1V_1 = SV = S_2V_2 \quad (I.$$

La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur d'après le théorème d'EULER :

$$F = \rho.SV.(V_1 - V_2) \quad (I.2)$$

D'où la puissance absorbée par l'aérogénérateur:

$$P_{aero} = F.V = \rho.SV^2(V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

La puissance absorbée par l'aérogénérateur est aussi égale à la variation de l'énergie cinétique $E_c$de la masse d'air qui le traverse d'où

$$\frac{\Delta E_c}{\Delta t} = \frac{1}{2}\rho.SV.(V_1^2 - V_2^2) = P_{aero} = \rho.SV^2.(V_1 - V_2) \quad (I.4)$$

On en déduit:

$$V = (V_1 + V_2)/2 \quad (I.5)$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations(I.2) et (I.3) on obtient :

$$F = \frac{1}{2}\rho.(V_1^2 - V_2^2) \quad (I.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4}.\rho.(V_1^2 - V_2^2).(V_1 - V_2) \quad (I.7)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V1, la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \rho.S.V_1^3/2 \quad (I.8)$$

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

$$\frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{(1+\frac{V_1}{V_2}).(1-(\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} = Cp \quad (I.9)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation (I.9), on s'aperçoit que le ratio P_{aero}/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance Cp présente un maximum pour $\frac{V_1}{V_2} = \frac{16}{25}$ qui égale à 0,59 (Figure I.7). Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie expérimentalement par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

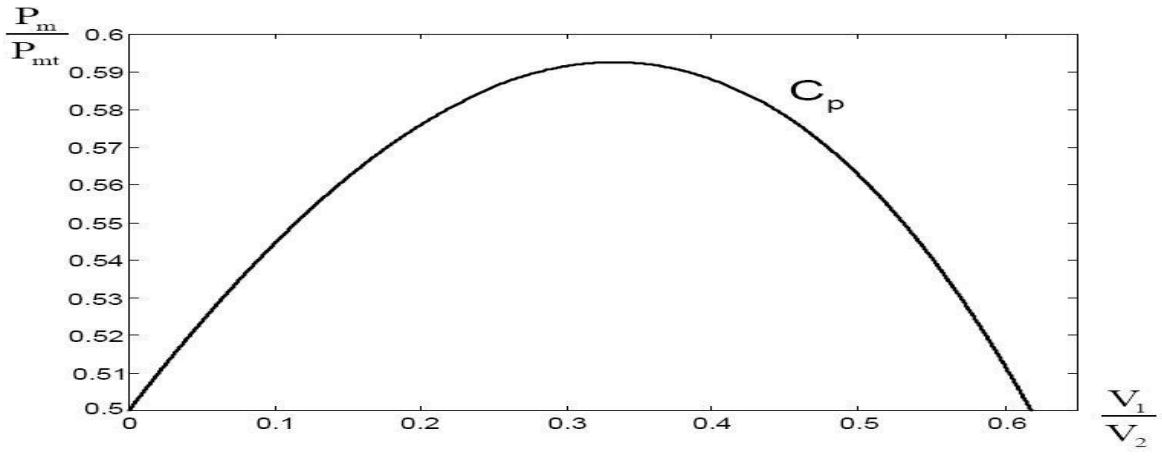


Figure I.7:Coefficient de puissance.

Les éoliennes à marche lente et rapide sont des éoliennes à marche rapide, avec un diamètre de 8 m et un coefficient de puissance maximal à 8 m. Les éoliennes sont généralement fixes ou orientables, pouvant atteindre 45 m. Les éoliennes tripales sont plus répandues et utilisent un meilleur aérogénérateur pour réduire les vibrations et le coût.

I.9 Production d'énergie mécanique

En combinant les équations (I.8) et (I.9), la puissance mécanique P_{aero}disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_{aero} = \left(\frac{P_{aero}}{P_{mt}}\right).P_{mt} = C_P(\lambda).P_{mt} = \frac{1}{2} C_P(\lambda).\rho.\pi.R^2V_1^3 \quad (I.10)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_{turbin}.R}{V_1} = \frac{\Omega_{mec}.R}{K.V_1} \quad (I.11)$$

$\Omega_{turbine}$: Vitesse de rotation de la turbine.

Ω_{mec} : Vitesse de rotation de l'arbre du générateur.

ρ : la densité de l'air égale à 1,225 kg.m^{-3}.

R : rayon de l'aérogénérateur. Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse K.

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 de vent.

I.10 Système de régulation

I..10.1 Bilan des forces sur la pale

La figure (I.9) représente la section d'une pale d'aérogénérateur **.**La vitesse du vent arrivant face à cette pale est représentée par le vecteur *V*, le vecteur V_{rot}représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée V_{res}.

L'action du vent sur la pale produit une force F_{res} qui se décompose en une poussée axiale F_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mât et une poussée F_{rot} en direction de la rotation qui produit effectivement le déplacement.

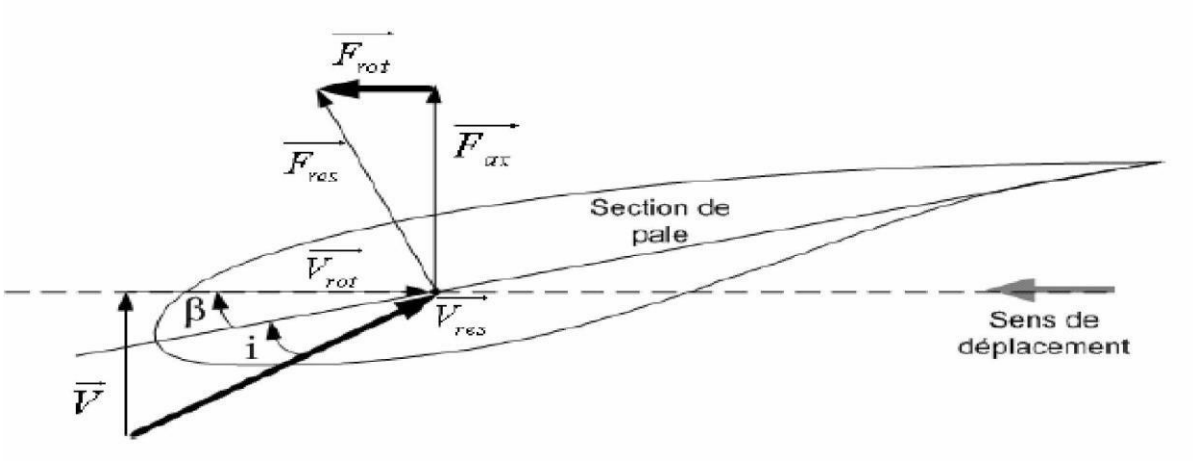


Figure I.8: Bilan des forces sur une section de pale.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse du vent nominale donnée. Lorsque la vitesse du vent devient trop élevée,

la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale. Il est à noté que βet *i* sont respectivement l'angle de calage et l'angle d'incidence.

I.10.2 Moyens de réglage de la conversion de l'énergie

Pendant la phase d'exploitation, en raison des vents fluctuants et de la résistance limitée de la structure, deux types d'ajustement sont nécessaires : un ajustement constant de la vitesse éolienne et de la vitesse du vent.

I.10 .3 Système à décrochage aérodynamique « stall »

Le système est simple et économique grâce à son principe de limitation naturelle, le « décrochage », et utilise l'anti-rebond aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence augmente, l'aspiration créée par le profil pâle devient moins optimale, provoquant des turbulences et une diminution de puissance.

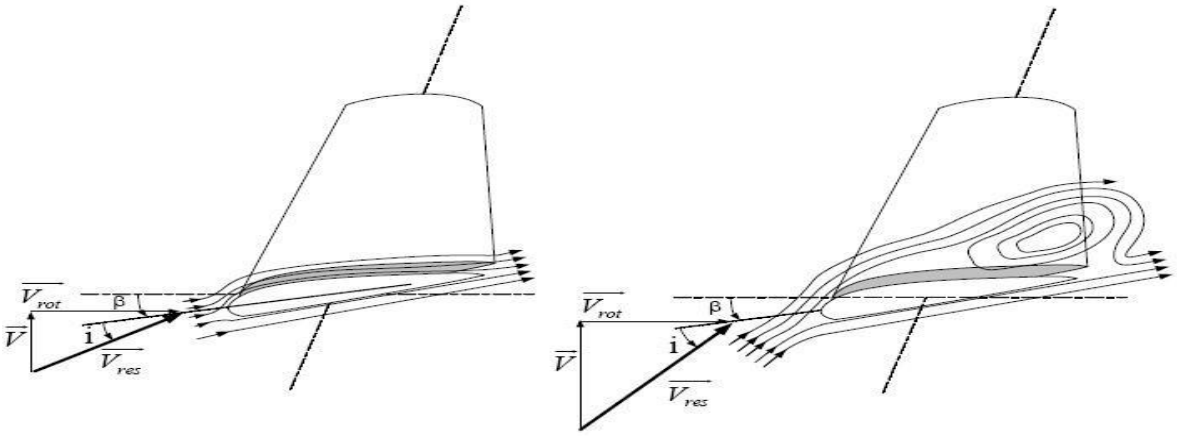


Figure I.8: Bilan des forces sur une section de pale.

I.10.4 Système d'orientation des pales « Pitch »

Le système de réglage aérodynamique se base sur le principe de l'augmentation de l'angle de calage (Figure I.11) ce qui diminue la valeur du facteur de puissance (Figure I.12) d'où une diminution du rendement de la turbine, ceci empêche l'augmentation de la vitesse de rotation de l'aérogénérateur.

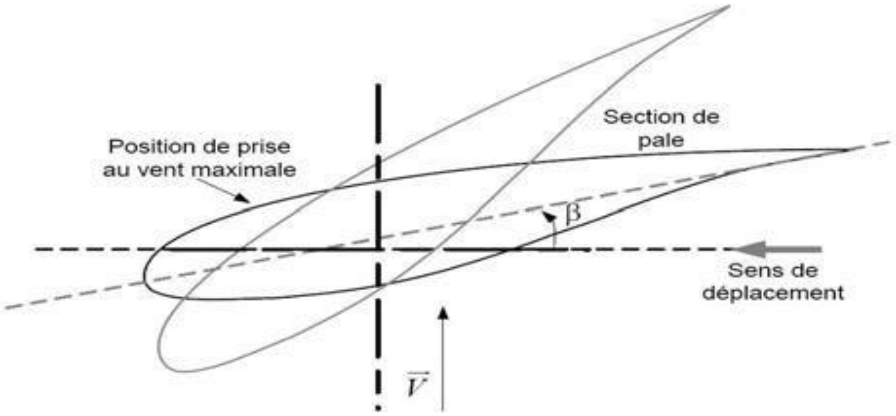


Figure I.19: Variation de l'angle de calage d'une pale.

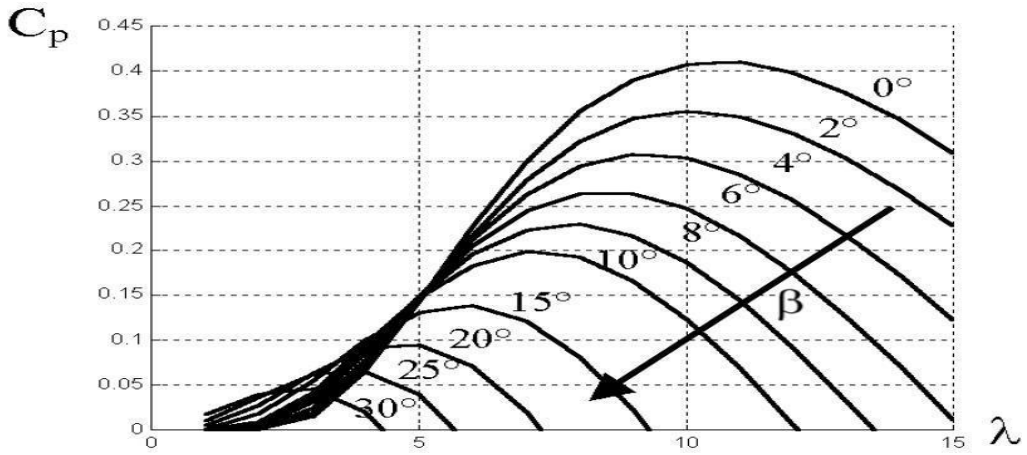


Figure I.10: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de puissance.

I.11 Intérêt de la vitesse variable

Les éoliennes initiales adoptées en 90 étaient fixes et simples, robustes et peu coûteuses. Les éoliennes variables sont les installations éoliennes à présent, conçues pour extraire un maximum de puissance dans une large gamme de vent.

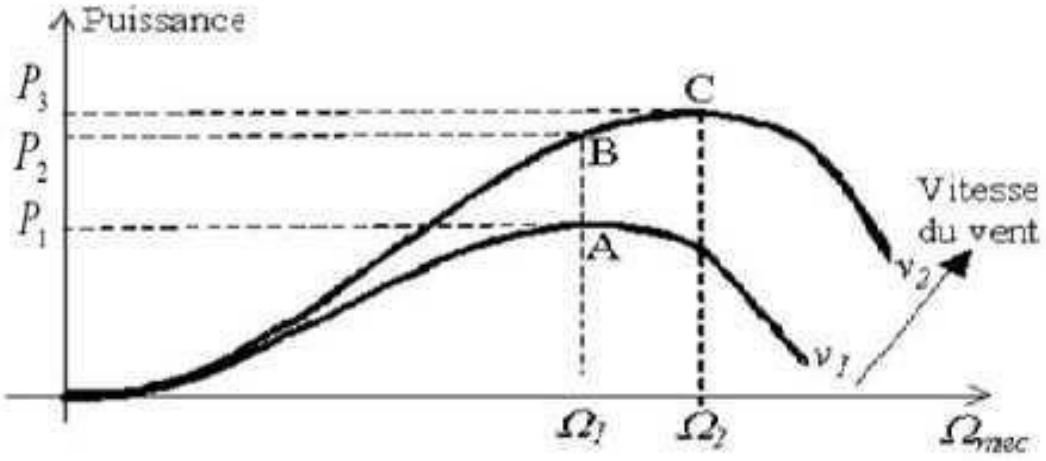


Figure I.11: Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et de la vitesse du vent.

La figure (I.13) démontre que pour une vitesse du vent et une vitesse du générateur données, une puissance maximale est obtenue au point A. Si la vitesse du vent est augmentée jusqu'au point B, une puissance est transmise, tandis que la puissance maximale est située au point C. Cette vitesse mécanique variable permet une extraction continue de l'énergie, une capture accrue de l'énergie et une efficacité énergétique améliorée.

I.12 Modélisation de la turbine éolienne

Le système éolien a pour but de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Ce système, dans notre cas, est constitué mécaniquement de quatre organes :

- Trois pales orientables possédant des coefficients propres d'inertie, d'élasticité et de frottement par rapport à l'air et par rapport au support de la turbine ;
- Un arbre d'entraînement des pales avec sa propre inertie, sa propre élasticité et son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur ;
- Un multiplicateur de vitesse, de gain G ;
- Un rotor de génératrice possédant une inertie $J_e$et un coefficient de frottement f_e.

I.13 Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans les études électromécaniques sont simples et basés sur des hypothèses simples : ils sont identiques avec des paramètres d'inertie, d'élasticité et de givrage identiques ; leurs coefficients sont très faibles et peuvent être ignorés ; et la vitesse du vent est supposée répartir uniformément toutes les surfaces, ce qui donne un modèle mécanique simple.

I.14 Modélisation de la vitesse du vent

L'évent est la principale raison d'être des aérogénérateurs, car il capte partiellement l'énergie cinétique, la convertit en énergie mécanique via une turbine, puis en énergie électrique via un générateur. Les propriétés dynamiques du vent sont cruciales pour étudier l'ensemble du système de conversion d'énergie, car sa puissance dépend de la vitesse du vent.

$$V = (t) \qquad (\mathrm{I}.12)$$

Cette fonction du vent, peut être décomposée en une composante moyenne, variant lentement, et des fluctuations [12] :

$$(t) = V_0 + \sum_{i=1}^{n} A_i \sin(\omega_i t + \varphi_i) \qquad (I.13)$$

Tel que :

V_0est la composante moyenne ;

A_i, $\omega_i$etφ_i sont respectivement l'amplitude, la pulsation et la phase initiale de chaque composante spectrale fluctuantes.

La figure (I.15) présente deux profils de vent différents, l'un reflétant la stochastiquité que l'on peut trouver sur un site éolien et l'autre c'est un profil filtré et adapté à notre système éolien étudié qui a une dynamique lente.

