

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa Adrar



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département Génie électrique

Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de Master en
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Commandes électriques

Thème :

Maximisation de puissance d'une éolienne à vitesse variable

Préparé par :

- HANTAOUI ABDELBASSET
- MAKROUDI ABDELKADER

Membres de jury :

Président : Dr. ABDI DJ	MCA	Université D'Adrar
Encadreur : Dr. ARAMA Fatima Zohra	MCA	Université D'Adrar
Examineur : Dr. BACHIRI M	MCB	Université D'Adrar

Année Universitaire : 2022/2023

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي



جامعة أحمد درايعة - أدرار

كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الهندسة الكهربائية

الرقم: / 2023

وثيقة الإذن بالطبع و الإيداع

لمذكرة الماستر

نحن الأستاذ (ة): عرابية عائشة رابرة

الرتبة: M.C.A

وبصفتي مشرفا على :

مذكرة :
Maximisation de puissance d'un
éolienne à vitesse variable

الطالب (ة): حنطاي عبد الباسط

الطالب (ة): مكيو ج.ي. عبد القادر

التخصص: تكيم كهربائي

وبعد قيام (الطالبين) (الطالبتين) بتصحيح كل الملاحظات و التوجيهات المقدمة من طرف لجنة المناقشة ، فلا مانع في أن أذن بطبع المذكرة و تقديمها للجهات المعنية

حرر بتاريخ/..../2023

رئيس القسم



اسم و لقب و توقيع مشرفا

عراية عائشة رابرة
A. RABER

Remerciement

D'abord, nous remercions Allah le tout puissant que m'adonnée la force pour achever ce travail.

En particulier, mon encadreur mon Dr. Fatima Zohra Arama pour avoir accepté d'être rapporteur de cette thèse.

Je remercie Messieurs Dr. BACHIRI M et Dr. ABDI DJ. Pour avoir bien voulu se détache, pour quelque temps, de leurs activités très prenantes afin d'examiner ce travail.

Et tous les autres enseignantats qui m'ont aidé avec leurs cons conseils documentation.

Un grand merci à tous les enseignants de génie électrique.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Enfin, je remercie tous ceux qui m'ont soutenu de près ou de loin à fin finalisé ce projet.

DEDICACE

Sur celui à qui les rangs sont élevés et les voiles lui sont révélés, au premier maître de l'humanité, notre maître Muhammad, que Dieu le bénisse et lui accorde la paix.

A ceux qui m'ont encouragé et soutenu depuis toujours.

Et ceux à qui je dois tant.

A mes chers parents pour leur amour et leur support continu.

Que ce travail soit le témoignage sincère et affectueux de ma profonde reconnaissance pour tout ce qu'ils ont fait pour moi.

A mon frère et mes sœurs.

Notre grande famille. Tout qu'on collaboré de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Que dieu leur accorde santé et prospérité.

ABDELBASSET

DEDICACE

Je dédie ce modeste travail

À l'esprit de ma chère mère, A mon père, A mes frères et sœurs, A toute ma famille,

Et Je dédie ce travail à mon meilleur ami et collègues, Et mes amis partout, Toute la promotion 2023 d'Electrotechnique.

ABDELKADER

Sommaire

Introduction générale.....	1
I.1 Introduction	4
Chapitre I Généralités sur les systèmes éoliens	
I.2 Historique de L'éolien.....	4
I.3 L'Energie éolienne en Algérie	5
I.4 Définition de l'énergie éolienne.....	7
I.5 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	8
I.5.1 Les avantages	8
I.5.2 Inconvénients.....	8
I.6 Les différents types d'une éolienne.....	9
I.6.1 Éolienne à axe vertical	9
I.6.1.1 Avantages	9
I.6.1.2 Inconvénient	10
I.6.2 Les éoliennes à axes horizontal	10
I.6.2.1 Avantages	10
I.6.2.2 Inconvénient	10
I.7 Classement des éoliennes	11
I.7.1 Éolienne fonctionne à vitesse fixe.....	11
I.7.1.1 Les avantages	11
I.7.1.2 Les Inconvénients.....	12
I.8 Fonctionnement a vitesse variable.....	12
I.8.1 Avantage.....	13
I.8.2 Inconvénients.....	13
I.9 Principe de fonctionnement d'une éolienne	13
I.10 Constitution d'une éolienne moderne.....	14
I.11 Zones de fonctionnement de l'éolienne.....	15
I.12 Applications des éoliennes	17
I.13 Conclusion.....	18
Chapitre II Modélisation et commande MPPT de la turbine	
II.1 Introduction	19
II.2 Hypothèses simplificatrices.....	20
II.3 Source primaire : le vent	20
II.4 Le mécanisme de conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique	20
II.4.1 Loi de Betz	20
II.5 Modélisation de la turbine éolienne	23

Sommaire

II.5.1	Modèle aérodynamique de la turbine	24
II.5.1.1	Modèle du vent	24
II.5.2	Modélisation mécanique de la turbine.....	26
II.5.2.1	Modèle du multiplicateur	29
II.6	Stratégies de commande de la turbine éolienne	31
II.6.1	Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance.....	31
II.6.2	Technique d'extraction de maximum de puissance.....	33
II.7	Synthèse du régulateur PI pour le contrôle MPPT	36
II.8	Résultats de simulation.....	37
II.9	Conclusion.....	41

Chapitre III Optimisation de commande MPPT par PSO

III.1	Introduction	42
III.2	Définition de PSO.....	42
III.3	Définitions de Base	43
III.4	Définition de l'Optimisation	44
III.5	Optimisation par Essaim de Particules (PSO).....	44
III.5.1	Origines	44
III.5.2	Principe de la Technique PSO.....	45
III.5.3	Principe de l'Algorithme PSO.....	47
III.5.4	Formulation Mathématique de l'Algorithme PSO	48
III.6	Optimisation du régulateur PI par la méthode PSO de Commande	50
III.7	Algorithme d'optimisation des essais	50
III.8	Avantages et inconvénient de l'algorithme PSO.....	52
III.8.1	Avantages	52
III.8.2	Inconvénients.....	52
III.9	Résultats de simulation.....	52
III.10	Conclusion.....	55

Chapitre IV Commande MPPT par réseaux de neurones

IV.1	Introduction	56
IV.2	Historique	56
IV.3	Définition des réseaux de neurones.....	57
IV.4	type modèle de Réseaux de neurones.....	58
IV.4.1	Un modèle biologique	58
IV.4.2	Le neurone formel	59
IV.5	Modélisation d'un neurone formel	60
IV.6	Fonctions d'activations	61

Sommaire

IV.7	Architecture des réseaux de neurones	63
IV.7.1	Les réseaux de neurone non bouclés	63
IV.7.2	Réseaux de neurones monocouches	63
IV.8	L'apprentissage des réseaux de neurones.....	65
IV.8.1	Types d'apprentissage	65
IV.8.1.1	Apprentissage supervisé	65
IV.8.1.2	Apprentissage non supervisé	67
IV.9	Conception d'un réseau de neurones.....	67
IV.10	Avantages et inconvénients des réseaux de neurones	68
IV.10.1	Avantage des réseaux de neurones	68
IV.10.2	Inconvénients des réseaux de neurones	68
IV.11	Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels.....	68
IV.12	Commande MPPT par réseaux de neurones.....	69
IV.13	Résultats de simulation.....	69
IV.14	Comparison PI,PSO et ANN	72
IV.15	test de robustesse PI,PSO,ANN	75
IV.16	Conclusion.....	77
	Conclusion générale.....	79
	Annexe.....	80
	Bibliographie.....	81

Chapitre I

Fig.I.1: Photographie de deux moulins à vent 5
Fig.I.2: Éolienne en de 100 kw de Grand de vent. 6
Fig.I.3: Éolienne d'Adrar..... 7
Fig.I.4: Conversion de l'énergie cinétique du vent 8
Fig.I.5: éoliennes à axe verticale, 9
Fig.I.6: Éoliennes à axe horizontale. 10
Fig.I.7: Eolienne à vitesse fixe. 11
Fig.I.8: Eolienne fonctionnant à vitesse variable asynchrone à double alimentation 12
Fig.I.9: Principe de fonctionnement d'une éolienne..... 14
Fig.I.10: différentes parties de l'éolienne 14
Fig.I.11: Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent 16
Fig.I.12: Limitation de puissance éolienne.....17

Chapitre II

Fig. II.1: Chaîne de conversion d'énergie éolienne débitant sur une charge.....19
Fig. II.2 : Principaux organes du système de conversion éolien.....19
Fig.II.3 : Tube de courant autour d'une éolienne.....22
Fig.II.4 : Coefficient de puissance.....23
Fig.II.5 : Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des pales.....23
Fig.II.6 : Schéma de la turbine éolienne.....24
Fig.II.7 : Modèle aérodynamique de la turbine éolienne.....26
Fig.II.8 : Système mécanique de l'éolienne.....27
Fig.II.9 : Modèle mécanique de la turbine éolienne.....29
Fig.II.10 : Schéma bloc de modèle de la turbine.....31
Fig.II.11 : Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance.....31
Fig.II.12 : Stratégies de commande de la turbine.....33
Fig.II.13 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse.....33
Fig.II.14 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse.....36
Fig.II.15 : Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation.....36
Fig.II.16 : Schéma bloc simulation la vitesse du vent.....38
Fig.II.17 : Profile de la vitesse du vent.....38
Fig. II. 18 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.....39
Fig. II. 19 : coefficient de puissance.....39
Fig. II. 20 : erreur Couple en de Electromagnétique.....39
Fig. II. 21 : la vitesse mécanique.....40