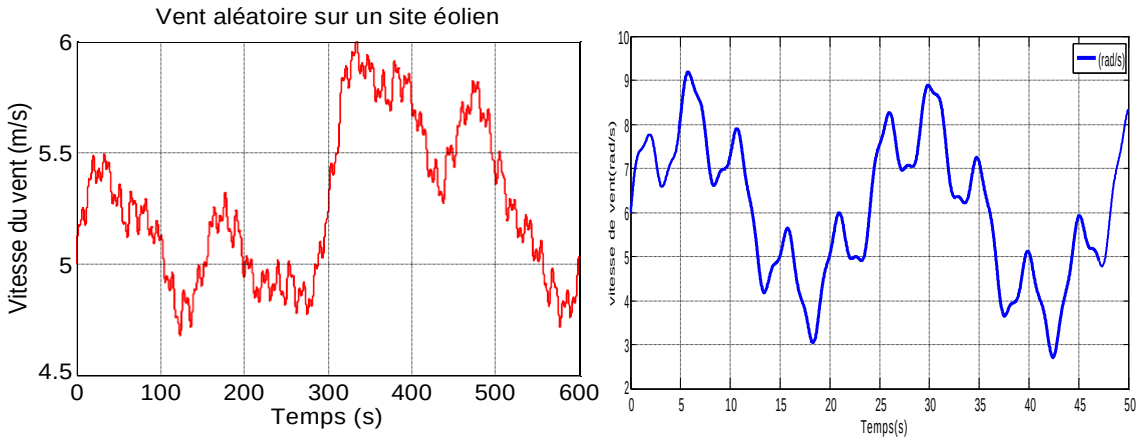


Figure I.12: Différents profils de vent.

I.15 Modélisation de la turbine

Précédemment, on a vu que la puissance éolienne du vent est exprimée par la relation (I.8) comme suit :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho S V^3$$

Et la puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine s'écrit sous la forme suivante :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) S V^3$$

Le coefficient de puissance $C_p$représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne et il dépend de la caractéristique de la turbine. La figure (I.16) représente la variation

de ce coefficient en fonction du ratio de vitesse, et de l'angle de l'orientation de la paleβ pour une éolienne de 1.5 MW prise comme exemple d'application dans cette étude [12].

Le ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V}$$

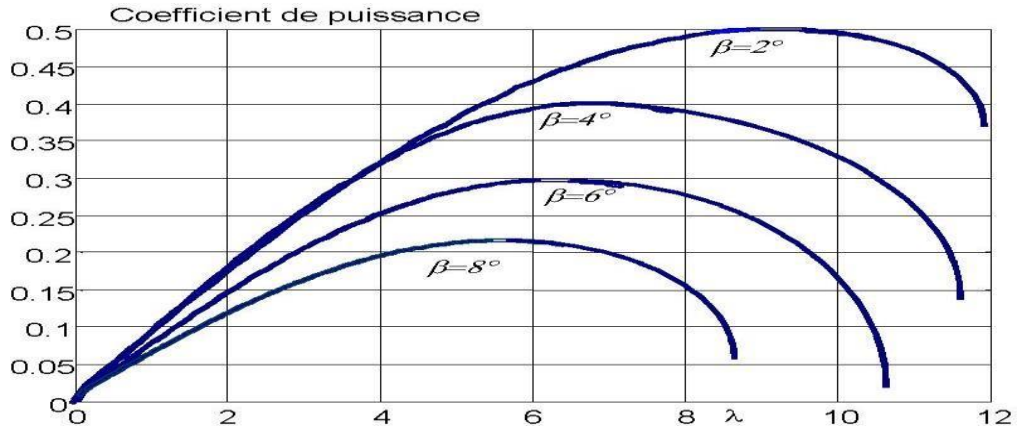


Figure I.13: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ) pour une éolienne de 1.5 MW [12].

A partir des relevés réalisés sur cette éolienne de 1.5 MW, l'expression du coefficient de puissance est interpolée sous la forme suivante [12] :

$$C(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.00167(\beta - 2)) \sin\left[\frac{(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (I.14)$$

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

$$C_{aer} = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\Omega_t} C_p \rho S V^3 \qquad \text{(I. 15)}$$

On peut également définir un autre coefficient dit de couple C_t qui dépend de la vitesse du vent et de la vitesse spécifique de la turbine :

$$C_t = \frac{C_p}{\lambda} = C_p \frac{V}{R\Omega_t} \qquad \text{(I. 16)}$$

On écrit donc :

$$C_{aer} = \frac{1}{2} C_t \rho S R V^2 \qquad \text{(I. 17)}$$

I.16 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur de gain G permet d'adapter les grandeurs mécaniques (vitesses et couples) de la turbine et la génératrice qui s'expriment selon les relations mathématiques suivantes :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_e}{G} \qquad \text{(I. 18)}$$

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \qquad \text{(I. 19)}$$

Où C_g est l'effet du couple de la turbine sur l'arbre de la génératrice.

I.17 Equation dynamique de l'arbre de la génératrice

En ramenant les paramètres mécaniques de la turbine à l'arbre de la génératrice, on obtient le modèle définit par la relation suivante :

$$J \frac{d\Omega_e}{dt} + f\Omega_e = C_g - C_{em} \qquad \text{(I. 20)}$$

Avec :

$$J = \frac{J_t}{G^2} + J_e \qquad (I.21)$$

$$f = \frac{f_t}{G^2} + f_e \qquad (I.22)$$

Où :

J_t, f_t, J_e, f_e, J et f : sont respectivement l'inertie et le coefficient de frottement de la turbine, de la génératrice et ceux ramenés sur l'arbre de la génératrice.

Basée sur les équations présentées précédemment, la figure (I.17) peut définir un modèle physique de la turbine ayant comme entrées l'angle de calage des pales, la vitesse du vent et le couple électromagnétique fourni par la génératrice.

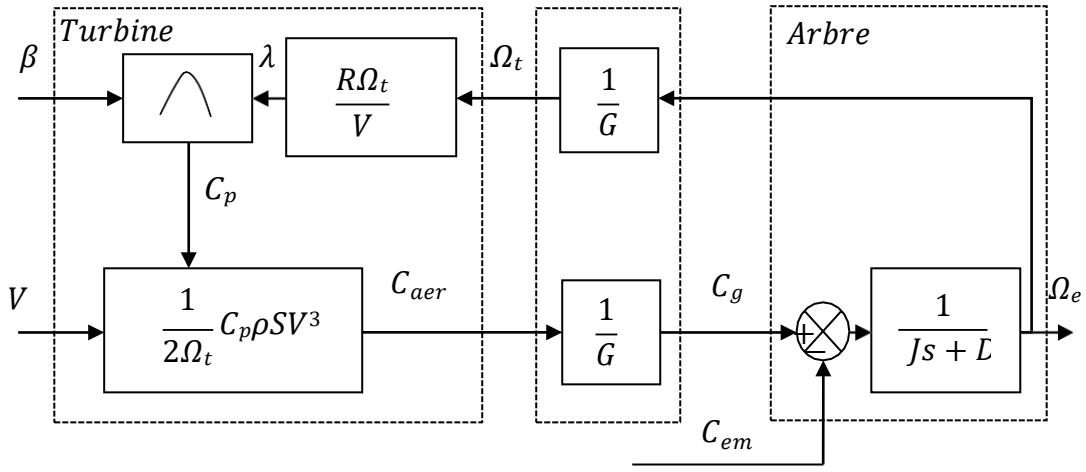


Figure I.14: Schéma bloc du modèle de la turbine.

I.18 Conclusion

Ce chapitre donne un aperçu des différentes turbines éoliennes utilisées dans la production d'électricité moderne. Il explique le fonctionnement de ces turbines, notamment la conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique. Le chapitre établit également un modèle mathématique de la turbine basé sur ses caractéristiques. Il souligne l'importance de ressources suffisantes pour un projet éolien rentable, notamment des vents forts et constants.

Chapitre II:

Etude d'un émulateur à base d'une MCC

I.1Introduction

Le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs à mener les investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromagnétique et la qualité d'énergie fournie. Les études menées sur les systèmes éoliens dans les laboratoires n'utilisent pas directement les éoliennes mais plutôt les émulateurs vu leur souplesse et leurfacilitéderéglage.Cesdernierstempslastructurelaplusutiliséedesémulateurssontgénéralementc elles des moteurs à courant continu. L'émulateur a pour but de reproduire les mêmes caractéristiques que celle de la turbine éolienne.

L'objetdecechapitreestledéveloppementd'unémulateurdelaturbineéolienneétudierdans le chapitre précèdent à base d'une machine à courant continu.

I.2. LA STRUCTURE D'Emulateur EOLIENNE

Le but de l'émulateur est de remplacer le vent et la turbine éolienne afin d'émulateur le comportement de cette turbine en utilisant une machine a courant continue (MCC).limage de la vitesse générée par la turbine est appliquée en référence a la MCC accouplée a la génératrice .la figure 1 présente la structure de l'émulateur éolienne a étudié en utilisant une MCC et un système de commande ; plus l'interface de connexion (carte Dspace R1103)

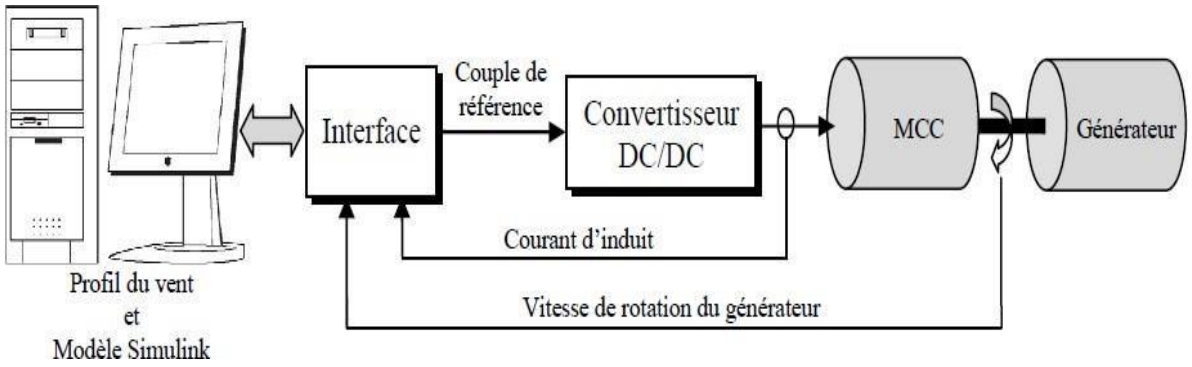


Figure II.1:schéma du système d'un émulateur éolien à base d'une MCC [31]

I.3. Construction de l'émulateur:

L'émulateur est basé sur le système de conversion d'énergie montré à la **Fig. I** commeiln'estpaspossibled'utiliseruneéoliennedansunlaboratoire,les chercheurs remplacent le vent et la turbine éolienne par un PC afin d'émuler le comportement de la turbine éolienne par une machine à courant continu (figure III.2) [36]. Le couple généré par la turbine est appliqué

en référence à la MCC accouplée à la génératrice. Le implémentant MATLAB/SIMULINK contient un programme qui contient le modèle de la turbine éolienne et sa commande en MPPT avec asservissement de la vitesse de rotation ainsi que la commande en couple de la MCC. [32]

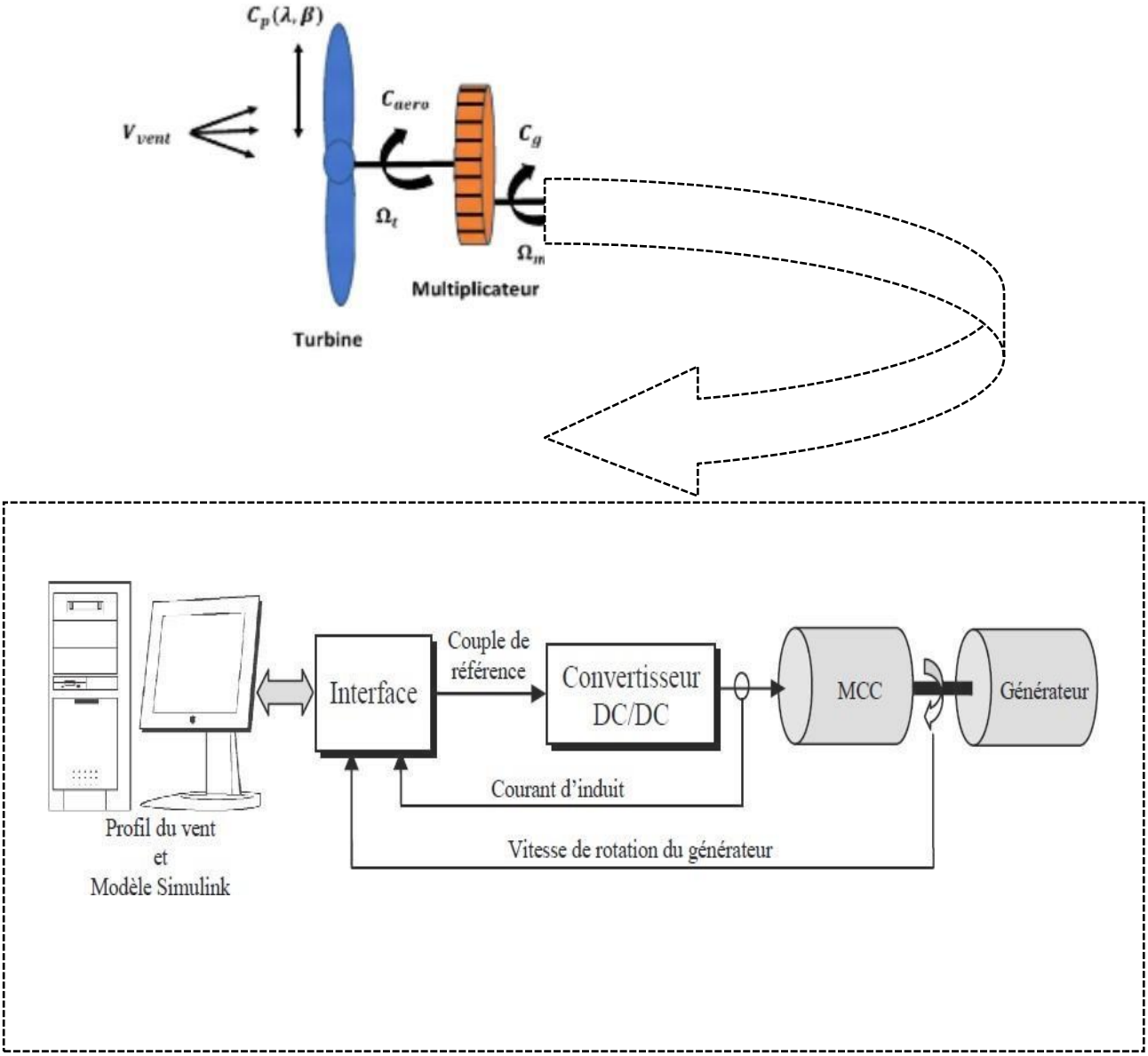


Figure II.2:la structure d'un émulateur de vent

I.4. Modélisation de la turbine:

Onretrouvedanslalittératureplusieurstypesdemodélisationducoefficientdepuissance, souvent toutes limitées par les données d'entrée, donc généralement valables pour une turbine particulière chaque turbine à un comportement spécifique[27].

Pour notre étude nous allons utiliser une turbine éolienne de 3 KW. C'est un modèle tripale à axe horizontal dont la longueur d'une pale est de 4.5m et le rapport du multiplicateur de vitesse est de 24.[30]

La formule(2.4),nousillustrel'évaluationducoefficientdepuissance$C_p$quidépend

Des caractéristiques aérodynamique de la turbine à étudier , ainsi ,des conditions de

fonctionnement.Lecoefficient$C_p$estalorsexpriméenfonctionderapportdevitesse etde l'angle de calage des pales

Leratiodevitesseestdéfinialorscommelerapportentrelavitessedespalesetlavitesseduvent commesuit: (Figure II-6)

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \qquad (I.1)$$

L'application d'un vent V sur les pales de l'éolienne produit la rotation de l'éolienne et la transmission

d'une puissance mécanique à l'arbre de la turbine .cette puissance s'exprime par la relation suivent :

$$P_m = \frac{1}{2} C_P . \rho . \pi . R^2 V_1^3 \qquad (I.2)$$

- ρ: est la masse volumique de l'aire (kg/m^3)
- **V**: est la vitesse de vent (m/s)
- β**:** l'angle d'inclinaison de pales
- λ : le rapport de vitesse (le ratio de vitesse)
- ***R***: rayon de l'aérogénérateur (longueur de pales)
- ***Cp***: est le coefficient de puissance

$$C_p(\lambda,\beta) = (0.5 - 0.00167(\beta - 2)) \sin\left[\frac{\pi(\lambda+0.1)}{18.5-0.3(\beta-2)}\right] - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \qquad (I.3)$$

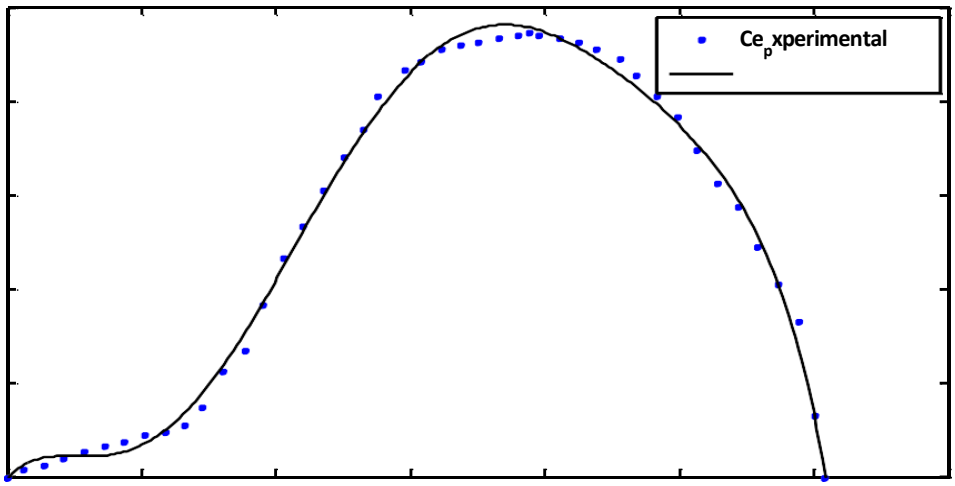


Figure II.3: Coefficient de puissance en fonction de ratio de vitesse de la turbine(Lamda).

La vitesse du vent Vv appliquée sur les pales de l'éolienne entraines a mise en rotation et crée Une puissance mécanique sur l'arbre de la turbine noté *P* qui est exprimée par la formule:

$$F_m = \frac{1}{2}\rho.\pi.R^2V_1^3 \qquad (I.4)$$

Onconnaissantlavitessederotationdelaturbineetlapuissancemécaniquedisponible,le couple mécanique disponible sur l'arbre de la turbine est donc

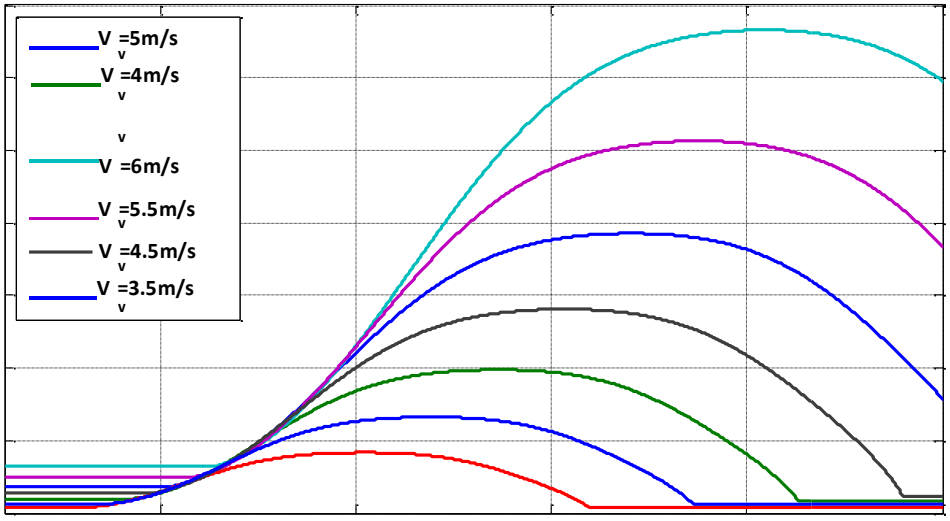


Figure II.4: Puissance théorique disponible pour une éolienne donnée en fonction de la vitesse de rotation de la machine (rad/s)

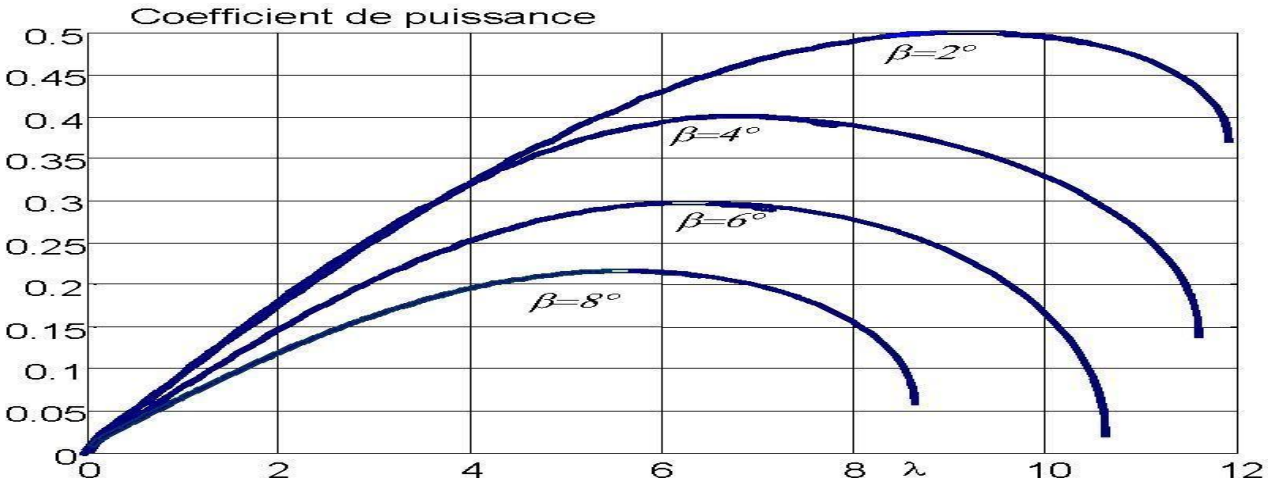


Figure II.5: Coefficient aérodynamique en fonction du ratio de vitesse de la turbine (λ) pour une éolienne de 1.5 MW [12]

Pour le fonctionnement idéal de ;a turbine contrôlée par la stratégie MPPT . le point de fonctionnement optimal sur la figure III.7 est correspond au maximum du coefficient de puissance Cp et donc au maximum de la puissance mécanique récupérée . pour β=0le point optimal est (λ=8.1 ; Cp max=0.475)

I.5. Méthode de recherche de maximum de puissance(MPPT).

Lapuissancecapturéeparlaturbineéoliennepeutêtremaximiséeenajustantlecoefficient Cp, Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice .L'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance générée en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence quel que soit la vitesse du vent. [26]

8. Mise en équation de la puissance maximale de la turbine

La puissance maximale de la turbine correspond à un coefficient de puissance maximal ,et à une vitesse relative optimale et peut s'écrire sous la forme suivante:

$$F_m = \frac{1}{2}\rho.\pi.R^2V_1^3 \qquad (I.5)$$

v

La vitesse relative optimaleλ_{opt}est donnée par la formule suivante:

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{V} \qquad (I.6)$$

De cette dernière, on peut déduire la vitesse du vent comme suit:

$$V = \frac{\Omega_t R}{\lambda} \qquad (I.7)$$

Pour faire varier la vitesse de rotation de l'ensemble, il faut moduler le couple fourni parle moteur à la génératrice. Si l'on souhaite augmenter la vitesse de rotation de l'ensemble moteur-génératrice ,il faut augmenter le couple fourni par le moteur qui devient alors supérieur au couple de la génératrice. Il apparaît un couple d'accélération, ce qui entraine une augmentation de la vitesse de la turbine [34]

- E n vitesse. Pour pouvoir modéliser la MCC, sa commande peut être décomposée en deux types : une commande en couple et l'autre en vitesse

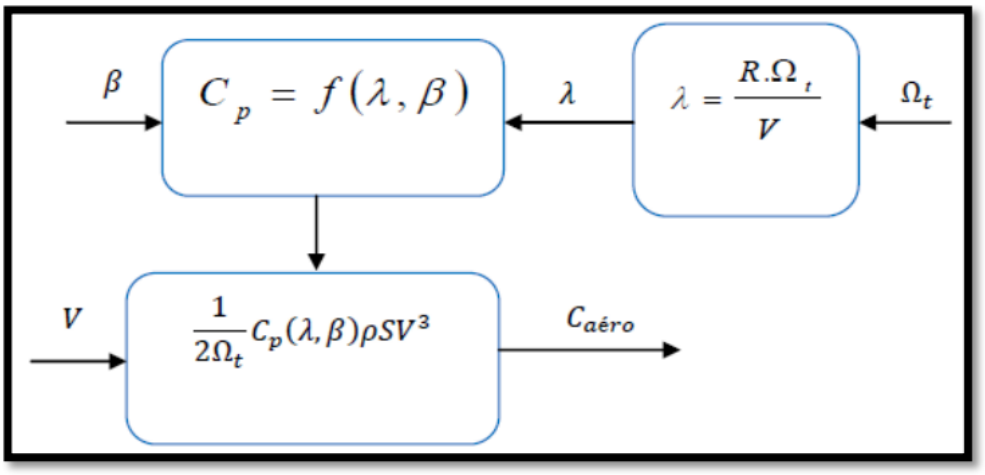


Figure II.6:schéma fonctionnel de la turbine

Dans cette étude ; nous avons représenté l'évolution de la vitesse du vent par une somme de plusieurs harmonique décrit comme suit:

$(t) = 60.2\sin(0.1047t)+2\text{Sin}(0.2665\text{t})+\text{Sin}(1.2930\text{t})+0.2\text{Sin}(3.6645\text{t})$ (I.7)

II.1.Modalisation de la machine é courant continu

1. Modèle de la MCC

Le modèle de la machine à courant continu (MCC) est donné par la FigureI.3

PournotretravailonutiliseuneMCCàexcitationséparéereprésentéedansfiguresuiva nte:

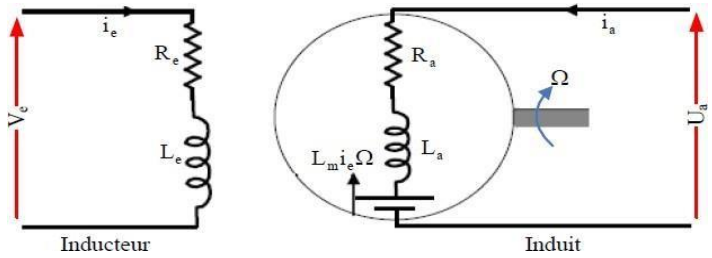


Figure II.7: Modèle électrique de la MCC à excitation séparée*[36]*

La machine à courant continu peut être modélisée par ses équations électriques mécaniques et électromécaniques;

L'équation de tension induite s'écrit comme suit(pour l'inducteur):

$$Ua = R_a + Ia + L_a \frac{di_a}{dt} + \text{E} \qquad \text{(I.8)}$$

Pour la machine a courant continu a excitation séparée, si le flux crée par le bobinage inducteur est contant, la force électromotrice (FEM) et le couple électromagnétique sont :

$$E = K\Omega \qquad \text{(I.9)}$$

$$C_{em} = K\ I_a)$$

Tandis que la rotation du moteur est décrite par l'équation mécanique :

$$Ce, -C_r = J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega \qquad \text{(I.10)}$$

Ou :

- *Ra*: résistance de l'enroulement d'induit
- *La* : est l'inductance d'induit
- Ω : vitesse angulaire
- *P : le* nombre de paire de pole
- *Cem :* le couple électromagnétique
- *Cr :* le couple résistant
- *J :* l'inertie de la partie tournant
- *f :* le coefficient de frottement
- *E :* la force électromotrice (FEM)
- ϕ_e*:*le flux crée par le bobinage inducteur

En utilisant les équation(I. 8);(I. 9)et(I. 10); le schéma fonctionnel de la machine (MCC) peut être résumé par la figure **I.4**

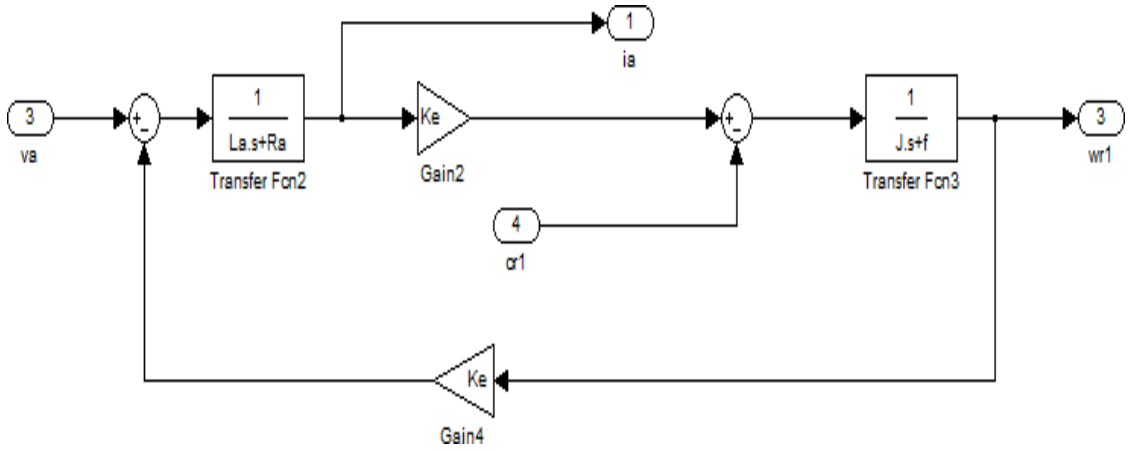


Figure II.8:modèle équivalent de la machine à courant(MCC)

2. Stratégie de commande de la MCC:

La machine à courant continu doit être considérée comme un générateur de couple comme tous les moteurs électriques [33] Ce couple est alors transmis à la génératrice qui peutentrerenrotation.Lavitessedel'ensemblemoteur-génératricen'estpasimposéeparle moteur lui-même, mais plutôt par la caractéristique couple/vitesse de l'ensemble moteur-génératrice

Pour faire varier la vitesse de rotation de l'ensemble, il faut moduler le couple fourni

parle moteur à la génératrice. Si l'on souhaite augmenter la vitesse de rotation de l'ensemble moteur-génératrice

,il faut augmenter le couple fourni par le moteur qui de vient alors supérieur au couple de la génératrice. Il apparaît un couple d'accélération, ce qui entraine une augmentation de la vitesse de la turbine[34]

en vitesse. Pour pouvoir modéliser la MCC, sa commande peut être décomposée en deux types :une commande en couple et l'autre en vitesse

Le régulateur utilisé pour cette commande est un régulateur proportionnel intégral, car il est simple et rapide à synthétiser et mettre en œuvre

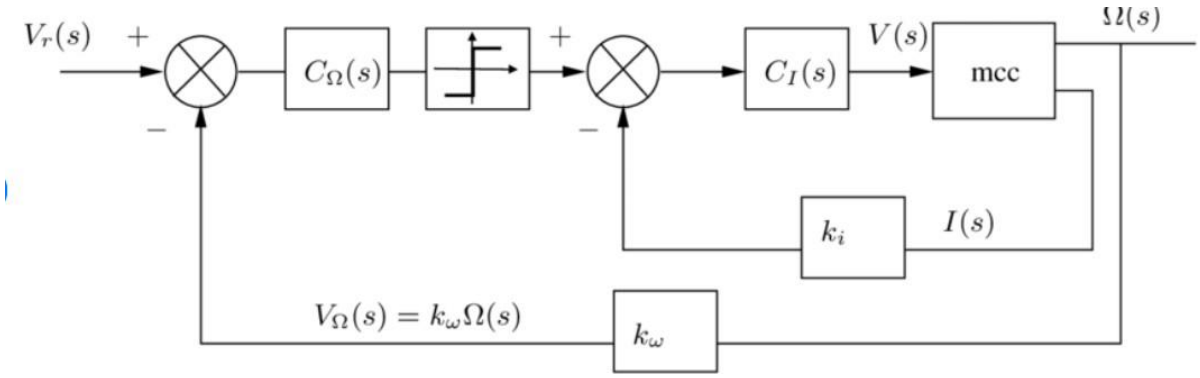


Figure II.9:le schéma bloc de la commande de la MCC

En utilisant la méthode d'imposition des pôles le régulateur PI pour la boucle de vitesse et boucle de courant sont donnes par le tableau suivant :

PI	Boucle de vitesse	Boucle de courant
K_p	2ρJ–f	2ρL_a–R_a–f
K_i	2ρ^2J	2 $\rho^2 L_{a-}$

3. Mise en œuvre du régulateur

Dans le souci de déterminer les paramètres de ce régulateur, on utilise le plus souvent la méthode de synthèse directe qui est représentée par le schéma de commande de la figure I-17, qui se compose en générale, d'une fonction de Transfert G(p) et un régulateur C(p)comme suite:

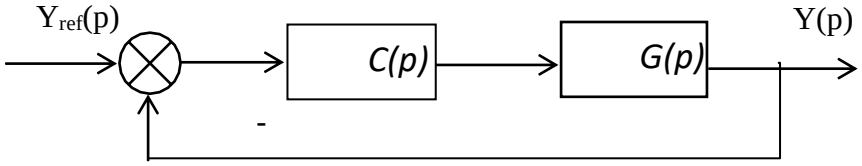


Figure II.10*:*schéma bloc d'un régulateur

Dans notre cas, on utiliser a un régulateur de forme PI (proportionnel-intégral),donc notre schéma équivalent est:

p

Comme tous les moteurs électriques [33] Ce couple est alors transmis à la génératrice

qui peutentrerenrotation.Lavitessedel'ensemblemoteur-
génératricen'estpasimposéeparle

moteur lui-même, mais plutôt par la caractéristique couple/vitesse de l'ensemble moteur-génératrice.