Liste de figures

Fig. II. 22 : la vitesse Ratio	40
Fig. II.23 : Test de robustesse vis-à-vis une variation de +50 % du moment d'inertie.....	41

Chapitre III

Fig. III.1 : le mouvement des Particules dans PSO.....	43
Fig. III.2 : Groupe de : (a) oiseaux, (b) poissons.....	45
Fig. III.3 : Déplacement d'une particule	46
Fig. III.4 : Exemple de voisinage géographique.....	46
Fig. III.5 : Deux cas de voisinage social.....	47
Fig. III.6 : Schéma du déplacement d'une particule.....	49
Fig. III.7 : Stratégie de confinement de vitesse.....	50
Fig. III.8 : la vitesse Ratio.....	52
Fig. II. 9 : coefficient de puissance.....	53
Fig. II. 10 : la vitesse mécanique.....	53
Fig. IV.11 : l'erreur de couple.....	54
Fig. III.12 : Test de robustesse.....	54

Chapitre IV

Fig. IV.1 : Structure d'un réseau de neurone biologique et le cerveau humain.....	58
Fig. IV.2 : Un modèle biologique.....	59
Fig. IV.3 : Modèle d'un neurone artificiel.....	60
Fig. IV.4 : Schéma d'un réseau de neurones monocouche.....	63
Fig. IV.5 : Schéma d'un réseau de neurones non bouclé (Perceptron multicouches).....	64
Fig. IV.6 : Schéma de réseau de neurones bouclé.....	65
Fig. IV.7 : Schéma bloc de l'apprentissage supervisé.....	66
Fig. IV.8 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique et block réseaux de neurale.....	70
Fig. IV.9 : L'architecture du réseau de neurone proposé.....	70
Fig. IV.10 : la vitesse Ratio.....	71
Fig. IV.11 : coefficient de puissance ANN.....	71
Fig. IV.12 : la vitesse mécanique.....	71
Fig. IV.13 : l'erreur de couple.....	71

Liste de figures

Fig. IV.14 : Test de robustesse ANN.....	72
Fig IV. 15 : vitesse mécanique PI,PSO et ANN.....	73
Fig IV. 16 : l'erreur de couple électromagnétique PI,PSO et ANN.....	73
Fig IV. 17 : coefficient de puissance PI,PSO et ANN.....	74
Fig IV. 18 : la vitesse Ratio PI, PSO et ANN.....	74
Fig IV. 19 : Test de robustesse vitesse méc contre une variation de +50% du moment d'inertie PI,PSO et ANN.....	75
Fig IV. 20 : Test de robustesse erreur de couple contre une variation de +50% du moment d'inertie PI,PSO et ANN.....	76
Fig IV. 21 : Test de robustesse CP contre une variation de +50% du moment d'inertie PI,PSO et ANN.....	76
Fig IV. 22 : Test de robustesse vitesse de ratio contre une variation de +50% du moment d'inertie PI,PSO et ANN.....	77

Liste des tableaux

TAb.III.1 : Paramètres du PI.....	52
TAb.III.2 : Paramètres program PSO.....	53
TAb.III.3 Les plages de variations des trois paramètres sont données.....	53
TAb. IV.1 : Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel.....	61
TAB. IV 2 : Différentes fonctions d'activations utilisées dans les RNA.....	62
TAb. Annexe A. 1 : Paramètres de la turbine.....	81

Nomenclature

MPPT: Maximum Power Point Cracking.

RNA : Réseaux de Neurones Artificiels.

SCEVV : Système de conversion éolien a vitesse variable.

SCEVF : Système de conversion éolien a vitesse Fixe.

PSO : la méthode MPPT perturbation et observation.

MAS : Machine asynchrone.

MADA : Génératrice Asynchrone à Double Alimentation.

MS: Machine Synchrone.

PI : Proportionnel Intégral.

G : Gain du multiplicateur.

M : Masse d'air traversant le rotor éolien.

P_{mt} : Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé.

C_p : Coefficient de puissance de l'éolienne.

ρ : Densité volumique de l'air 1.22

kgm

S : Surface balayée par le rotor de l'éolienne

m

R : rayon de la turbine

m

λ : rapport de vitesse de la turbine

β : Angle de calage des pales d'une éolienne

°

P_{mec} : Puissance mécanique disponible sur l'arbre de la génératrice

W

Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine

rd/s

λ_{opt} : Valeur optimale de λ

$C_{aéro}$: Couple aéro turbine éolien

N.m

J : inertie de la turbine

kg. m

f : coefficient des frottements

N.m/s

$C_{ém}$: Couple électromagnétique

N.m

Liste des symboles

Liste non-exhaustive des principaux paramètres et variables.

• Symboles spécifiques à la turbine :

V (m/s) Vitesse du vent.

M (Kg) Masse de l'air.

P_t (W) Puissance aérodynamique de la turbine.

P_g (W) Puissance mécanique de la génératrice.

P_v (W) Puissance théorique maximale extractible d'un vent non perturbé.

J (Kg.m²) Moment d'inertie totale de l'ensemble « turbine + génératrice ».



Introduction générale

Introduction générale

L'électricité est devenue de plus en plus primordiale pour l'humanité. En effet, l'accès à l'électricité, est la garantie de meilleures conditions de vie (hygiène, santé, éducation,... etc.) et un facteur essentiel pour un développement économique. L'industrialisation très forte des dernières décennies et la prolifération des appareils domestiques électriques (chauffage, climatisation, lavage, médicale, informatique,... etc.) ont mené à des besoins planétaires immenses en énergie électrique. Aujourd'hui, plus de 2 milliards d'êtres humains n'ont pas l'accès à l'électricité pour cause d'économie fragile, d'infrastructures lourdes et coûteuses, de zones difficiles d'accès et d'habitat dispersé.

Face à cela et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes (pétrole, gaz et charbon), plusieurs pays se sont tournés vers les énergies renouvelables [1].

C'est ainsi que les pays industrialisés se sont lancés dans le développement et l'utilisation des sources d'énergies renouvelables comme le solaire, l'éolien, la biomasse, la géothermie, l'hydraulique,... Parmi ces sources d'énergie, l'éolienne représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'amortissement de la demande de plus en plus galopante [2].

Plusieurs pays se sont, aujourd'hui résolument tournés vers l'énergie éolienne. Grandes centrales éoliennes fournissent de l'électricité dans certaines parties du monde, à un prix concurrentiel à celui de l'énergie produite par les installations conventionnelles tel que les centrales nucléaires et les centrales thermiques.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en Génie Electrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Les éoliennes de dernière génération fonctionnent à vitesse variable. Ce type de fonctionnement permet d'augmenter le rendement énergétique, de baisser les charges mécaniques et d'améliorer la qualité de l'énergie électrique produite. Par rapport aux éoliennes à vitesse fixe ce sont les algorithmes de commande qui permettent de contrôler le coefficient de puissance produite par l'éolienne à chaque instant [1].

L'objectif de notre étude est la simulation d'un système éolien basé à vitesse variable. Pour cela nous procédons à la modélisation de système de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine et utilisé la Technique de maximisation de puissance

MPPT. Puis nous procédons à la mise en place de Stratégies de commande permettant le fonctionnement en turbine en contrôlant couple de référence optimal pour obtenir le point maximum pour faire fonctionner la turbine dans des conditions optimales et tirer le meilleur parti de l'énergie éolienne.

La présentation de ce travail est organisée en quatre chapitres détaillés comme suit :

Le premier chapitre donne une description des différentes structures des systèmes éoliens en citant les avantages et les inconvénients pour chaque structure pour en terminer par choisir la structure qui sera étudiées.

Le second chapitre est consacré à la modélisation de la turbine à travers les équations et les concepts physiques régissant son fonctionnement. Afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance électrique générée, nous étudions des différentes stratégies Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) tel que le contrôle par et sans asservissement de la vitesse mécanique et on a d'appliquer la commande MPPT avec asservissement de vitesse par le régulateur classique PI sur notre turbine.

Le troisième chapitre sera consacré à l'utiliserons la technologie de control de turbine l'algorithme PSO pour obtenir de meilleurs résultats en coefficient de puissance et rendement de turbine.

Le dernier chapitre sera consacré au développement d'une technique basée sur les Réseaux Neurones Artificiels (RNA) pour améliorer les performances de la commande MPPT. Cette méthode consiste à remplacer le régulateur classique par un contrôleur neuronal. Donc, stratégies intelligentes de contrôle seront présentées et évaluées par des résultats de simulation.

Ce mémoire s'achèvera par une conclusion générale.



Chapitre I

Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction

Depuis que l'homme a découvert les énergies renouvelables, il s'est efforcé de les développer, ainsi l'énergie éolienne a fait partie des énergies qu'il a cherché à développer, à commencer par l'utilisation des éoliennes, en utilisant la technologie de détection du vent pour la développer. Au début des années 1940, apparaissent de véritables prototypes d'éoliennes à pales qui sont utilisées avec succès pour produire de l'électricité, intégrant plusieurs technologies qui l'aident à capter l'énergie éolienne (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et des structures de capteurs de plus en plus performantes. Outre les fonctionnalités Mécaniquement pour les éoliennes, la conversion efficace de l'énergie mécanique en énergie L'électricité très importante et basique qui va avec la nature [5].