Pour faire varier la vitesse de rotation de l'ensemble, il faut moduler le couple fourni parle moteur à la génératrice. Si l'on souhaite augmenter la vitesse de rotation de l'ensemble moteur génératrice, il faut augmenter le couple fourni

Par le moteur qui de vient alors supérieur au couple de la génératrice. Il apparaît un couple d'accélération, ce qui entraine une augmentation de la vitesse de la turbine [34]

Pour pouvoir modéliser la MCC, sa commande peut être décomposée en deux types :une commande en couple et l'autre en vitesse. Figure III.6

Lorsdelamiseenœuvredel'émulateurdelaturbineéolienne,onprendseulementlacommandeencouple de

la machine à courant continu en évidence.

4. Structure de la commande PI:

Afind'imiterlesystèmeréellecouplederéférencedoits'établiraussirapidementquepossible,pour ce la faut joindre une boucle de régulation à base d'un PI qui calcul à tout Instant la tension qui est appliquée à l'induit du moteur ce qui garanti de couple de référence calculé.

5. Avantages et Inconvénients de la machine à courant continu

a. Avantages

- L'avantage principal des machines à courant continu est qu'elles peuvent être facilement adaptées aux méthodes permettant de régler ou de modifier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation, les variateurs de vitesse et être reliées directement à la source d'énergie (batteries d'accumulateur, piles...etc.).

La variation de la fréquence de rotation est simple.

b .Inconvénients

- Le principal problème avec ces machines est la liaison entre les balais et le collecteur rotatif. Comme mentionné précédemment, le collecteur lui-même est également très compliqué à réaliser.
- La pression des balais doit augmenter pour rester en contact avec le collecteur à plus de vitesse de rotation. Par conséquent, à des vitesses élevées, les balais doivent être remplacés très fréquemment.
- Des arcs sont créés par le collecteur imposant des ruptures de contact, ce qui consomme rapidement le commutateur et crée des parasites dans le circuit d'alimentation, en plus du rayonnement électromagnétique.
- Les arcs électriques, qui usent rapidement le commutateur et provoquent des parasites dans le circuit d'alimentation, sont causés par un contact électrique imparfait

La technologie du moteur à courant continu sans balai, également connu sous le nom de moteur Brushless, peut résoudre ce problème lorsqu'il s'agit de fonctionner avec des moteurs de petite puissance. L'ensemble balai collecteur est remplacé par un dispositif d'électronique de puissance. Les capteurs à effet Hall peuvent identifier la position du rotor et les transitoires à effet de champ peuvent commuter le courant.

6. Les résultats de simulations avec un régulateur PI:

Des simulations ont été effectuées a l'aide du logiciel Matlab/simulink . la MCC utilisé est de 1.5Kw ;dont les paramètres sont donnés à l'annexe . L'allure de la vitesse du vent donnée par la figure .sa valeur moyenne autour de (6 m/s)

- Profile de vitesse de vent(V vent) (Ω)**(rad /s)**

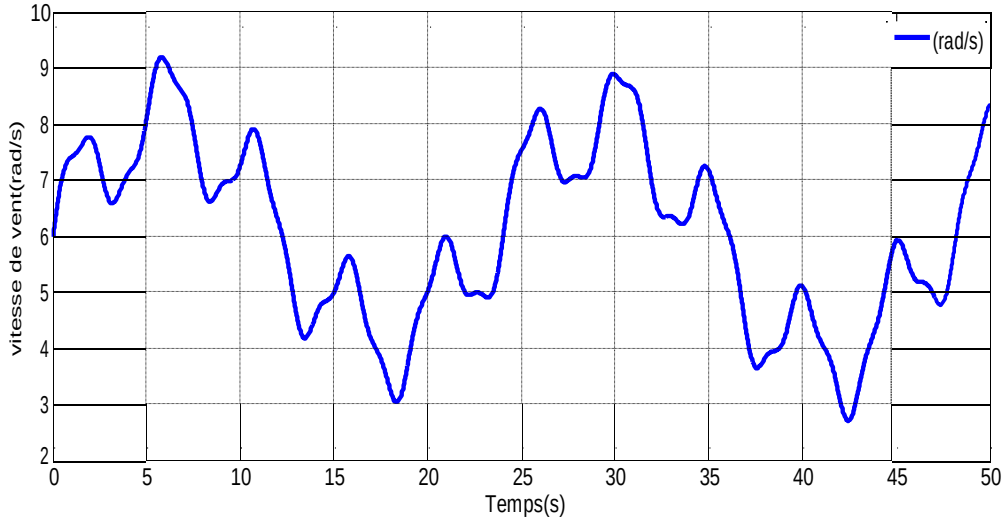
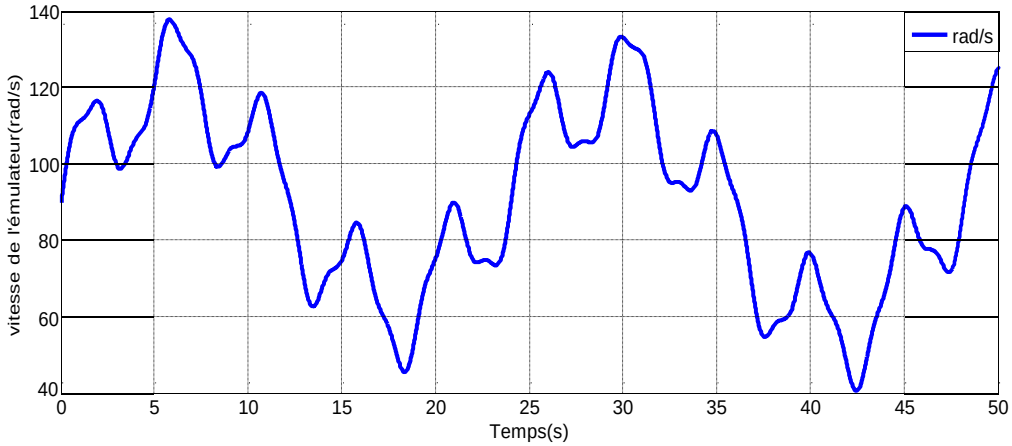


Figure II. 11 : Profil de vitesse du vent (Ω)**(rad /s)**

- Vitesse de l'émulateur et sa référence (Ω)**(rad /s)**



- **Figure II. 12** : Vitesse de l'émulateur et sa référence (Ω)**(rad /s)**

- Le courant de la MCC (Ia) **(A)**

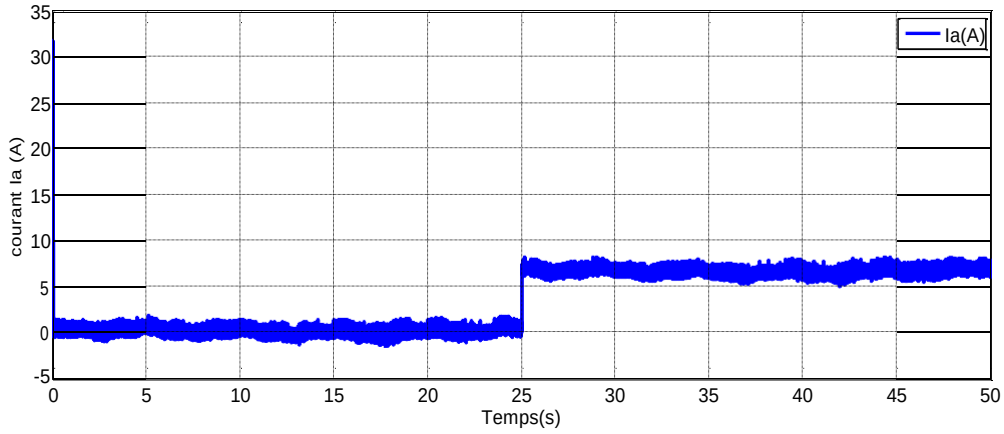


Figure II. 13 :Le courant de la MCC **(Ia) (A)**

- Le courant de la MCC et sa référence (Ia et Iaref)

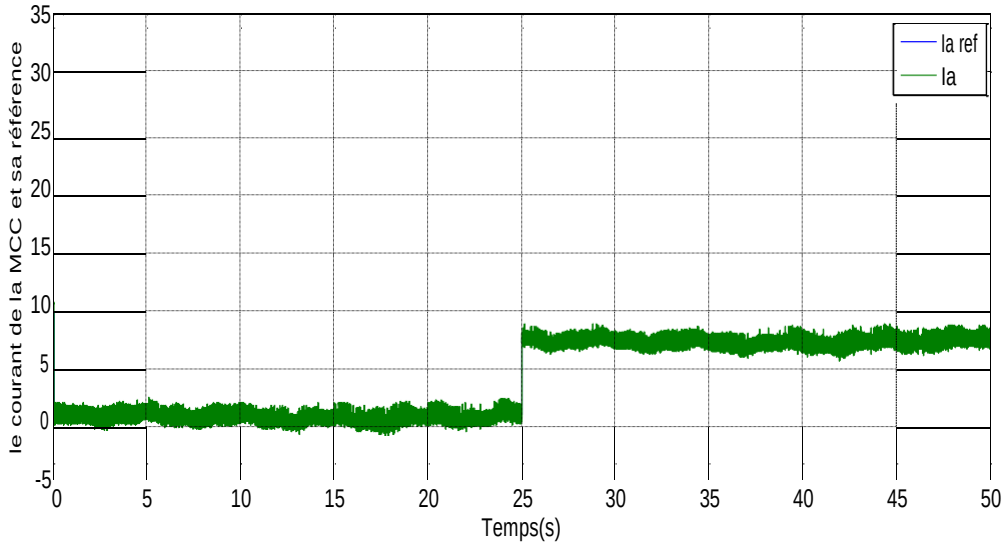


Figure II. 14 :Le courant de la MCC et sa référence**(Ia et Iaref)**

- Le couple de l'émulateur Ce (N .m)

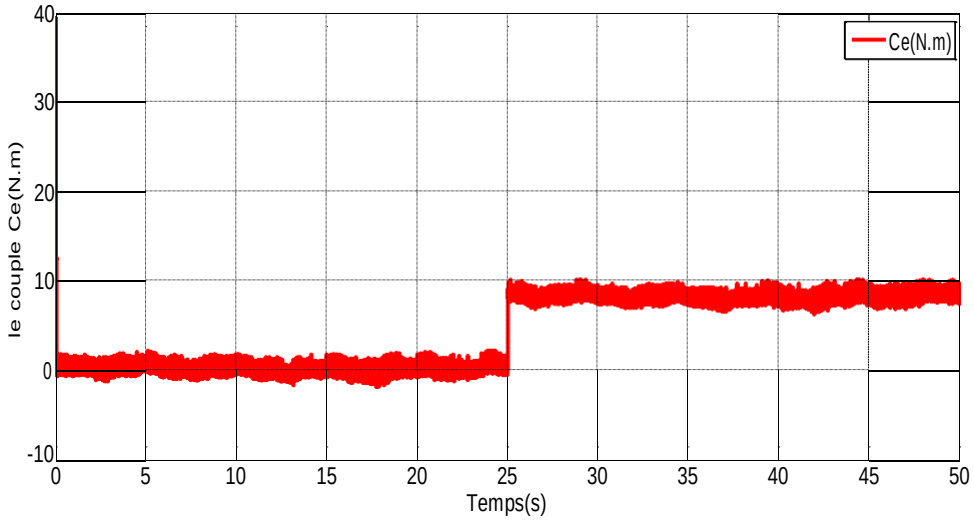


Figure II. 15 : Le couple de l'émulateur**Ce (N .m)**

- Le couple résistant(Cr) **Ce (N .m)**

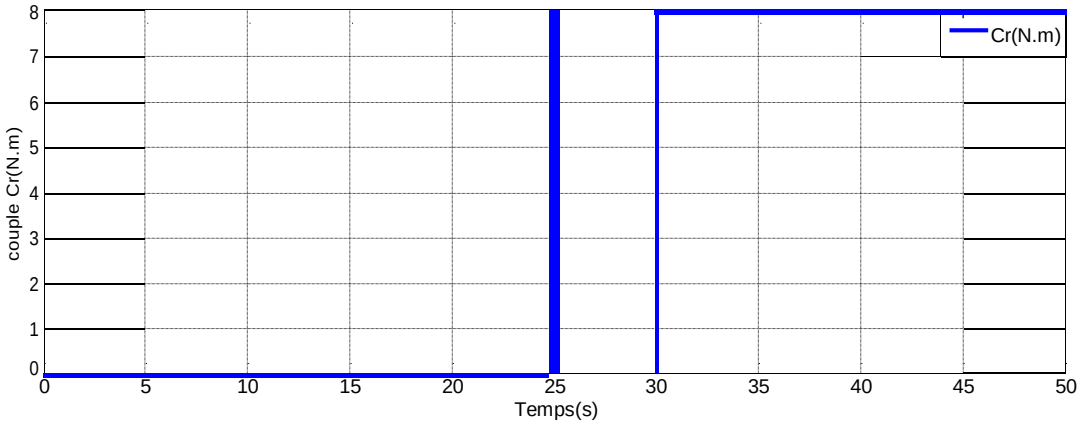


Figure II. 16 : Le couple résistant(Cr) **Ce (N .m)**

- Vitesse de vent (tr/min)

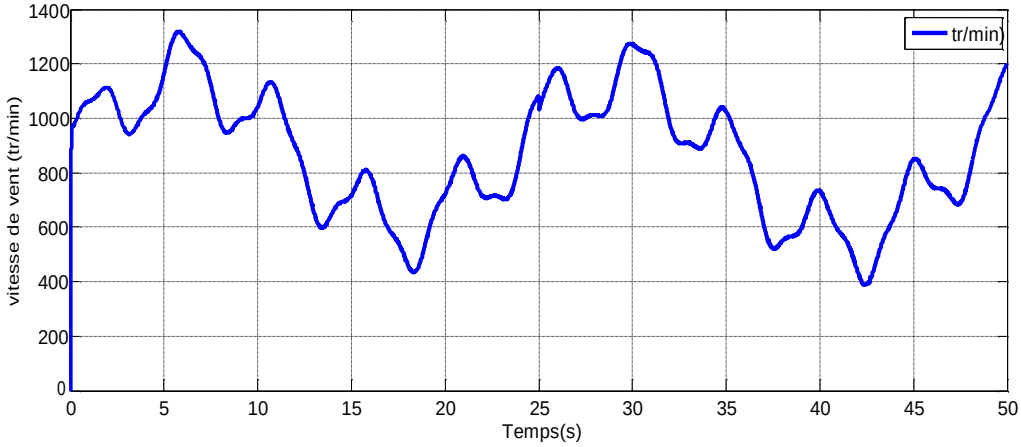


Figure II. 17 : Vitesse de vent **(tr/min)**

III. Conclusion

Dans le deuxième chapitre montre les étapes de réalisation d'un émulateur de la turbine éolienne à base d'une machine à courant continu où on a mis en évidence le contrôle de la turbine avec asservissement de vitesse pour pouvoir simuler l'émulateur. On a appliqué un profil de vent à la turbine éolienne étudiée en chapitre 2 dont le vitesse obtenu est appliqué en référence à une machine à courant continu à excitation séparée ;cette dernière est contrôlée le couple en utilisant des régulateurs PI. A l'aide de l'outil SIMULINK de MATLAB, le modèle de la MCC est couplé comme la turbine à une génératrice. A près avoir simulé l'ensemble etencomparantlesrésultats,onvoitquel'émulateurareproduitlesmêmescaractéristiquesde laturbine éolienne d'où l'objet de cette étude.

Chapitre III :
La commande M5P

III .1 Introduction

Nous allons adopter une nouvelle stratégie de contrôle basée sur l'algorithme d'arbre de décision type M5P pour un système d'énergie éolienne. L'objectif est d'améliorer les performances du régulateur PI avantages de raisonnement de la régulateur PI et de la fonctionnalité de traitement rapide et précise l'algorithme M5P **[BLA18]** [25].Ce contrôle mixte a la capacité de contourner les problèmes de temps de calcul important et la complexité des contrôleurs à régulateur PI
M5P est un algorithme d'apprentissage automatique qui associe des méthodes de régression linéaire et des arbres de décision afin de générer des modèles de prédiction. En particulier, M5P est une version améliorée et optimisée de l'algorithme M5, créé par Quinlan en 1992, qui a permis d'améliorer et d'optimiser ses performances.

III .2 GÉNÉRALITÉS SUR LES ALGORITHMES D'ARBRES DE DÉCISION

Les commandes basées sur la régulateur PI sont largement appliquées dans divers domaine sen raisonne leur avantage à imiter le raisonnement et les jugements humains. Ces techniques intelligentes son tune bonne capacité à gérer l'imprécision et l'incomplétude des informations pour les systèmes non linéaires. Cependant, en particulier dans des conditions en temps réel, présente un sérieux handicap. [33].

L'algorithme. M5P est l'un des modèles d'arbre de décision permettant d'interpréter les systèmes sous forme graphique d'un arbre de décision. De nombreuses recherches ont étudié cette technique et finiront par conclure que l'approche d'apprentissage basée sur M5P peut donner les mêmes extraites directement

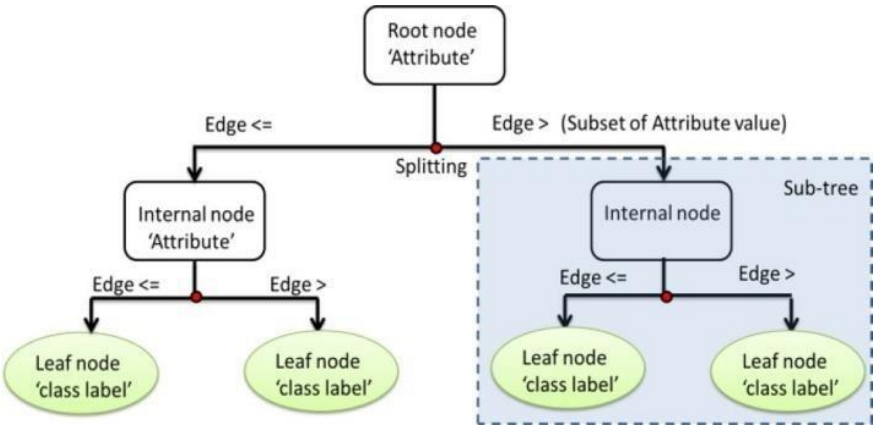


Figure. III.1 : Architecture d'un arbre de décision avec différents n [26].

Les arbres de décision sont des algorithmes d'apprentissage supervisés qui peuvent être utilisés pour des tâches de classification et de régression. Ces outils de modélisation prédictive utilisent de nombreuses approches algorithmiques qui divisent des ensembles de données nommés « attributs» sous la forme d'arbres à l'aide des règles de décision avec des instructions sous la forme de: if-then-else.

M5-Pruned (M5P ;paré) est l'un des algorithmes d'arbre de décision couramment utilisés. La nouvelle forme consiste à enlever les branches indésirables afin d'améliorer la forme de l'arbre .Contrairement à d'autres algorithmes d'arbres, le M5P a la possibilité d'introduire une régression linéaire au modèle classique selon certains paramètres définis**[BAL15]**. [27].,

L'objectif est de construire un modèle d'apprentissage qui peut être utilisé pour prédire la valeur cible (nœud terminal) en enseignant des règles simples déduites des ensembles de données précédemment collectés **Figure. III.1** .montre un arbre de base où le premier attribut représente le nœud racine suivi du processus de fractionnement du nœud qui se traduit par des nœuds internes (nœud de décision)et un nœud feuille final (nœud terminal)qui ne peuvent pas être divisés et conservent la classe étiquette (puissance nominale). De nombreux nœuds internes sont inter connectés entre eux pour former une sous-section appelée sous-arbre ou branche.

III .3 : Définition de L'algorithmeM5P

Le M5P est un d'algorithmes d'apprentissage automatiques les plus connus. Dans la présente section, cet algorithme est proposé pour améliorer le contrôle l'émulateur de vent en replaçant le PI par une algorithme M5P. De plus ,cet algorithme est basé sur une combinaison entre l'algorithme d'arbre de décision et l'algorithme de régression linéaire .Généralement, le modèle d'arbre obtenu est composé de trois types de nœuds appelés : nœud racine, nœud interne ,et feuille ,ces nœuds sont inter connecté sentre eux par des branches comme l'illustre la **Fig. III.2** .L'algorithme fonctionne en traitant l'écart type des valeurs de classe dans un nœud comme mesure d'erreur et calcule la réduction attendue de cette erreur à la suite du test de chaque attribut et de la cible dans ce nœud.

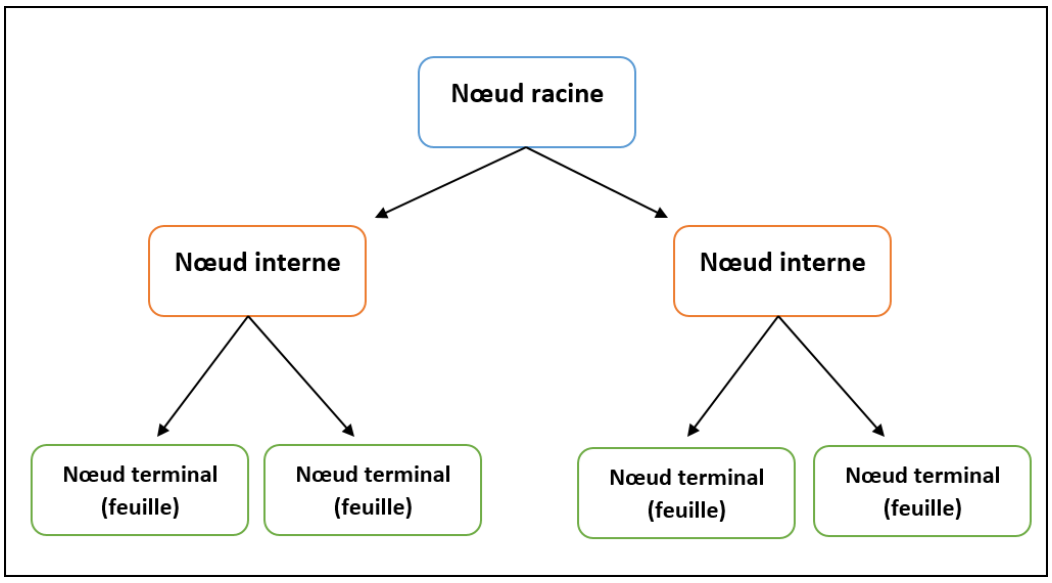


Figure. III.2 : diagramme de base l'algorithmeM5P

III.4 Arbre de décision

Une sortie nominale basée sur un ensemble de données est fournie à partir d'une étiquette de classe prédite par une forme d'arbre de construction et généralisée sous forme de modèle non paramétrique pendant la phase d'apprentissage, permettant ainsi la classification correcte des données non vues dans la plupart des cas[28]. L'arbre de décision est comme étant un modèle de classification sous forme de branches d'arbre permettant de classifier un ensemble de données constitué d'attributs et de cibles. Le modèle se compose de trois nœuds différents appelés, le nœud racine, il contient l'attribut avec la réduction maximale de l'écart type dont elle est représentée par l'équation (III.5), le nœud interne et les nœuds terminaux ou les feuilles.

La phase de croissance se base sur les valeurs des attributs pour subdiviser les nœuds. L'objectif principal est d'augmenter la profondeur de l'arbre en réduisant l'ensemble de données à un sous-ensemble plus petit et la minimisation de l'erreur de prédiction des valeurs numériques aux nœuds terminaux, c'est-à-dire que sur la base de la minimisation des erreurs de prédiction des réponses numériques, un attribut est choisi et utilisé pour diviser l'ensemble de données à chaque nœud. L'erreur de prédiction est calculée en mesurant la réduction de l'écart-type (RET) qui est exprimée par

$$xRET = S_d(T) - \sum_i \frac{T_i}{T} \cdot S_d(T) \quad \text{(III.1)}$$

Où T est l'ensemble de données d'entrées qui atteint le nœud , Ti est les ensembles résultants d'un nœud divisé via l'attribut choisi et S_d représente l'écart type.

III.5 La régression linéaire:

Appelé aussi modèle linéaire, est un outil statistique utilisé pour établir des prévisions dont le but est d'estimer la relation entre deux ou plusieurs variables pour développer une fonction linéaire. On par le de régression

Simple quand on a une variable in dépendante , et régression multiple quand on a plusieurs variables explicatives comme utilisées dans l'algorithme M5P qui représente un avantage de par son modèle efficace et simple. Sur la base de l'ensemble d'exemples atteignant le nœud, un modèle de régression multilinéaire(RML) est construit pour chaque feuille.

Une simplification du modèle der égression est réalisée dans le cas de la diminution d'erreur prédite pour les données futures.

Équation (I.2) exprime la forme générale du modèle linéaire des attributs numériques, la minimisation de l'erreur des moindres carrés des valeurs réelles et prédites des données d'apprentissage sont exprimée par l'équation (I.3) et réalisé par l'algorithme permettant de calculer le poids de la RML. Le vecteur des poids correspondant à l'erreur minimale est donné dans l'équation (I.4)

$$LM = w_0 + w_1\alpha_1 + \ldots + w_k\alpha_k \qquad \text{(III..2)}$$

Ou $\alpha 1$à αkreprésentent les valeurs des attributs et w0à wksont les poids du modèle multilinéaire.

$$Min \sum (T - T')^2 \qquad \text{(III...3)}$$

Ou T et T' sont respectivement les valeurs des cibles

réel les et prédites.

$$(A'A)\text{-}1A'T \qquad \text{(III..4)}$$

A′vec A est le vecteur d'attribut

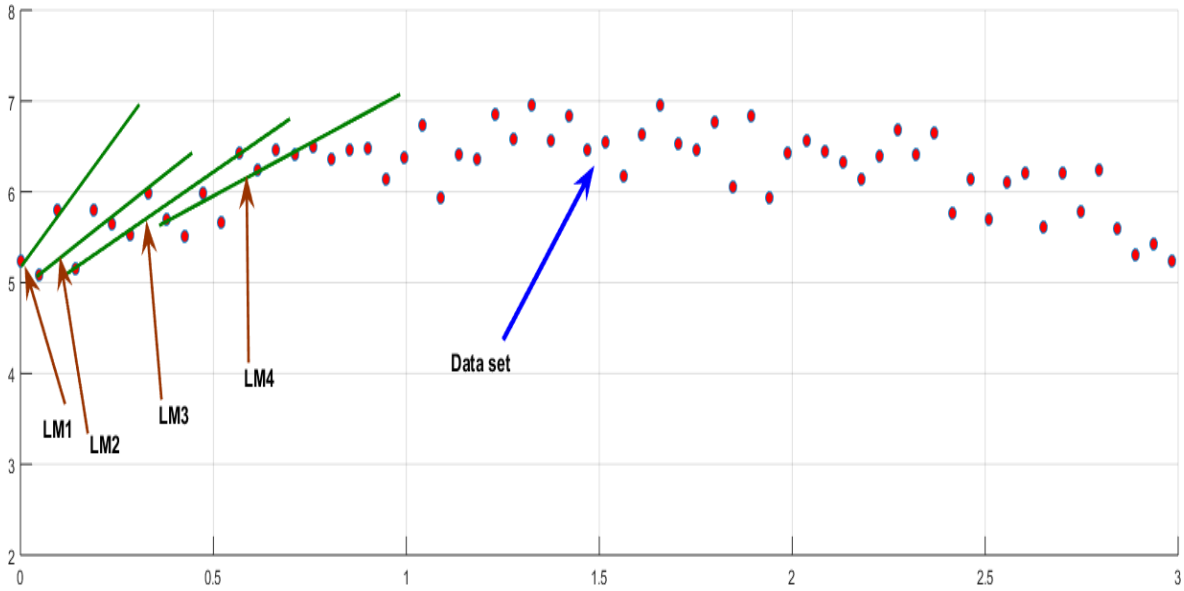


Figure. III.3 : Régression Multi-linéaire d'un ensemble de donnée.

III.6 L'étape de l'élagage:

La phase actuelle est importante car elle permet d'améliorer le modèle. L'algorithme M5P nous donne un modèle initial compliqué et peut avoir des nœuds et des branches des ou s arbre in utiles,ce qui peut conduire

à une mauvaise prédiction pour l'ensemble invisible. La phase d'élagage consiste à supprimer ces branche sous ou s-arbres pour avoir un modèle d'arbre de taille minimale et de précision et de prédiction plus efficace. A chaque instant où la réduction de l'erreur estimée est effectuée, l'arbre est élagué. La phase de l'estimation de l'erreur absolue moyenne (EAM) décrite par l'équation (I.5) entre la valeur réelle et la valeur prédite atteignant le nœud actuel permet la compensation entre le modèle non élagué et le modèle élagué de l'arbre

$$\text{EAM} = \frac{1}{\text{N}} + \sum_{i=1}^{N} |\text{T} - \text{T}'| \qquad \text{(III..5)}$$

Ou le N représente le nombre d'exemples.

L'estimation de l'erreur absolue moyenne des échantillon satteignantle nœud courant sous-estime généralement l'erreur prédite des cas non vus, une compensation par multiplication par un facteur est effectuée ,pour minimiser l'erreur estimée.

$$\frac{n+\text{v}}{n-v} \qquad \text{(III..6)}$$

III.7 Le processus de lissage :

Dans cette présente étape, le modèle est amélioré du point de vue de la précision grâce au processus de lissage. Pour un modèle d'arbre élagué, le modèle de discontinuité est incontournable pour les modèles linéaires adjacents au niveau de la feuille. Le pas est important justement pour les modèles obtenus avec un faible nombre d'entraînements et donc qui contiennent des scénarios différents. Le lissage est exprimé et calculé comme suit:

$$p' = \frac{np+Kq}{n+K} \qquad \text{(III..7)}$$

Où p est la valeur prédite donnée au nœud actuel, q est la valeur prédite du modèle dans le nœud actuel ,n est le nombre d' exemples d'apprentissage et k est une constante qui est égaleà15.

III .7.1 Avantagesdel'algorithmeM5P:

- Un algorithme non paramétrique.
- Pas besoin d'un développement mathématique.
- Algorithme constitué d'un simples cript de(IF-THEN).
- Bref temps d'apprentissage.

III .7.2 Inconvénientsdel'algorithmeM5P :

- Algorithme basé sur l'apprentissage.
- Pas de théorie spécifique pour l'obtention d'un modèle exacte.

III.8 Aperçu sur logiciel WEKA

WEKA (Waikato Environment for Knowledge Analysis)est une suite de logiciels d'apprentissage développé à l'Université de Waikato en Nouvelle-Zélande et disponible gratuitement ous licence publique générale GNU**[WEK22]**. [28]. WEKA est un outil t

Rès performant utilisé pour accomplie des taches d'apprentissage automatique et de classifications **[SIN14]**. [29]. C'est pour quoi, il est le logiciel compagnon du fameu xlivre" Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques".



Figure. III.4 : Interface du logiciel WEKA

Pour entamer une opération d'apprentissage , ils uffit des uivreles simples étapes suivantes:

1) Ouverture du logiciel WEKA comme dans Figure (**Fig. III..4)**

2) Aller à Explorateur.

3) Ouvrir un fichier.

4) Choisissezlefichierdata.arff(ARFFestuneextensiondesfichiersWEKA).

5) Ouvrir Classer.

6) Choisissez l'algorithme souhaité (dansnotrecasleM5P).

Démarrer l'opération d'apprentissage

III.9 Préparation et transfert des données avec l'outil bureautique Excel

Tout d'abord, nous devons choisir le modèle de commande où les données sont extraites. Dans notre cas, nous avons choisis le contrôleur PI vu que ce type du régulateurs ou ffre d'un temps de calcul important en particulier sous des conditions expérimentales.

Comme dans, **Fig. III.5.** on démarre le processus de simulation sous MATLAB tout au long avec l'option d'enregistrement des données grâce à l'outil MATLAB/Workspace.