L'objectif principal des systèmes éoliens est de transformer une partie de la L'énergie cinétique du vent en énergie électrique. L'énergie éolienne, non polluante et sans ambiguïté permet de répondre à ses besoins énergétiques. L'électricité produite par les éoliennes est utilisée pour recharger les batteries des circuits, les systèmes de production d'énergie résidentiels, les réseaux distribués et les grands réseaux publics. Les différents composants d'une éolienne sont conçus pour maximiser cette conversion d'énergie et permettre un maximum d'extraction d'énergie et d'étude Différents systèmes sont possibles [6].

Dans ce chapitre, nous passerons en revue certaines des bases de l'énergie éolienne, en partant de ses types jusqu'à une description générale des avantages et des inconvénients des différents types d'éoliennes, des différents détails de la composition des éoliennes et des différents composants de la chaîne de production de cette énergie.

I.2 Historique de L'éolien

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie que l'homme utilise pour répondre à ses besoins en électricité. Il a été utilisé pour propulser des navires, puis pour des moulins à grains. La première utilisation connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 av. Les Babyloniens avaient alors imaginé tout un projet pour irriguer la Mésopotamie en profitant de l'énergie éolienne et en l'incorporant à leurs besoins quotidiens.

La crise pétrolière de 1973 a alerté les pays producteurs d'énergie non fossile sur la nécessité de développer et d'exploiter pleinement l'énergie éolienne. En 2006, l'Algérie décide de se doter de la technologie éolienne en créant son premier parc éolien à Tindouf. La puissance de 50 MW 2015 couvre 5% des besoins de l'Algérie [7].

Depuis l'Antiquité, les "moulins à vent" convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique, généralement utilisée pour moudre le grain (Fig. I.1). Aujourd'hui, les éoliennes se

trouvent encore en combinaison avec des pompes à eau et plus encore, et sont souvent utilisées pour irriguer les zones sèches et éloignées, drainer les zones humides ou élever du bétail. L'arrivée de l'électricité donne à Paul la Cour l'idée en 1891 de combiner une éolienne avec un générateur. Ainsi, l'énergie du vent peut être « redécouverte » et réutilisée (dans les années 1940 au Danemark, 1 300 éoliennes). Au début du siècle dernier, les éoliennes sont apparues massivement (6 millions de pièces fabriquées) aux États-Unis, car elles étaient le seul moyen d'obtenir de l'électricité dans la campagne isolée et ses avantages. Dans les années 1960, il y avait environ un million d'éoliennes en fonctionnement dans le monde. Cette technologie a été quelque peu délaissée par la suite, et les études et expérimentations sur les éoliennes n'ont été lancées qu'après la crise pétrolière de 1974.



Fig.I.1: Photographie de deux moulins à vent [8].

I.3 L'Énergie éolienne en Algérie

En Algérie, la première tentative de raccordement des éoliennes au réseau de distribution d'électricité remonte à 1957, avec l'installation d'une éolienne de 100 kW sur le site du Grand Vent (Alger). Conçu par l'ingénieur français andreau, ce prototype a été initialement installé à st-Alban en Angleterre. Ce type d'antenne bipale, à pas variable, de 30 mètres de haut et 25 mètres de diamètre (Fig.I.2) a été acheté par la Société algérienne d'électricité et de gaz puis démonté et installé en Algérie.



Fig.I.2: Eolienne en de 100 kw de Grand de vent[9].

Par la suite, de nombreuses autres éoliennes, de plus petites capacités, ont été installées à différents endroits à plusieurs fins, notamment pour alimenter des sites isolés ou difficiles d'accès tels que des installations de relais de télécommunications et autres. Cependant, comme la technologie éolienne n'est pas encore suffisamment développée et mature, ces expériences n'ont pas toujours été concluantes. Il convient de noter que cette théorie est également vraie même au niveau international. Mais après le premier choc pétrolier, des expériences et plusieurs investissements importants ont été réalisés dans la recherche et le développement d'éoliennes. L'utilisation de l'énergie éolienne pour produire de l'électricité a ensuite largement chuté, notamment depuis la fin des années 1980. Les éoliennes d'aujourd'hui sont de plus en plus fiables, plus efficaces, de plus en plus grosses et supérieures. Ainsi, le plus grand ventilateur avait une capacité de 50 kW et un diamètre de 15 mètres en 1989, en 2014 il avait une puissance de 8 MW et un diamètre de 164 mètres (VESTAS Offshore). La hauteur du mât a été augmentée en conséquence, atteignant dans certaines installations plus de 150 mètres, ce qui est considéré comme très fin. De plus, les grandes éoliennes sont généralement développées et installées dans des zones assez venteuses. Cependant, du fait de la saturation des terrains exploitables, ces dernières années ont vu le développement des éoliennes Löw. Pour cette classe d'éoliennes à grande hauteur de mât, les pales sont des générateurs électriques grands et petits. La capacité éolienne totale installée dans le monde, qui était d'environ 6 GW en 1996, est passée à 336 GW en juin 2014 [9].

En Algérie, le premier parc éolien d'une capacité de 10 MW a été construit à Adrar et mis en service en juin 2014, le premier de son histoire. L'énergie électrique fournie par ce parc est injectée dans le réseau local et le taux de pénétration de l'éolien représentera environ 5 %. Ainsi, la capacité éolienne totale installée en Algérie est actuellement insignifiante. Cependant, le ministère de l'Énergie et des Minéraux, dans son nouveau programme pour les énergies renouvelables, a prévu d'installer davantage de parcs éoliens d'une capacité totale de 1 000 MW à moyen terme (2015-2020) pour atteindre 5 010 MW d'ici 2030. Il devrait être noté que ce

nouveau programme vise à la fois les installations raccordées au réseau électrique et les petites éoliennes d'importance, c'est-à-dire les petites éoliennes destinées à pomper de l'eau ou à fournir de l'électricité à des endroits isolés, similaires à des développements partout dans le monde où les installations de petites éoliennes ont augmenté ces dernières années. En effet, fin 2012, le nombre de telles éoliennes atteignait 806 000, soit environ 35 % de l'ensemble des éoliennes installées. Les petites éoliennes d'aujourd'hui sont pour la plupart des machines à axe horizontal à trois pales de la première forme, équipées de générateurs à aimants permanents et d'une direction négative. Mais il existe aussi des éoliennes à axe vertical (2 à 5% des petites éoliennes sont installées). Ceux-ci conviennent le mieux aux installations urbaines où la vitesse du vent est faible et la turbulence élevée Fig.I.3 [9].



Fig.I.3: Éolienne d'Adrar[9].

I.4 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Fig.I.4. [10].

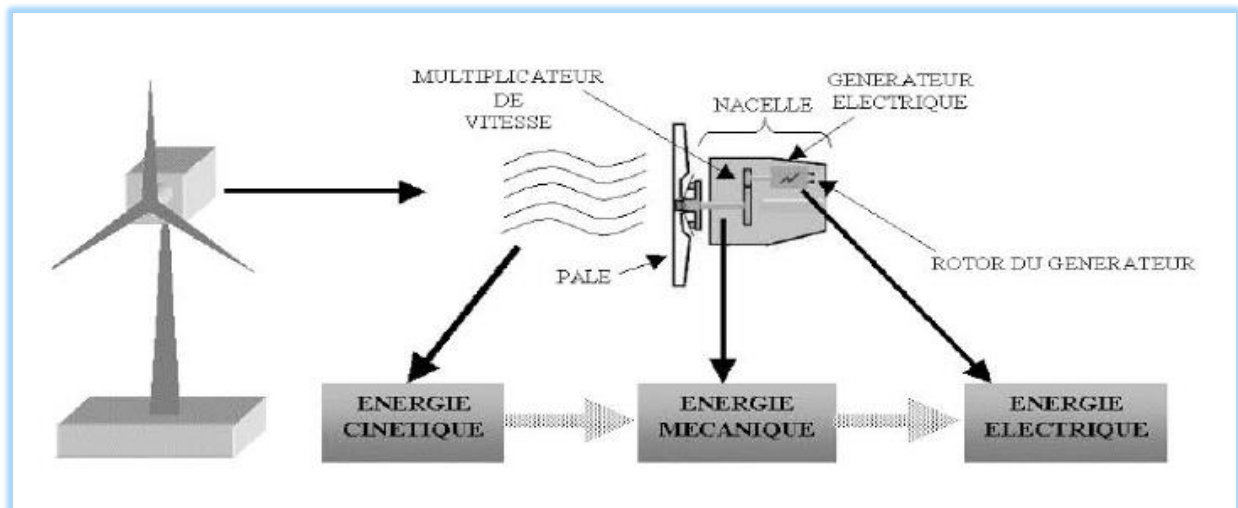


Fig.I.4:Conversion de l'énergie cinétique du vent[10].

I.5 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

I.5.1 Les avantages

- l'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement Radical du climat par la production énorme et directe du Co2 [10].
- La méthode d'utilisation n'est pas chère.
- On le trouve partout dans le monde.
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de Déchets radio actifs contrairement à l'énergie nucléaire.
- Le mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel Moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux Modes de fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et Nucléaires.