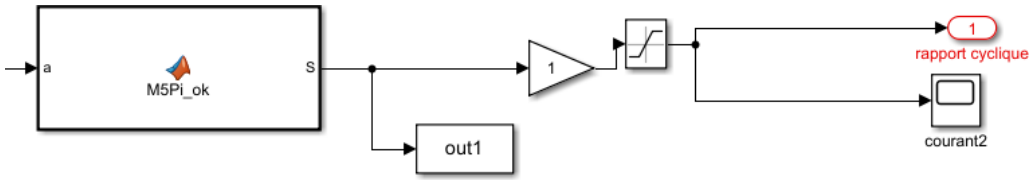
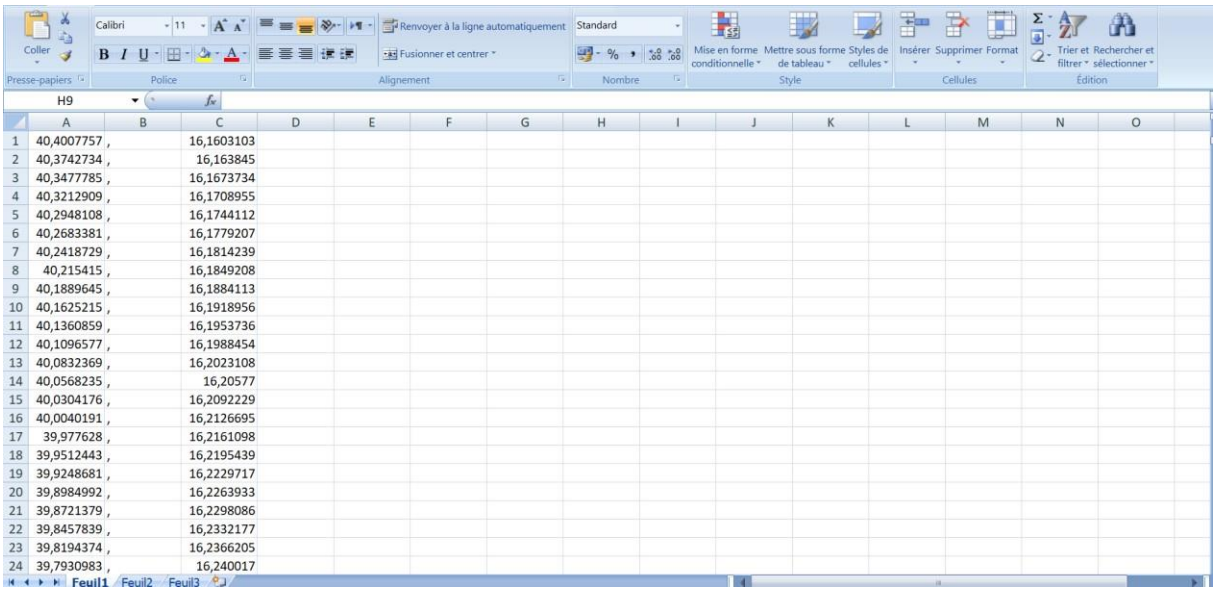


Figure. III.5 : Stockage des données sous MATLAB

L'étape suivante consiste à transférer toutes les données récoltées sous la forme d'un fichier Excel comme montre **Fig. III.5.** La première colonne A représente l'entrée 1 de l'erreur E, et enfin lacolonneCregroupelesdonnéesdesortie.LecolonneBjouentlerôledesvirgulesdeséparation.



	A	B	C
1	40,4007757 ,		16,1603103
2	40,3742734 ,		16,163845
3	40,3477785 ,		16,1673734
4	40,3212909 ,		16,1708955
5	40,2948108 ,		16,1744112
6	40,2683381 ,		16,1779207
7	40,2418729 ,		16,1814239
8	40,215415 ,		16,1849208
9	40,1889645 ,		16,1884113
10	40,1625215 ,		16,1918956
11	40,1360859 ,		16,1953736
12	40,1096577 ,		16,1988454
13	40,0832369 ,		16,2023108
14	40,0568235 ,		16,20577
15	40,0304176 ,		16,2092229
16	40,0040191 ,		16,2126695
17	39,977628 ,		16,2161098
18	39,9512443 ,		16,2195439
19	39,9248681 ,		16,2229717
20	39,8984992 ,		16,2263933
21	39,8721379 ,		16,2298086
22	39,8457839 ,		16,2332177
23	39,8194374 ,		16,2366205
24	39,7930983 ,		16,240017

Fig. III.6 : Stockage des données sous EXCEL

III.10 Démarche d'apprentissage sous WEKA

La commande proposée est réalisée grâce au logiciel WEKA. Cet outil peut fournir unestructureéquivalentedumodèleinitialsousformed'arbrededécision.Decefait, l'algorithme M5P reproduitlesrésultatsdesortieavecdesmodèlesd'instructionslogistiques appelés LMT (Logistic model tree). Figure **Fig. III.7** représente la méthodologie de recherche suivie a fin d'obtenirleco de MATLAB désiré **[FIE19]-[BOUH22]**. [30]. [31].

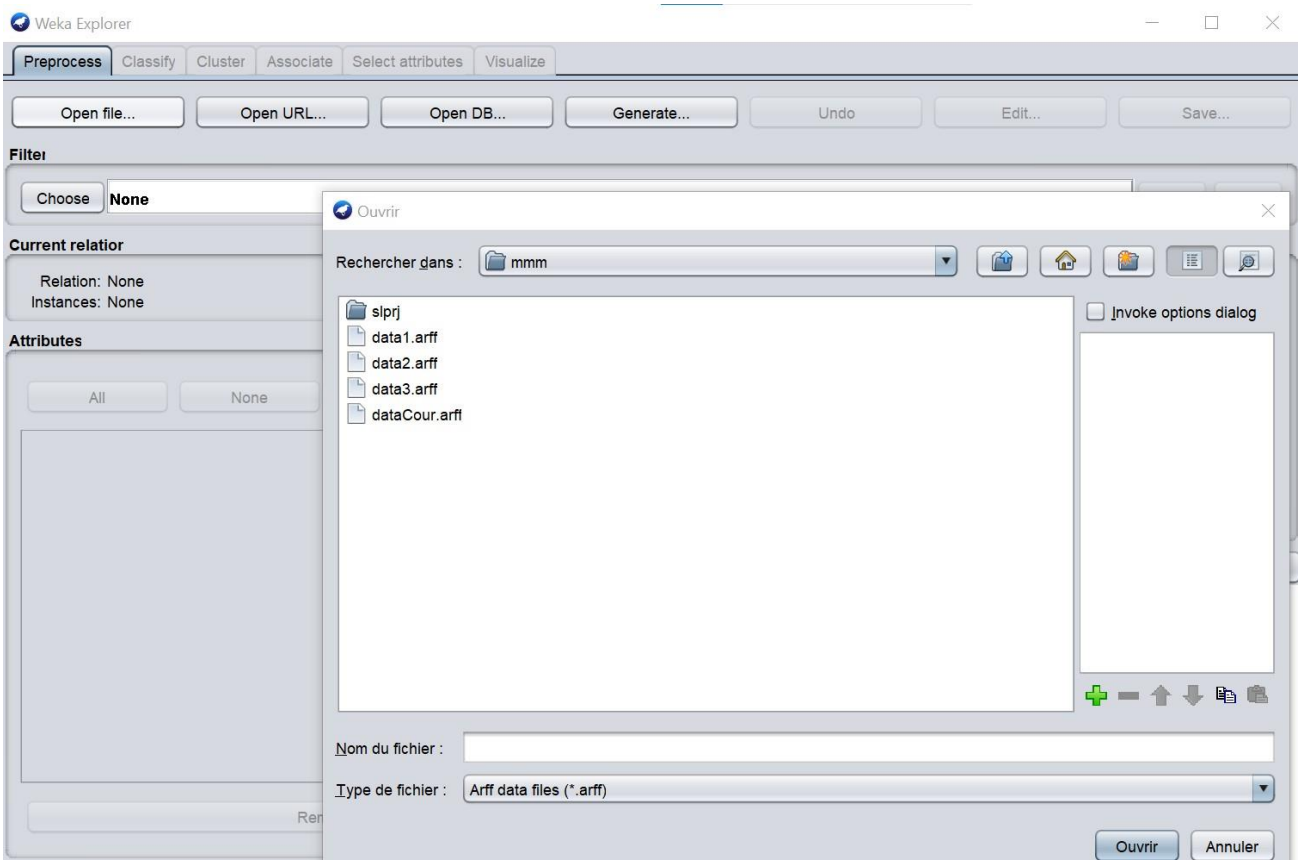


Figure. III.7 : Étapes de formation du contrôleur mixte PI-M5P

III.11 Interprétation des résultats sous forme d'un programme MATLAB

Sous l'environnement WEKA, les données d'attribut ont été extraites à partir du régulateur PI,puis convertir manuellement à une nouvelle forme d'extension (.ARFF). En ce qui concerne la répartition des données, un pourcentage de 66% est généralement choisie pour l'étape d'apprentissage .Figure **(Fig. III.7)** montre le modèle obtenu du classificateur par l'algorithme M5P **[BOUH22-1]**. [32].

III.11 .1 LA VITESSE .

```
Test mode:    evaluate on training data

=== Classifier model (full training set) ===

M5 pruned model tree:
(using smoothed linear models)

b <= 99986769.5 :
|   b <= 32386121.5 : LM1 (71131/16.39%)
|   b >  32386121.5 :
|   |   b <= 69335349 :
|   |   |   b <= 59809705.5 : LM2 (22888/21.396%)
|   |   |   b >  59809705.5 : LM3 (7051/19.342%)
|   |   b >  69335349 :
|   |   |   a <= -0.5 :
|   |   |   |   a <= -5.5 :
|   |   |   |   |   a <= -8.5 : LM4 (432/4.097%)
|   |   |   |   |   a >  -8.5 : LM5 (169/4.477%)
|   |   |   |   a >  -5.5 : LM6 (2285/4.376%)
|   |   |   a >  -0.5 :
|   |   |   |   b <= 92619514 : LM7 (6209/17.475%)
|   |   |   |   b >  92619514 : LM8 (1553/21.29%)
b >  99986769.5 : LM9 (88283/8.283%)
```

Figure. III.8 : Modèleobtenud'arbreM5P de la vitesse

Comme dernière étape,le modèle précèdent peut se traduire facilement par un code MATLAB avec des instructions IF-ELSE. Cette simplification rend le système final très rapide et facile à implémenter expérimentalement .En plus, cette structures simple peut être utiliser pour remplacer des contrôleurs PI. Comme résultat , **Figure III.8** montre l'architecture d'arbre obtenue qui comprend 9 LMT .Une fois l'algorithme M5P est développé, on interprète les résultats obtenus avec un code MATLAB simplifié. Le programme final détaillé est disponible dans la section Annexe.

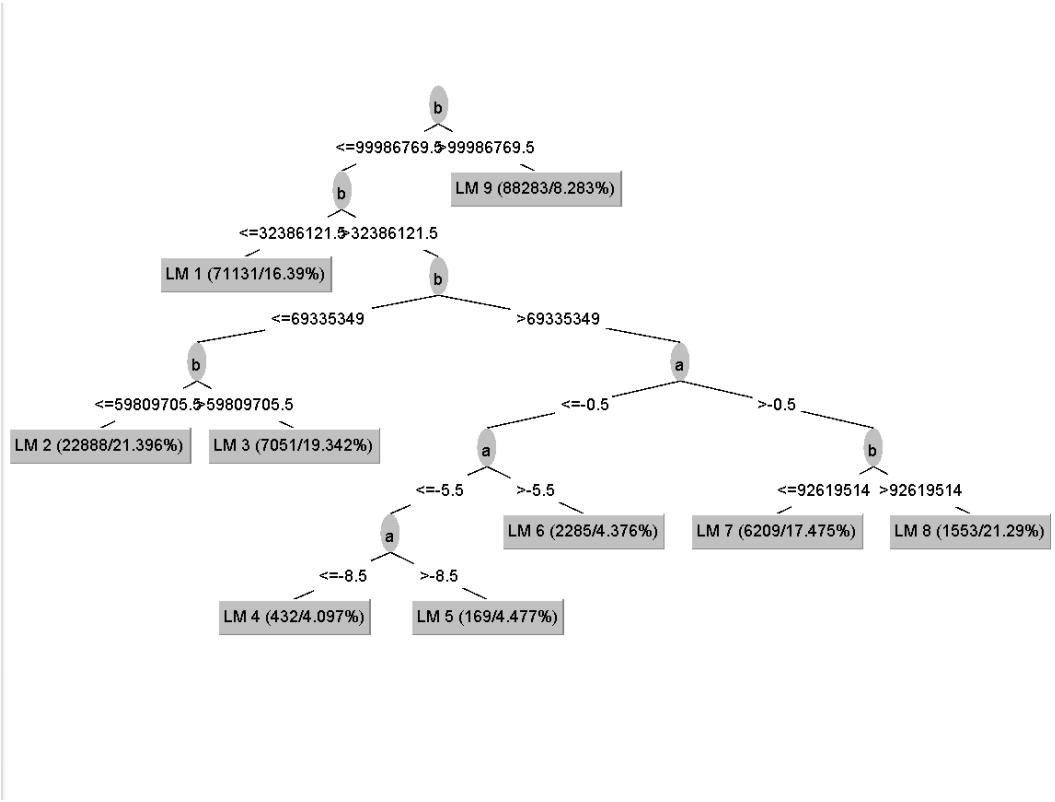


Figure III.9 : Modèle des décisions obtenu sous WEKA de la vitesse

III.12. application de la commande M5P sur l'émulateur de vent basé sur la MCC :

La commande M5P n'est pas une commande standard dans le contexte des contrôles de moteurs à courant continu (MCC). Dans le domaine des MCC, les commandes typiques impliquent généralement des signaux de contrôle tels que des tensions ou des signaux de commande numériques pour démarrer, arrêter, inverser ou réguler la vitesse des moteurs à courant continu.

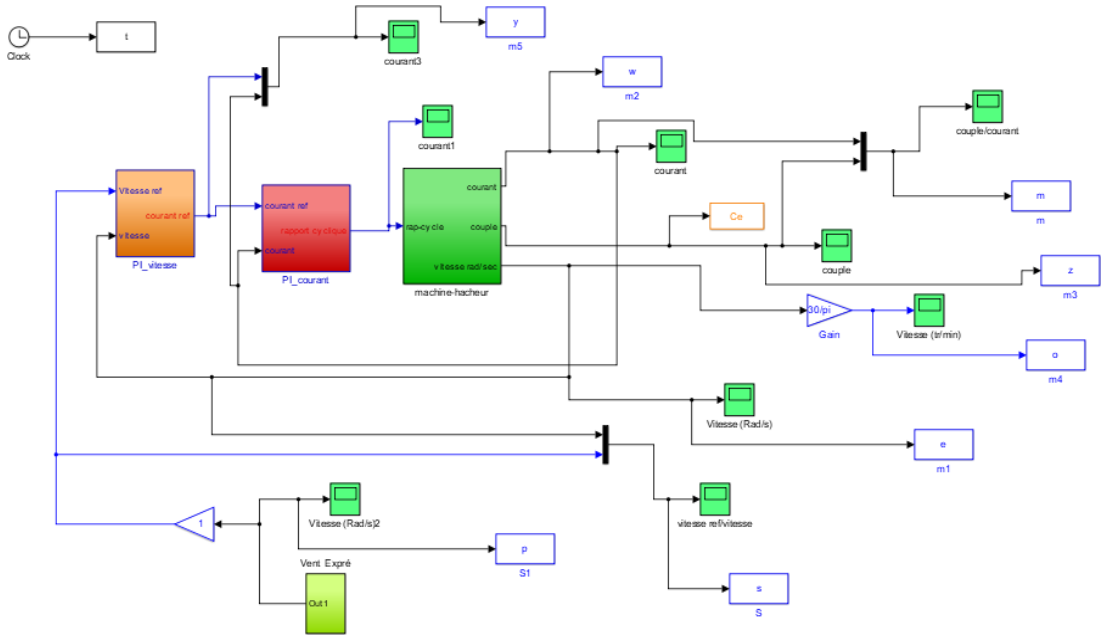
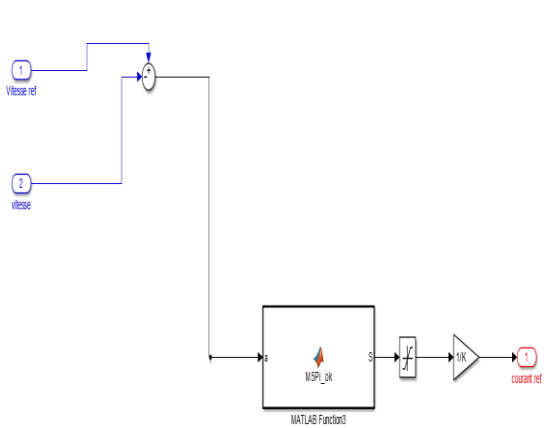


Figure. III.10 : Schéma block d'un système éolienne avec de régulateur (PI) de vitesse et de courant




```
if b <= 99986769.5
   if b <= 32386121.5
S=LM1 ; % (71131/16.39%)
   else b >  32386121.5
      if b <= 69335349
         if b <=
59809705.5
 S=LM2 ; %
(22888/21.396%)
         else b >
59809705.5
 S=LM3 ; % (7051/19.342%)
end
      else b >  69335349
           if a <= -0.5
              if a <= -
5.5
                 if a <=
-8.5
S=LM4 ; % (432/4.097%)
                 else a >
-8.5
S=LM5 ; % (169/4.477%)
end
              else a >  -
5.5
S=LM6 ; % (2285/4.376%)
end
           else a >  -0.5
            if b <=
92619514
S=LM7 ; % (6209/17.475%)
            else b >
92619514
 S=LM8 ; % (1553/21.29%)
end
end
end
end
else b >  99986769.5
```

```
S=LM9 ; % (88283/8.283%)

end
```

Fig. III.11 : Schéma block d'un système éolienne de vitesse et sa programme dans logiciel /Matlab

III.13 Implémentation du M5P:

L'ensemblededdonnéesde10000instancesdetestd'entréesetdesortiesestcaractériséparuneerreur,une variation d'erreur des vitesse et vitesse de référence de et des cibles de référence de tension de rotor sont utilisées pour synthétiser un script de 9 règles pour la vitesse et 14 règles pour le courant. En effet, 66% des données sont utilisées pour la formation et le reste est utilisé pour les tests figure III 30. Le modèle d'arbre de décision est obtenu à l'aide du logiciel Weka basé sur le jeu de données de test neuronal.