I.5.2 Inconvénients

- L'énergie qui ne peut pas être stockée.
 - La façon de mettre en place la station est très coûteuse.
 - Les excellents sites sont pour la plupart éloignés, ce qui rend le transport difficile
- L'énergie éolienne peut être utilisée de deux façons directe et indirecte.

Direct : Conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un Véhicule (navire à voiles ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de Majorque, Éoliennes de pompage pour abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un Moulin.

Indirect : Transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un Générateur électrique pour fabriquer un courant continu ou alternatif, le générateur est Relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un Générateur d'appoint par exemple un groupe électrogène) ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie [11].

I.6 Les différents types d'une éolienne

Il y a 2 types des éoliennes :

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. On peut Diviser les éoliennes en deux grandes familles [12].

I.6.1 Éolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Plusieurs variables technologiques ont été testées, notamment deux et des connexions avec le stade de fabrication, le rond-point de Savonius et le rond-point Darrieux (fig. I.5) à ce jour, ce type d'éoliennes est quelque peu marginal et son utilisation est beaucoup plus faible. Ils ont des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer Suivez.

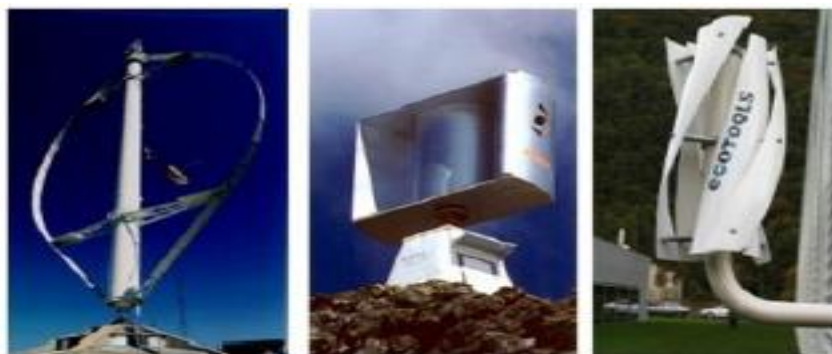


Fig. 5: éoliennes à axe verticale, [13].

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins Rependue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme Suit [13] [14].

I.6.1.1 Avantages

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les Appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que Soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.

- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

I.6.1.2 Inconvénient

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche Du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des Pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

I.6.2 Les éoliennes à axes horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs Avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face Ou sous le vent figure(I.6). Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation [15].



Fig.I.6: Éoliennes à axe horizontale [13].

I.6.2.1 Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du Sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, Il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

I.6.2.2 Inconvénient

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident. Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les Structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolés. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [13].

I.7 Classement des éoliennes

I.7.1 Éolienne fonctionne à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières qui ont été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, donc sa vitesse est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice utilisée. Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un Réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (Pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au Travers d'un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1% Fig. I.7. [16].

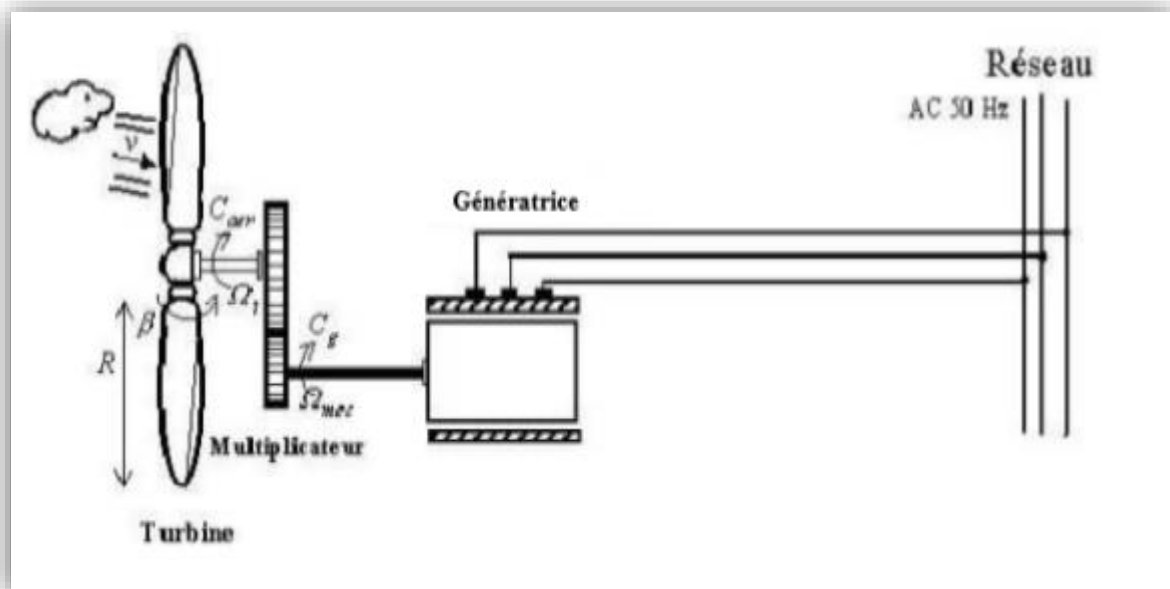


Fig.I.7:Éolienne à vitesse fixe[16].

I.7.1.1 Les avantages

- système électrique plus simple.
- plus fiable.
- pas besoin de système électronique.

I.7.1.2 Les inconvénients

- L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- Difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau.

I.8 Fonctionnement a vitesse variable

En général, plusieurs stratégies sont utilisées dans ces systèmes, pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable. Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent. En vitesse variable, on régule le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Training. La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne.

La vitesse mécanique de la turbine et la fréquence de la charge sont découplées. Pour obtenir ce découplage Dans ces systèmes, on utilise une interface d'électronique de puissance. De cette manière la turbine tourne à vitesse variable, ajustée de manière optimale à tout instant à la vitesse du vent. Ils ont une majeure efficacité car ils parviennent à maximiser la capture d'énergie du vent disponible. Fig.I.8.

Constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs Capacités de réglage [16].

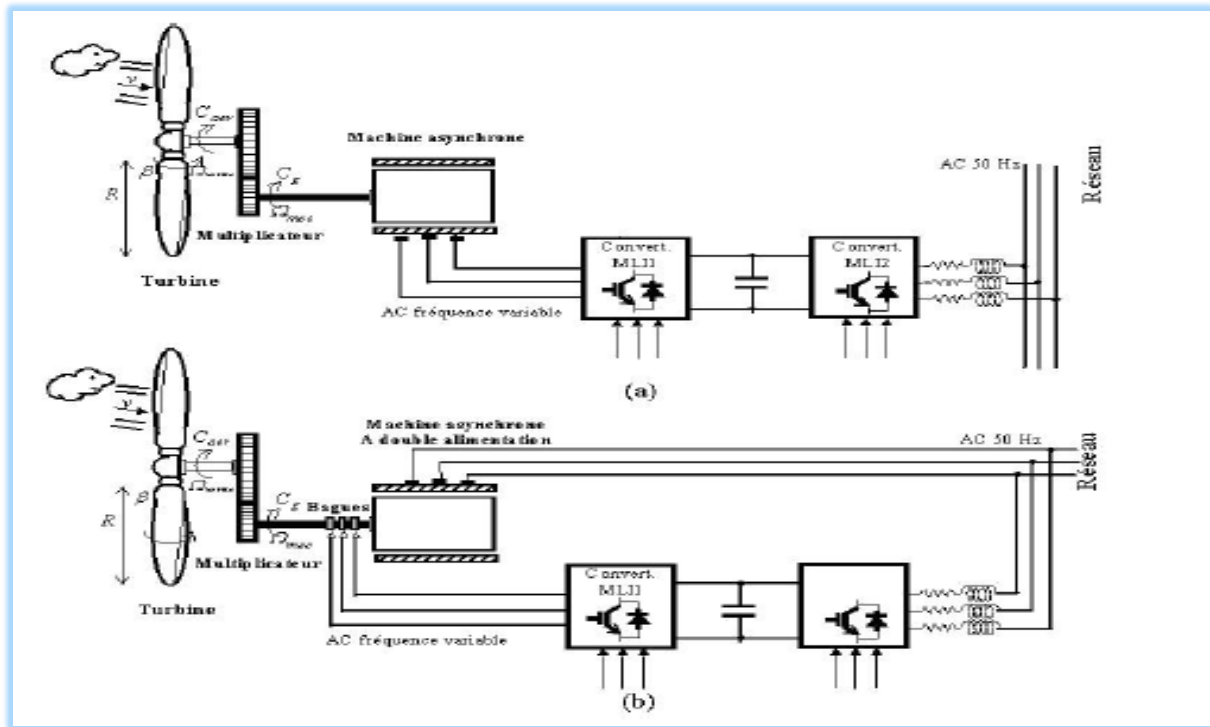


Fig.I 8: Eolienne fonctionnant à vitesse variable asynchrone à double alimentation et machines asynchrone .

I.8.1 Avantage

- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Ce type de machines offre une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.

I.8.2 Inconvénients

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants.
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.

I.9 Principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice. La fig. (I.9) suivante le montre.

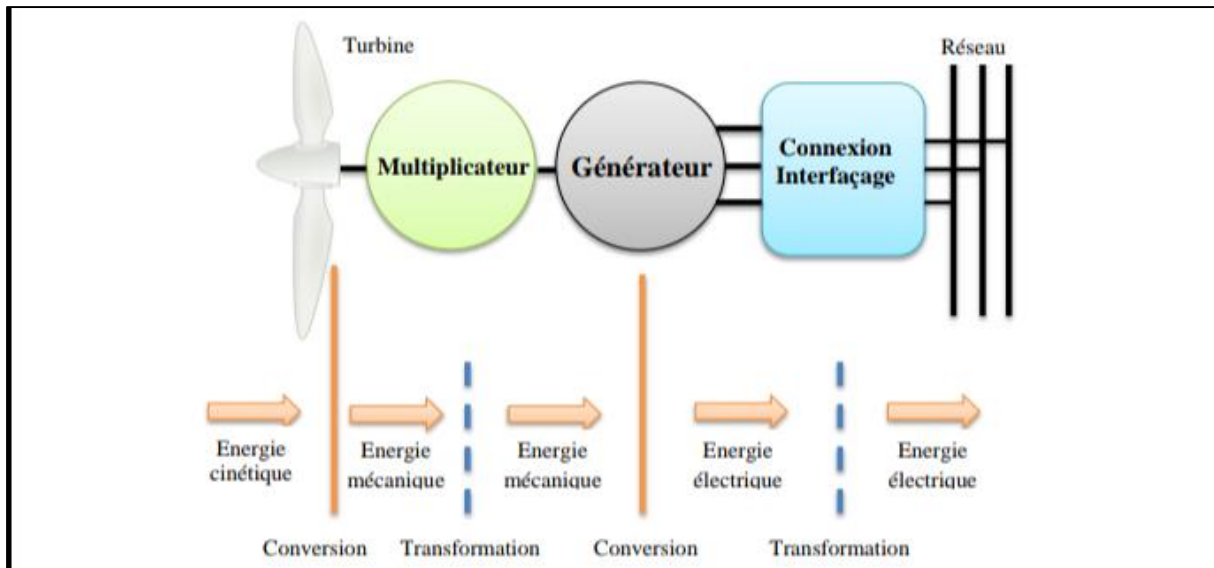


Fig.I.9 : Principe de fonctionnement d'une éolienne.

I.10 Constitution d'une éolienne moderne(axe horizontal)

La Fig.(I.10). Représente une chaîne électromécanique a multiplicateur de vitesse d'une Éolienne moderne tripale à axe horizontal [17].

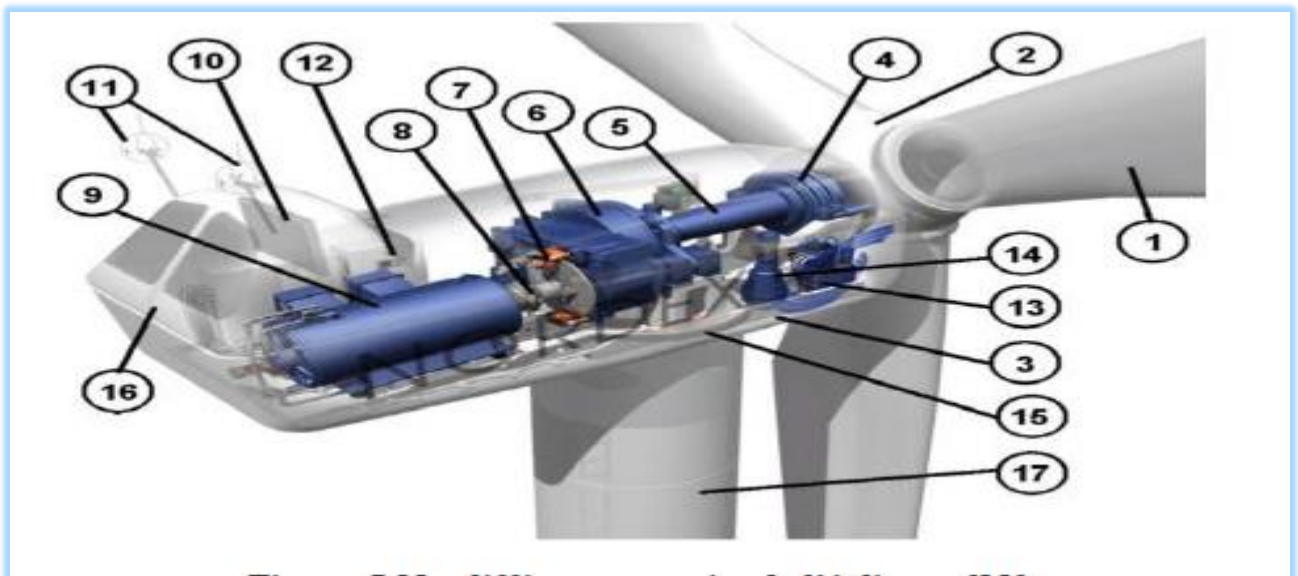


Fig.I.10 : différentes parties de l'éolienne.

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) Sur lequel sont fixées les pales (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pales Pour obtenir un excellent résultat.

La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de

contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (5) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16).

Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les Données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou L'arrêter selon la vitesse du vent. Mais les multiplicateurs mécaniques ont leurs inconvénients, ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances. C'est la raison pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone (rotor bobiné ou aimants) à très grand nombre de pôles et donc à fort couple massique [17].

1- Pales	2- Moyeu rotor	3- Nacelle	4- Cardan	5- Transmission
6- Multiplicateur de vitesse	7- Frein à disque	8- Accouplement	9- Génératrice	10- Radiateur de refroidissement
11- Centrale de mesures du vent	12- Contrôle	13-Centrale hydraulique	14 -Mécanisme d'orientation face au vent	15-Paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque
16- Capot	17- Tour			

I.11 Zones de fonctionnement de l'éolienne

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une Turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de Fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent Fig.I.11.

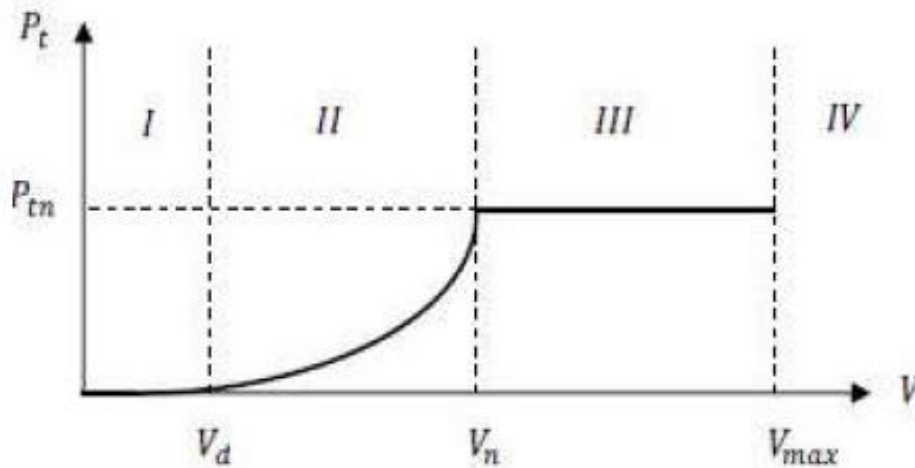


Fig.I.11 : Puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [17].

La puissance éolienne extraite s'exprime par :

$$P_t = \frac{1}{2} C_p \rho S V^3 \quad (\text{I.1})$$

La relation (I.1) indique que la puissance éolienne captée est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.

V_d : Est la vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine suivant le constructeur.

V_d : Varie entre comme valeur approximative 2,5m/s et 4m/s pour les éolienne de forte puissance
 V_m : Est la vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance Nominale. De la génératrice suivant les constructeurs, varie entre comme valeur approximative 11,5m/s et 15m/s en Fonction des technologies.

V_m : La vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V_m vaut Comme valeur approximative 25m/s.

Les vitesses V_d , V_n et V_m définissent quatre zones de fonctionnement sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent (Fig.I.11).

Zone I : $V < V_d$ la vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie à Capter est trop faible.

Zone II : $V_d < V < V_n$: Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone Correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : $V_n < V < V_m$: La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine (P_n) Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent. La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch » : elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW). Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure. La seconde technique est passive « stall ». Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées. La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue Fig.I.12 [18].