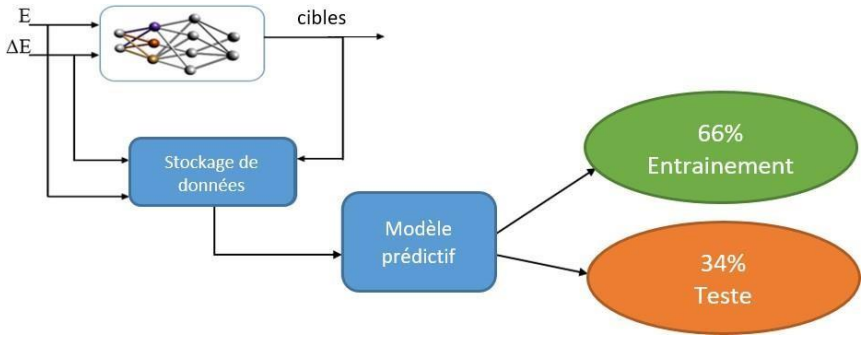


Fig. III.12 : Schéma d'entrainement et de test.

Pour réaliser le modèle d'arbre de décision ,une n semble de données est nécessaire pour établir le processus de formation. En effet, le modèle arborescent est proposé dont le but principal est d'améliorer le schéma de contrôle des vitesse et vitesse de référence , Un test expérimental basé sur l'algorithme M5P été réalisé et enregistré via le logiciel WEKA figure III 32. Grâce à cet enregistrement, un ensemble de données d'entrée/sortie de taille appropriée a été collecté pour le processus de formation du l'algorithme M5P .

III. 14. Le courant

```
b <= 99992400 : LM1 (71630/98.696%)
b >  99992400 :
|   b <= 309428835 : LM2 (102696/37.76%)
|   b >  309428835 :
|   |   b <= 366167822 :
|   |   |   b <= 339758404.5 : LM3 (14039/38.524%)
|   |   |   b >  339758404.5 :
|   |   |   |   b <= 358121296.5 : LM4 (5199/53.497%)
|   |   |   |   b >  358121296.5 : LM5 (1301/79.324%)
|   |   b >  366167822 :
|   |   |   b <= 395629020 : LM6 (1840/104.647%)
|   |   |   b >  395629020 :
|   |   |   |   a <= -1.5 : LM7 (1028/167.282%)
|   |   |   |   a >  -1.5 :
|   |   |   |   |   a <= -0.5 : LM8 (467/272.615%)
|   |   |   |   |   a >  -0.5 :
|   |   |   |   |   |   a <= 0.5 : LM9 (1383/217.629%)
|   |   |   |   |   |   a >  0.5 :
|   |   |   |   |   |   |   a <= 3.5 : LM10 (167/0%)
|   |   |   |   |   |   |   a >  3.5 :
|   |   |   |   |   |   |   |   a <= 7.5 : LM11 (175/0%)
|   |   |   |   |   |   |   |   a >  7.5 :
|   |   |   |   |   |   |   |   |   a <= 8.5 :
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   b <= 832934956 : LM12 (26/0%)
|   |   |   |   |   |   |   |   |   |   b >  832934956 : LM13 (11/0%)
|   |   |   |   |   |   |   |   |   a >  8.5 : LM14 (39/0%)
```

Figure. III.13 : Modèleobtenud'arbreM5P de courant

Comme dernière étape, le modèle précèdent peut se traduire facilement par un code MATLAB avec des instructions IF-ELSE. Cette simplification rend le système final très rapide et facile à implémenter expérimentalement. En plus, cette structures simple peut être utiliser pour remplacer des contrôleurs PI. Comme résultat, **Figure III.9** montre l'architecture d'arbre obtenue qui comprend 14 LMT .Une fois l'algorithme M5P est développé, on inter prète les résultats obtenus avec un code MATLAB simplifié. Le programme final détaillé est disponible dans la section Annexe.

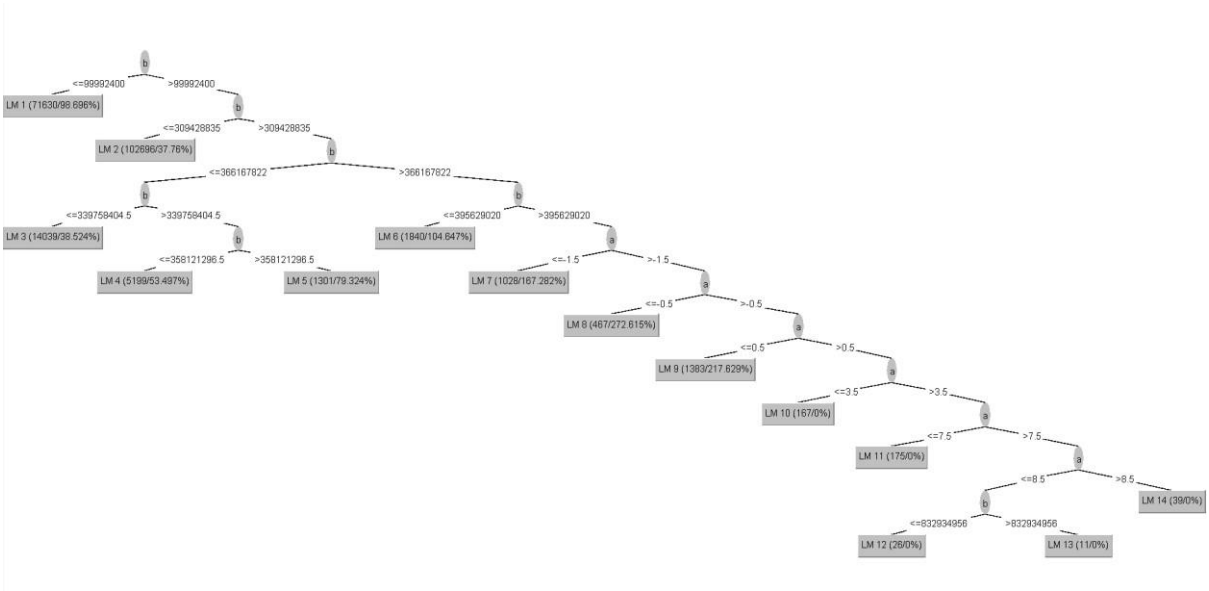
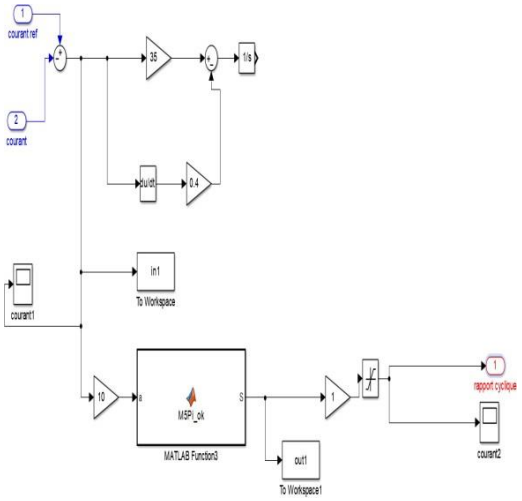


Figure. III.14 : Modèle des décisions obtenu sous WEKA de courant




```
if b <=  99992400
S=LM1 ; % (71630/98.696%)
else b >  99992400
     if b <=  309428835
S=LM2 ; % (102696/37.76%)
    else b >  309428835
       if b <=
366167822
             if b <=
339758404.5
S=LM3 ; % (14039/38.524%)
             else b >
339758404.5
                  if b
<=  358121296.5
S=LM4 ; % (5199/53.497%)
                  else
b >  358121296.5
S=LM5 ; % (1301/79.324%)
end
end
        else b >
366167822
             if b <=
395629020
S=LM6 ; % (1840/104.647%)
             else b >
395629020
                  if a
<= -1.5
S=LM7 ; % (1028/167.282%)
                  else
a >  -1.5

if a <= -0.5
S=LM8 ; % (467/272.615%)

else a >  -0.5

if a <= 0.5
S=LM9 ; % (1383/217.629%)

else a >  0.5

if a <= 3.5
S=LM10 ; % (167/0%)

else a >  3.5

if a <= 7.5
S=LM11 ; % (175/0%)

else a >  7.5

if a <= 8.5

if b <=  832934956
S=LM12 ; % (26/0%)

else b >  832934956
S=LM13 ; % (11/0%)
end

else a >  8.5
 S=LM14 ; % (39/0%)
end
end
end
end
end
end
end
end

end
```

Figure. III.15 : Schéma block d'un système éolienne de courant et sa programme dans logiciel / Matlab

III.15.1 .Étude et comparative

Pour avoir une meilleure évaluation des résultats qu'on a obtenu dans ce chapitre , il est judicieux d'effectuer une comparaison entre les déférentes commandes ainsi élaborées, afin de montrer les performances dynamiques et statiques et la robustesse de chacune de ces commandes cette étape apparence une aide pour le choix du type de commande selon le cahier de charge d'application envisagée. La meilleure commande sera celle qui répond aux exigences telle que :

Meilleures performances dynamiques et statiques, meilleures poursuite des trajectoires prédéterminées meilleures robustesse aux variations des paramètre set le rejet des perturbations inconnus avec une réponse performante toute en assurant le découplage en treces deux principales dynamiques (la vitesse et le courant).

III .15.2. Interprétation et évaluation

Les résultats des simulation de la régulation ; sont données par les **Figure. I.17** et **Figure. I.18**

les performances offertes par chaque type de commande donnent :

III.15 .3. Commande par régulateur PI

Performances de régime transitoire et statique, sont satisfaisantes.

Performances de la robustesse, rejet des perturbations est rapide.

III.15 .4. Commande par algorithme M5P

Performances de régime transitoire et statique et performances de poursuite sont très satisfaisantes.

Le temps de réponse pour la commande M5P2 plus court que celui du régulateur PI.

Performances de la robustesse sont satisfaisantes et le rejet des perturbations est rapide.

III .16.Application du régulateur PI

III .16.1.Dimensionnement du PI

En premier lieu, dans le but de réguler indirectement la vitesse et le courant , le régulateur PI classique est choisi pour le control des vitesse et de courant afin de prendre l'évolution du système comme référence et la comparer avec la commande M5P. L'application du régulateur PI est simple à utiliser de point de vu expérimental, mais d'après les expériences et l'encombrement du système le réglage nécessite un

Régulateur réalisémanuellementmenéparl'anti-saturationcarl'utilisationdublockPIpréfabriqué

ne nous permet pas tout le temps le bon fonctionnement du réglage comme il est décrit dans le schéma illustré dans la **Figure. I.16** ci-dessous.

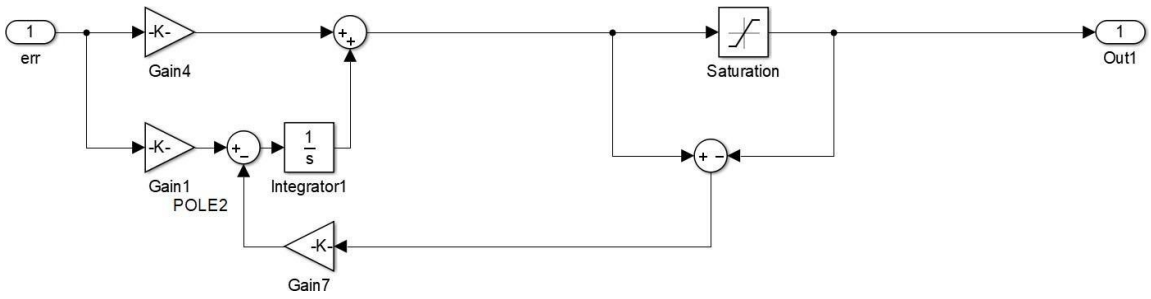


Figure. III.16 : Schéma du régulateur PI utilisé.

III.17. résultats des simulations de régulateur PI

Nous avons établi un test de simulation dans le but de commande indépendante de vitesse et de courant à travers le contrôle de la machine a courant continu (MCC).

Le test de simulation esr réalisé en fonctionnement variable tout en appliquant un profil de vent évoqué précédemment durant une période de 2s au modèle de la turbine. les figures suivantes représentent les résultats d'une étude comparative en appliquant différentes stratégies de commande dont la régulateur classique PI et l'algorithme proposé le M5P ; les résultats ont été validés par la simulation numérique en utilisant l'interface MATLAB /SIMULINK.