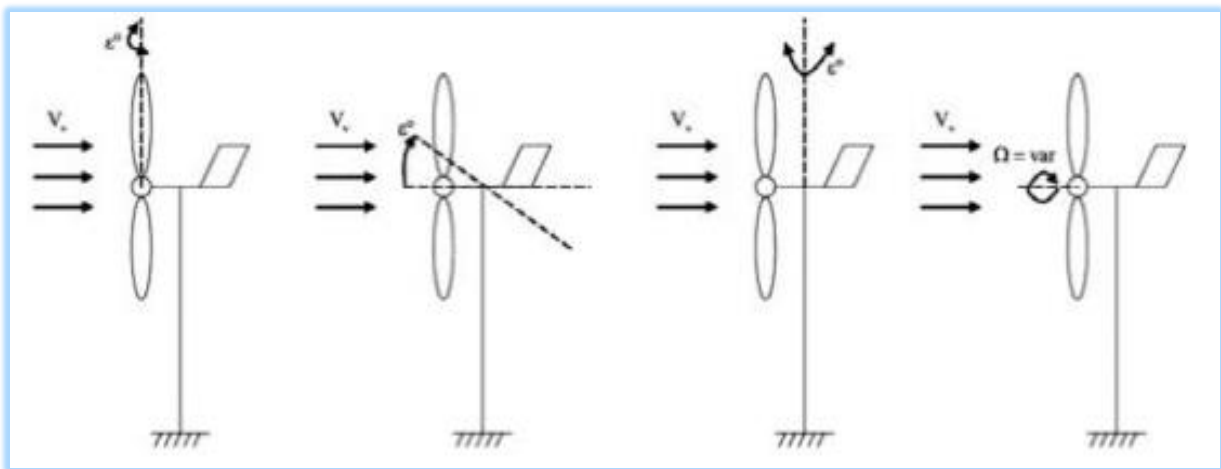


Fig.I.12: Limitation de puissance éolienne, a) pitch, b) déviation verticale de l'axe De Rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse continuent Variable [18].

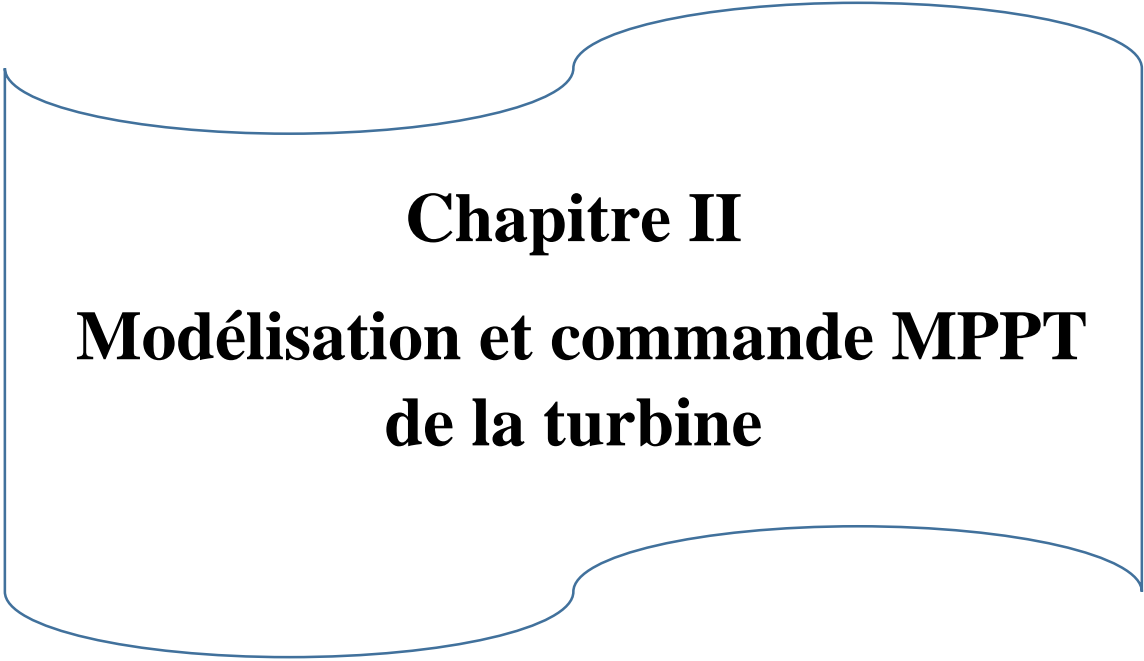
I.12 Applications des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes.

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

I.13 Conclusion

Ce chapitre représente une généralité sur les éoliennes d'une façon générale, nous avons commencé par définir les éoliennes, ensuite nous avons représenté les types des éoliennes. Le dispositif basé sur la machine asynchrone à double alimentation présente un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'il autorise et la taille du convertisseur par rapport à la puissance nominale de la machine. Cette structure sera étudiée dans le chapitre suivant. Il permet également de couvrir un large champ d'application.



Chapitre II
Modélisation et commande MPPT
de la turbine

II.1 Introduction

La turbine assure une transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui permet de faire tourner le rotor de la génératrice et cette dernière est la composante qui assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. La modélisation de la turbine est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet de comprendre le comportement dynamique. Dans ce chapitre nous allons procéder à la modélisation des différents constituants de la turbine. La fig. II 1 nous montre les étapes les plus importantes du transfert d'énergie dans système de conversion d'énergie éolienne [19].

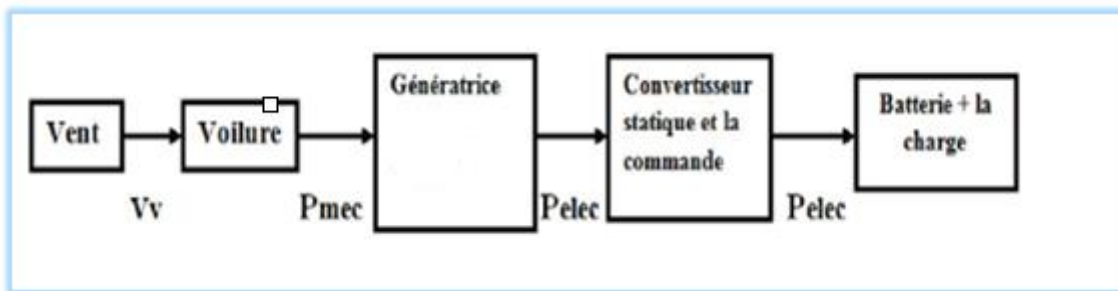


Fig.II.1 : Chaîne de conversion d'énergie éolienne débitant sur une charge[20].

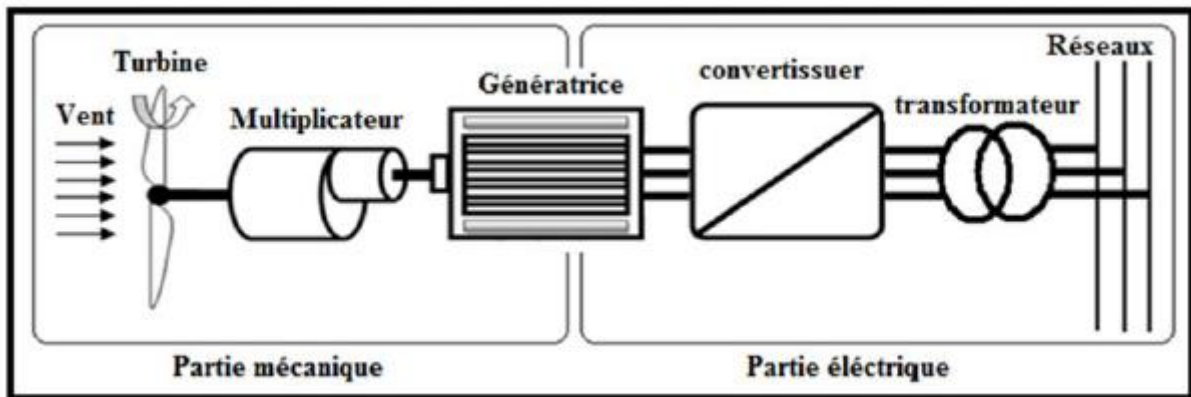


Fig.II.2 : Principaux organes du système de conversion éolien.

La partie mécanique de la turbine est composée par des pales orientables, un réducteur de vitesse et une transmission de puissance. La partie électrique est composée par un générateur, la chaîne de convertisseurs électronique de puissance avec son bus continu et son filtre de sortie Fig.II.2 [19].

Dans notre travaille on s'intéresse par la partie mécanique.

II.2 Hypothèses simplificatrices

Pour l'étude de la turbine ou génératrice asynchrone idéalisée, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [19] :

Pour l'étude de la turbine, on introduit les hypothèses simplificatrices suivantes [2] :

- Les pales sont considérées à conception identique avec les mêmes paramètres d'inertie, d'élasticité et de frottement.
- Les coefficients de frottements des pales par rapport à l'air et par rapport au support sont très faibles et peuvent être ignorés.
- La vitesse de vent est supposée à répartition uniforme sur toutes les pales

II.3 Source primaire : le vent

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs, son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs.

Ces phénomènes modélisables correspondent à la partie déterministe de la variation spatiale du champ de vitesses. Les turbulences provoquées par les obstacles en amont (bâtiments, arbres, autre éoliennes, ...) correspondent à la partie stochastique de la variation spatiale du champ de vitesses [13].

II.4 Le mécanisme de conversion de l'énergie éolienne en énergie mécanique

II.4.1 Loi de Betz

La théorie de Betz permet d'expliquer simplement le processus d'extraction de l'énergie cinétique contenue dans le vent, elle aboutit à l'expression de la puissance de l'éolienne P_t [21] :

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

Avec : C_p : coefficient de puissance.

S: la surface balayée par la turbine (m).

V : la vitesse du vent (m/s).

La théorie de Betz permet d'expliquer (eq) 2 :

$$V_m = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II. 2})$$

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure (II.3) sur lequel On représente la vitesse du vent V_1 en amont de l'éolienne et la vitesse V_2 en amont en supposant que la vitesse du vent passant devant le rotor est égale en moyenne entre la vitesse de Vent non turbulent devant l'éolienne V_1 et vitesse du vent après avoir traversé le rotor V_2 , c'est-à-dire génération $\frac{V_1+V_2}{2}$.

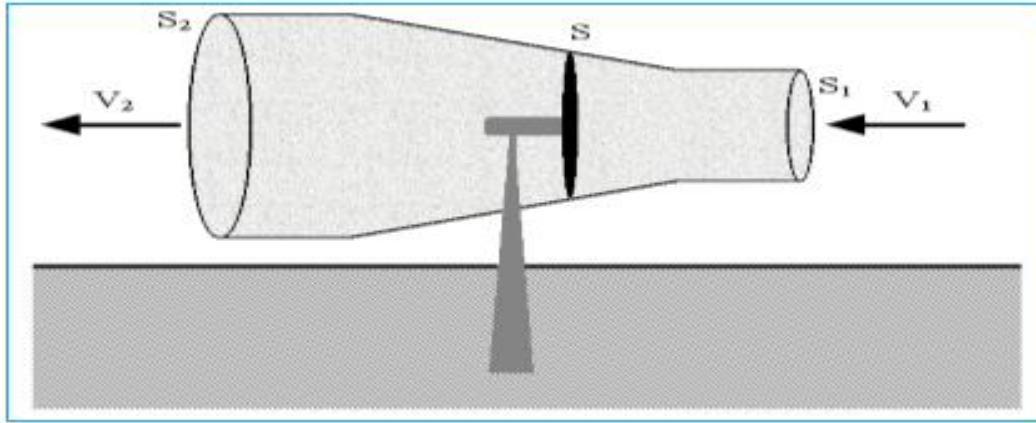


Fig.II.3 : Tube de courant autour d'une éolienne.

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

$$m = \frac{\rho \cdot S(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{II. 3})$$

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

$$P_t = \frac{1}{2} m (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.4})$$

Soit en remplaçant m par son expression donc :

$$P_t = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II. 5})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé est appelé le coefficient de puissance C_p , est exprimé par :

$$P_v = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{II. 6})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé est exprimé par :

$$C_p = \frac{P_T}{P_V} = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{V_2^2}{V_1^2} \right) \left(1 + \frac{V_2}{V_1} \right) \quad (\text{II. 7})$$

La valeur de ce coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ et angulé β comme suit :

$$C_p = C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{II. 8})$$

$$C_p = \frac{P_t}{P_v} \quad (\text{II. 9})$$

Avec $C_p < 1$

$$P_t = C_p P_v \quad (\text{II.10})$$

On peut écrire donc

$$P_t = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II. 11})$$

En remplaçant P_v par son expression dans (II.10.), on obtient :

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{R_t \Omega_t}{V} \quad (\text{II. 12})$$

Avec : Ω_t : la vitesse de rotation des pales (*rad / s*).

R_t : Le rayon de la surface balayée par la turbine (m).

V : la vitesse du vent (m/s).

Grâce à la loi de Betz, il a conclu que L'énergie maximale extractible du vent est de 0,59 de l'énergie totale contenue dans le vent les vents. Comme le montre le dessin ci-dessous (Figure. II.4).

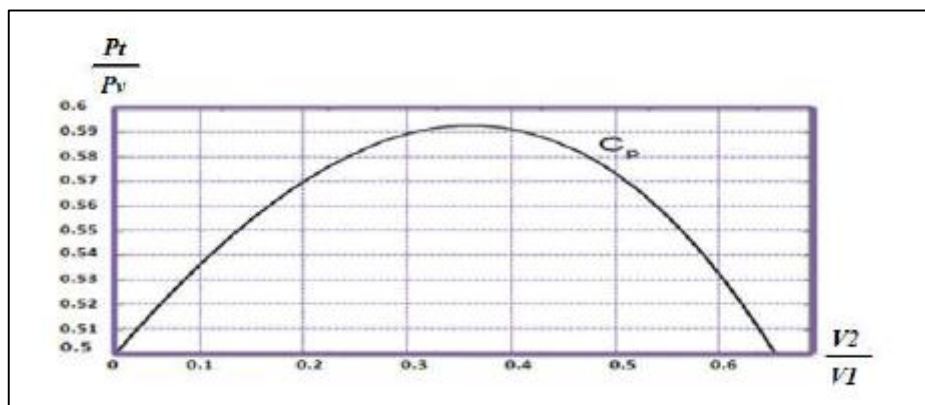


Fig.II.4 : Coefficient de puissance [21].

La figure (II.5) montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal pour différents types d'éoliennes [19]. On remarque que chaque type d'éoliennes correspond à une vitesse spécifique λ , qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe. Plus la caractéristique $C_p(\lambda)$ sera en cloche, plus il sera

bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale.

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40) afin d'augmenter leur vitesse, leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance (Fig.II.5) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût et les excellentes caractéristiques d'une l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Fig. II.5) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s [19].

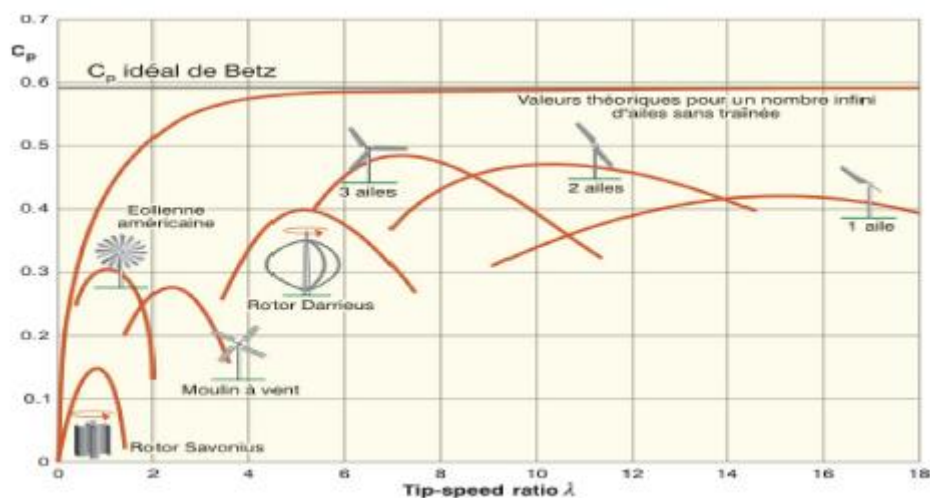


Fig.II.5 : Coefficient de puissance aérodynamique en fonction de λ et de l'angle de pas des pales [19].

II.5 Modélisation de la turbine éolienne

Le modèle de la turbine éolienne doit représenter l'ensemble des éléments du système Aérogénérateur éolien. Les éoliennes installées sont généralement constituées de trois pales qui pivotent sur leur axe d'un angle β , contrôlé par un système électromagnétique.

La (fig. II.6) 6montre le dispositif présenté ici est une turbine éolienne, constituée de trois pales orientables de longueur R. Elles sont montées sur un arbre moteur tournant à une vitesse Ω une turbine fiable à un multiplicateur de gain G. Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique [21].

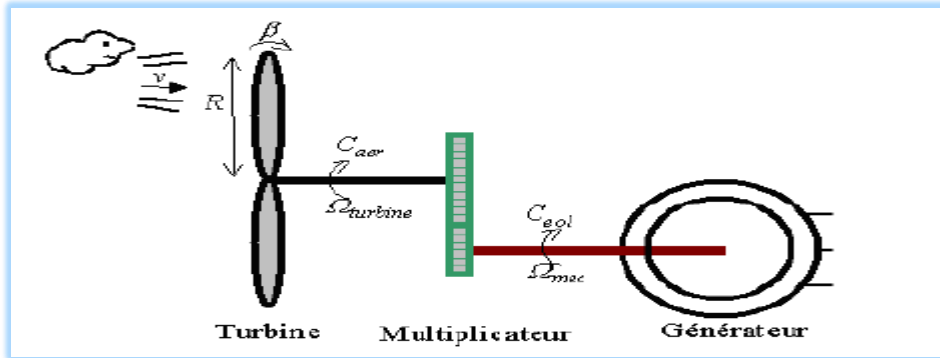


Fig.II.6 : Schéma de la turbine éolienne [22].

II.5.1 Modèle aérodynamique de la turbine

II.5.1.1 Modèle du vent

La ressource éolienne est une ressource importante dans la production d'énergie éolienne, sa répartition est essentielle dans un projet éolien et est donc cruciale pour le calcul de la production d'électricité et de sa rentabilité. Les propriétés dynamiques du vent sont essentielles pour étudier l'ensemble du système de conversion d'énergie car, dans des conditions optimales, l'énergie éolienne est le cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Cependant, la direction de vecteur vitesse du vent dans l'axe vertical n'a pas d'importance du point de vue de l'éolienne car elle ne peut pas être vue à travers sa surface active. Pour simplifier, la direction de la vitesse évolue dans le plan horizontal. Les éoliennes à axe horizontal sont dépourvues de tout dispositif d'orientation des pales (la surface active fait toujours face au vent).

$$V = F(t) \quad (II.13)$$

La mesure précise du vent à hauteur d'éolienne est très complexe mais ; Le vent peut être représenté par une quantité arbitraire déterminée par des paramètres statistiques [23].

Différentes méthodes utilisées pour générer une série Vent synthétique, dans notre cas, la vitesse du vent sera formée par la somme de plusieurs harmoniques.