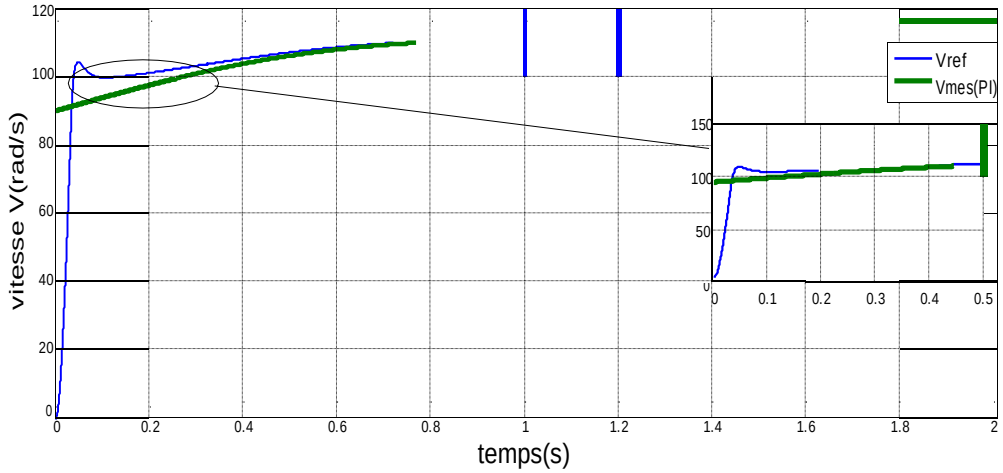


Figure. III.17 :la vitesse Ω mesuré(PI) et la vitesse de référence Ω réf

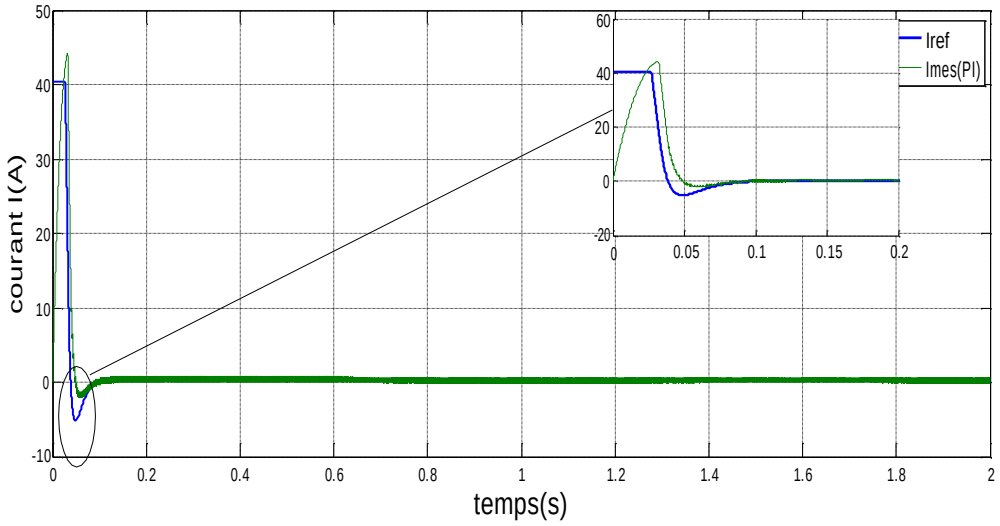


Figure. III.18 :le courant I(A) mesuré(PI) et le courant de référence I réf

III.18 résultats des simulations d'algorithme M5P

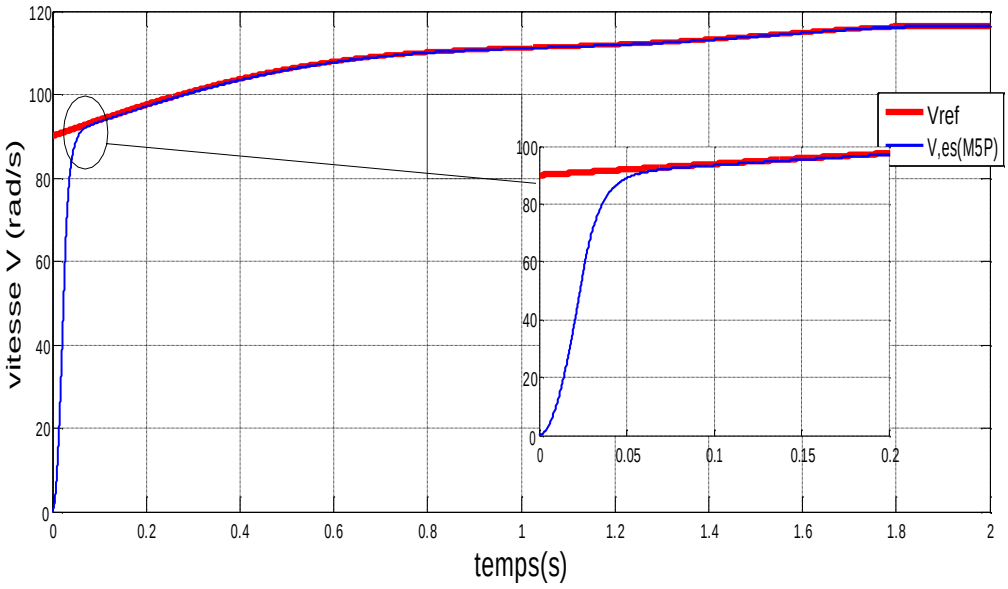


Figure. III.19 :la vitesse Ω mesuré(M5P) et la vitesse de référence Ω réf

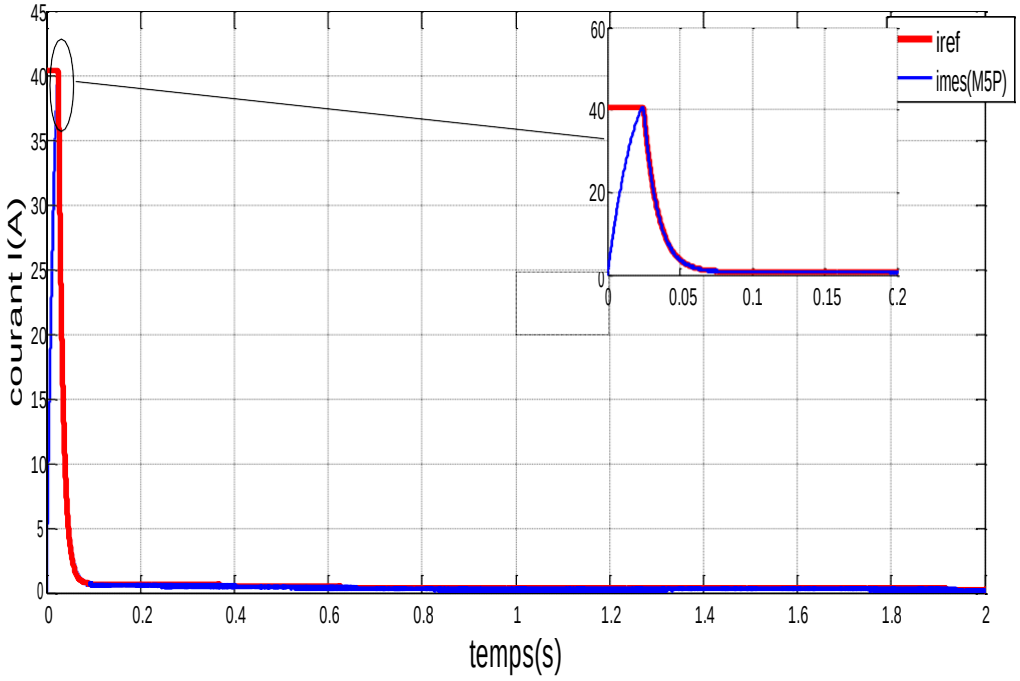


Figure. III.20 :le courant I(A) mesuré(M5P) et le courant de référence Iréf

III.19. comparaison de résultats entre la régulateur classique PI et la commande M5P

III.19.1. LAVITESSE :

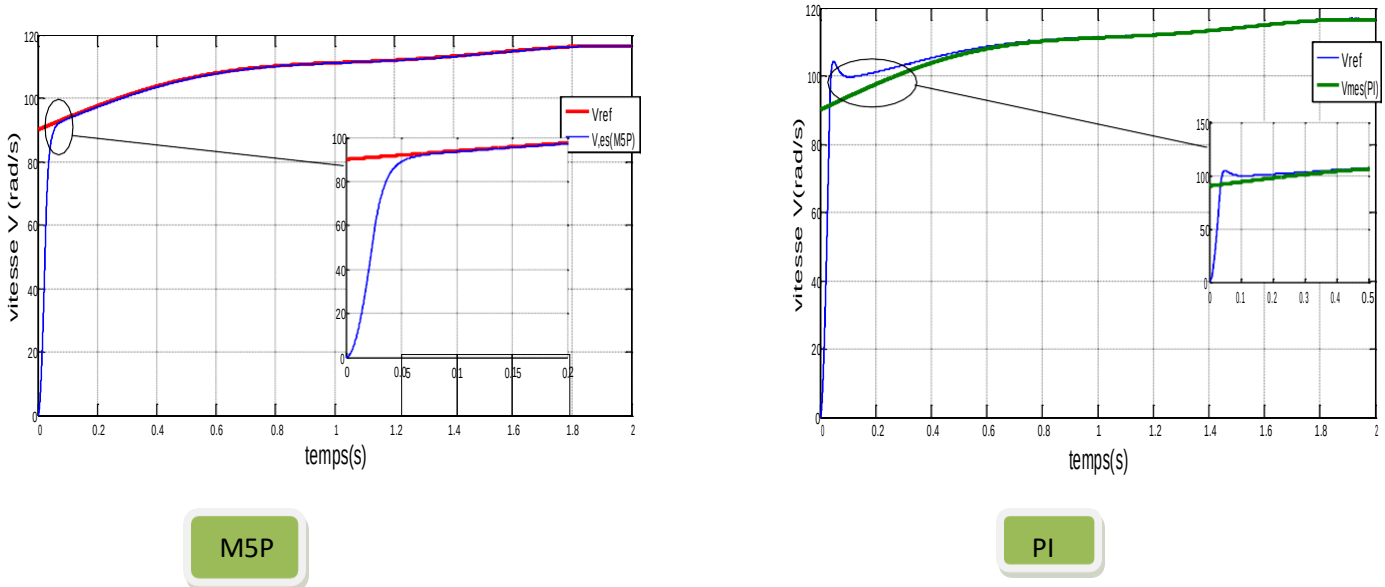


Figure. III.21 : comparaison de vitesse entre M5P et PI

III.19.2. LE COURANT

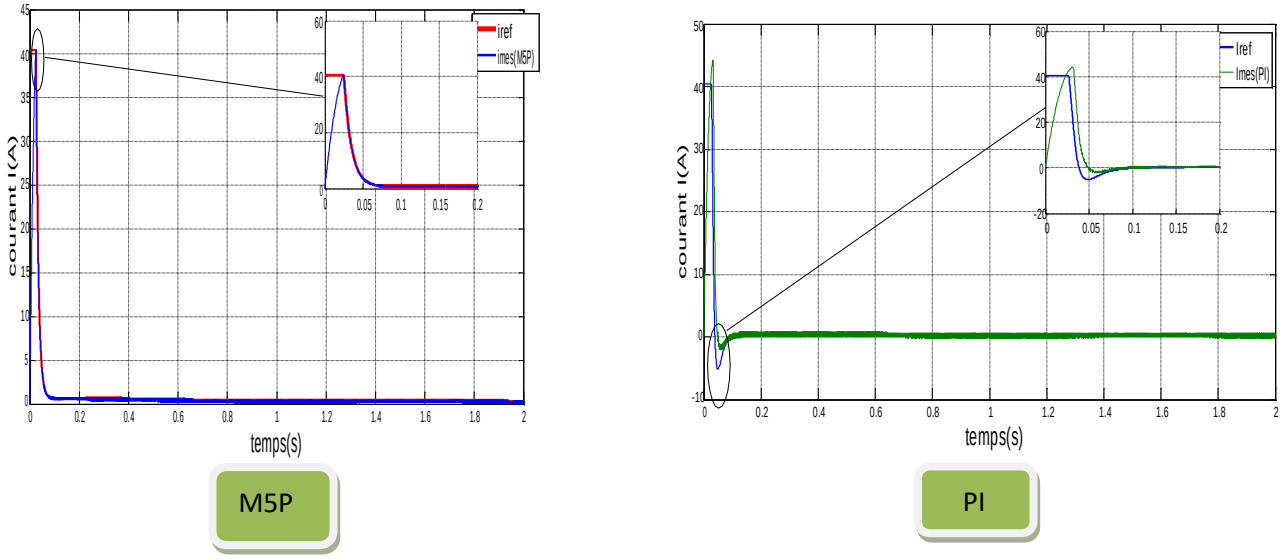


Figure. III.22 :comparaison de courant entre M5P et PI

III.20. CONCLUSION

Ce chapitre a abordé avec simulation MATLAB une nouvelle commande mixte basée sur la combinaison entre le régulateur PI etl'algorithmeM5P.Àl'issuedesimulations, les résultats obtenus montrent clairement la supériorité de la technique proposée .Par rapport aux résultats de régulateur classique PI ,un temps de réponse rapide de 2 s.

Algorithme M5P est une variante de l'algorithme M5, est une technique d'apprentissage automatique utilisée pour la modélisation et la prédiction dans divers domaines, y compris l'énergie éolienne. M5P combine des arbres de décision avec des modèles de régression linéaire pour produire des prédictions plus précises. Voici comment il peut être appliqué dans le contexte de l'énergie éolienne.

Un autre avantage de la méthode PI-M5P , est la phase remarquable d'apprentissage sous WEKA environnement qui dure seulement 0.5 seconde. Quant à la méthode PI, el les emblel a plus lente du rant le processus d'apprentissage sous MATLAB

CONCLUSION GÉNÉRALE

Conclusion générale

L'énergie éolienne est l'énergie obtenue à partir de la force du vent. Elle est captée à l'aide d'éoliennes, qui sont des dispositifs mécaniques constitués généralement de trois parties principales : les pales, le rotor et le générateur. Lorsque le vent souffle, il fait tourner les pales de l'éolienne. Ce mouvement rotatif est transféré au générateur à travers un axe, produisant ainsi de l'électricité.

Dans la première partie, nous avons présenté une vue d'ensemble des diverses turbines éoliennes employées dans la production d'électricité contemporaine. Il décrit comment ces turbines fonctionnent, en particulier la transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique. Un modèle mathématique de la turbine est également établi en se basant sur ses caractéristiques. Il met en évidence la nécessité de disposer de ressources adéquates pour un projet éolien rentable, en particulier des vents forts et constants

Les étapes de réalisation d'un émulateur de turbine éolienne à partir d'une machine à courant continu sont exposées dans le deuxième chapitre. Le contrôle de la turbine avec asservissement de vitesse a été mis en évidence afin de pouvoir simuler l'émulateur. Le profil de vent a été utilisé pour la turbine éolienne étudiée dans le chapitre 2, et la vitesse obtenue est comparée à une machine à courant continu à excitation séparée. Le couple est contrôlé par des régulateurs PI. En utilisant l'outil MATLAB SIMULINK, le modèle de la MCC est connecté de manière similaire à une turbine à une génératrice. Une fois que l'ensemble a été simulé et que les résultats ont été comparés, il est évident que l'émulateur a reproduit les mêmes caractéristiques de la turbine.

Dans le troisième chapitre, une simulation MATLAB a été utilisée pour étudier une nouvelle commande mixte qui utilise le régulateur PI et l'algorithme M5P. Après avoir effectué des simulations, les résultats obtenus démontrent clairement la prévalence de la méthode suggérée. En comparaison avec les résultats du régulateur classique PI.

L'algorithme M5P, est une variante de l'algorithme M5, qui représente une méthode d'apprentissage automatique visant à modéliser et prédire dans différents domaines, y compris l'énergie éolienne. M5P associe des modèles de régression linéaire à des arbres de décision afin de générer des prédictions plus précises. Il peut être utilisé dans le domaine de l'énergie éolienne. Un autre atout de la méthode PI-M5P réside dans la phase d'apprentissage.

REFERENCES BIBLIOGRAFIQUE

[1].L Moreau ; (modalisation ; conception et commande de génératrice à reluctance variable basse vitesse) thèse de doctorat université de Nantes ; 2005**.**

[2].J .Martin ; (Energie éolienne) ; Technique de l'Ingénieur ; traité de Génie énergétique ; PP**.**B85851_B_8585 21**.**

[3].J .Martin ; (Energie éolienne) ; Technique de l'Ingénieur ; traité de Génie énergétique ; PP**.**B85851_B_8585 21**.**

[4].J .Martin ; (Energie éolienne) ; Technique de l'Ingénieur ; traité de Génie énergétique ; PP**.**B85851_B_8585 21**.**

[5].P. Leconte ; M ; Rapin ; E ;S Széchenyi ;(Eolienne ;Technique de l'Ingénieur ;traité de Génie mécanique ;PP ;BM464021**.**

[6].S.ALI et B.MOURAD. (Etude d'un Générateur Asynchrone dans la production d'énergie Electrique par Eolienne ; Mémoire d'ingénieur d'état en Génie Electrique ;ENP ;2006**.**

[7].I**.HAMZAOUI.** (Modalisation de la machine Asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur) Mémoire Magister ; ENP 20/10/2008**.**

[8] .F.POITIER ;(Etude et commode de la génératrice Asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne) thèse de doctorat ; Université de Nantes 19 /11/2003**.**

[9].S.EL Aimani.(Modalisation de Différente Technologies d'Éoliennes Intégrées dans un Réseau de Moyenne Tension) ;Thèse de Doctorat en Génie Electrique ; université des

[10] http://www.campbellsci.co.uk

[11] **Miloud BENMEDJAHED**« Choix du site et optimisation du dimensionnement d'une installation éolienne dans le nord Algérien et son impact sur l'environnement » Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen. Novembre2013.Lille ; France ;2004**.**

sciences et Technologie de

[12]A.BECHOUCHE«Utilisationdestechniquesavancéespourl'observationetlacommanded'u nemachineasynchrone:Applicationàuneéolienne»Thèsedoctorat, UMMTO, 2013

[13]M.MONFARED, H.M.KOJABADI,H. RASTEGAR,«Static and dynamic wind turbine simulator using a converter controlled DC motor » Renewable Energy Vole: 33,.PP 906-913.(2008)

[14]H.BOUKHAMKHAM « Diagnostique des défaillances dans une machine asynchrone utilisé dans une chaine éolienne» Magistère électrotechnique, université de Biskra, 2011

[15]A.FOUILLE, Machine continues, électronique de puissance, Edition DUNOD, 4 émendation Paris, 1980.

[16]M.MALKI, S. BELARBI « Etude et simulation d'un aérogénérateur connecter au réseau (Turbine + MADA + Réseau) en mode continu et discret » Université Aboubeker Belkaid Tlemcen, Master en électrotechnique, 2014

[17]N.LAVERDURE « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires» Thèse doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble,2005.

[18]K. MESBAH « Etude du générateur asynchrone et coordination des puissances dans une ferme éolienne connecté au réseau» thèse doctorat, UMMTO,2016

[19]A. TENINGE « participation aux services système de parcs éoliens mixtes : applications en milieu insulaire» thèse de doctorat, Université de Grenoble,2009

[20]BEKKOUCHE Charaf Eddine et TOUGGOURTI Abdel Kader, « Etude et simulation d'un variateur de vitesse command d'un moteur à courant continu » ,Mémoire de Master électrotechnique Industrielle ,Université KASDIKERBAHOUARGLA,2015-2016.

[21].J .Martin ; (Energie éolienne) ;Technique de l'Ingénieur ; traité de Génie énergétique ;PP**.**B85851_B_8585 21**.**

[22].N.BENNABI, S.CHERFA, O.MEZIANI « modélisation et simulation de la machine à courant continu sous logiciel Matlab» Mémoire DEUA en électrotechnique UMMTO, 2009-2010.

[23].Guy Séguier, Francis Note et, Electrotechnique Industrielle »,Technique et documentation Lavoisier,5^{e}tiragerevu,1987.

[24].K.RAFIL,M.MEZIANI«Etudedelacommandeetdelarégulationd'unmoteuràcouran tcontinu»,Mémoired'ingénieurd'état en Machines électriques, UMMTO,2006.

[25]. [27]. [28]. [33]. [35]. [36]. [37]. [38]. [41]. [42]. [43]. [44]. A .BOUHOUTA (Amélioration des performances par une nouvelle commande mixte Fuzzy-M5P ; univ-Médéa ; 2022

[26]. Approche d'apprentissage efficace utilisant le nouveau modèle combiné flou-M5P

arbre : étude expérimentale des filtres de puissance active

[29] Détection et diagnostic des défauts basés sur l'algorithme d'arbre de décision C4.5 pour les systèmes photovoltaïques connectés au réseau

[30]. [31]. [32]. [34]. [39]. [40]. [HALLOUZE 2023] contribution à l'amélioration de la commande de la machine asynchrone à double alimentation ; thèse de Doctorat ; université Yahia farés de Médea .Algeria.2023