Les paramètres de cette fonction de transfert dépendent des grandeurs caractéristiques du site et de la nature du vent [13].

La vitesse du vent sera modélisée, dans cette partie, sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme [24] [25] :

$$V(t) = A + \sum_{n=1}^i a_n \cdot \sin(b_n \cdot W_v \cdot t) \quad (\text{II. 14})$$

Prendrons comme exemple dans notre modélisation l'équation suivante de ven [26]:

$$V(t) = 8.2 + 2\sin(0.628t) - 1.75\sin(1.884t) + 1.5\sin(3.14t) - 1.25\sin(6.28t) + \sin(18.84) + 0.5\sin(34.4) + 0.25\sin(62.8) \quad (\text{II. 15})$$

Aussi, comme on sait que chaque mouvement est variable et non fixe, il est donné par la relation (II. 15).

II.5.1.2 La puissance aérodynamique

La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [27].

Et la puissance aérodynamique au niveau du rotor de la turbine s'écrit sous la forme suivante, C'est d'elle que la puissance éolienne dépend de trois facteurs : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent :

$$C_p = \frac{p_{aéro}}{p_v} \quad (\text{II. 16})$$

$$\text{Avec} \quad p_{aéro} = C_p \cdot p_v \quad (\text{II. 17})$$

$$\text{Donc} \quad P_t = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot s \cdot v^3 \quad (\text{II. 18})$$

Le rendement aérodynamique de l'éolienne est exprimé par $C_p(\lambda, \beta)$, ce coefficient dépend du ratio λ , qui représente le rapport entre la vitesse à l'extrémité des pales et la vitesse du vent, et de l'angle d'orientation des pales β . Il est défini par l'équation (II.12).

Dans ce travail, nous avons appliqué de $C_p(\lambda, \beta)$ une forme qui a été proposé par [28] :

$$C_p = f(\lambda, \beta) = A_1 \left[\left(\frac{A_2}{\lambda_1} \right) - A_3 \beta - A_4 \right] e^{\frac{A_5}{\lambda_1}} + A_6 * \lambda \quad (\text{II.19})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda_1} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II. 20})$$

Donnée par :

Et $A_1 = 0.5 ; A_2 = 116 ; A_3 = 0.4 ; A_4 = 5 ; A_5 = -21 ; A_6 = 0.0068$.

II.5.1.3 Le couple aérodynamique

Le mécanisme convertit l'énergie cinétique du vent capté par l'éolienne en énergie Mécanique on peut l'exprimer comme le mécanisme dynamique suivant commençant par un couple moteur C_t faisant tourner le rotor à une vitesse Ω_t . Cependant, il est plus facile d'utiliser le coefficient de couple C_c pour obtenir un générateur. Le couple et non plus un générateur de puissance couplé à un générateur électrique. Le couple aérodynamique s'exprime par la relation suivante [29] :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} \quad (\text{II. 21})$$

La relation peut être ré exprimée comme suit :

$$c_t = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda, \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^2}{\Omega_T} \quad (\text{II. 22})$$

Les relations précédentes peuvent être représentées par un schéma fonctionnel représentant le modèle aérodynamique est présenté à la Fig. II.7.

$$C_C = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_t}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3} \quad (\text{II. 23})$$

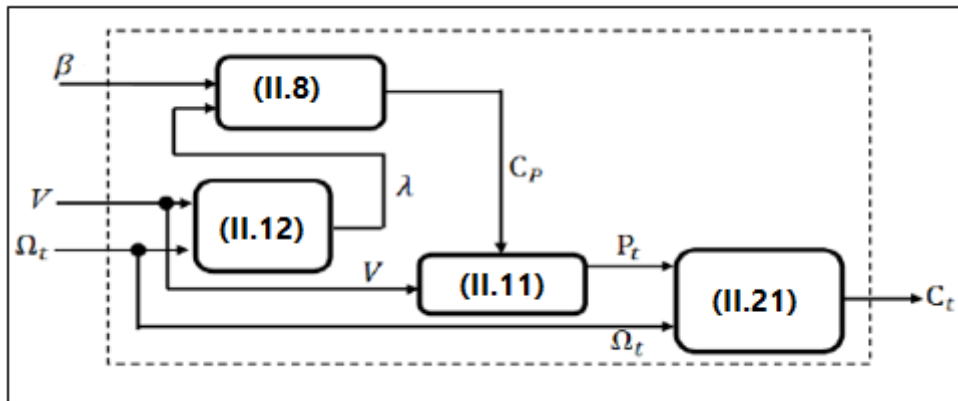


Fig.II.7 : Modèle aérodynamique de la turbine éolienne [29].

II.5.2 Modélisation mécanique de la turbine

Hypothèses simplificatrices pour la modélisation mécanique de la turbine :

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée, comprend trois pales orientables et de longueur R , fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω qui est relié

à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (fig. II. 8).

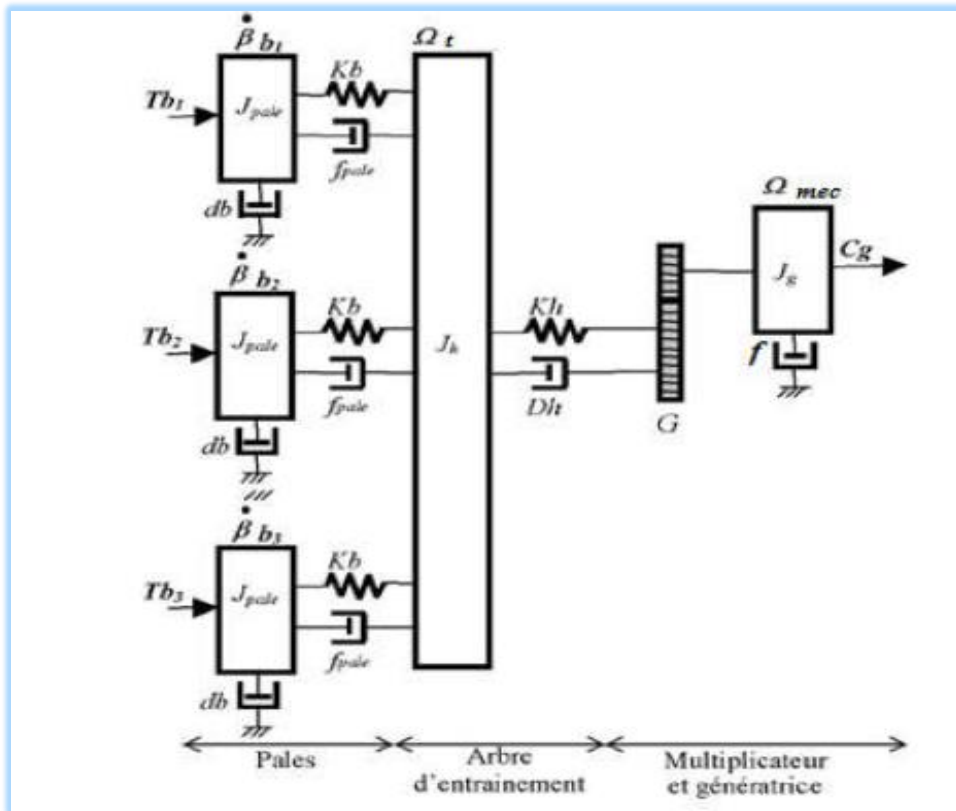


Fig.II.8 : Système mécanique de l'éolienne.

Mécanisme d'action :

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

- la même inertie J_{pale} .
- la même élasticité K_b .
- le même coefficient de frottement par rapport à l'air db .

Ces pales sont orientables et possèdent un même coefficient de frottement par rapport au support f_{pale} . Les vitesses d'orientations de chaque pale sont notées $\dot{\beta}b_1, \dot{\beta}b_2, \dot{\beta}b_3$

Chaque pale reçoit une force Tb_1, Tb_2, Tb_3 qui dépend de la vitesse du vent, qui lui est appliquée[20].

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

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

Le rotor de la génératrice possède :

- une inertie.
- un coefficient de frottement dg .

Ce rotor transmet un couple (Cg) entraînant la génératrice électrique qui tourne à une vitesse Ω_{mec} .

Si on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales, on aura une égalité des forces de poussées ($T b_1 = T b_2 = T b_3$).

On peut simplifier l'ensemble des trois pales comme un seul système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. La conception aérodynamique des pales et leurs coefficients de frottement par rapport à l'air (db) est très faible, donc on peut l'ignorer.

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

On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses fig.(II. 9) dont la validité (par rapport au modèle complet) a déjà été vérifiée [19].

La partie mécanique de la turbine comprend trois pales orientables et de longueur R . Elles sont fixées sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse de rotation W_t , relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne la génératrice électrique. Les trois pales sont considérées identiques. De plus, on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une Egalite de toutes les forces de poussée. Ainsi, on peut modéliser l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par la somme de toutes les caractéristiques mécaniques. De par la conception aérodynamique des pales, nous considérons que leur coefficient de frottement par rapport à l'air est très faible et peut être néglige. De même, la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement seront négligeables devant les pertes par frottement du côté de la génératrice. Sur la base de ces hypothèses, on obtient alors un modèle mécanique constitue de deux masses comme l'illustre la Fig. II.9 dont la validité, par rapport au modèle complet de la turbine, a déjà été vérifiée, [30].

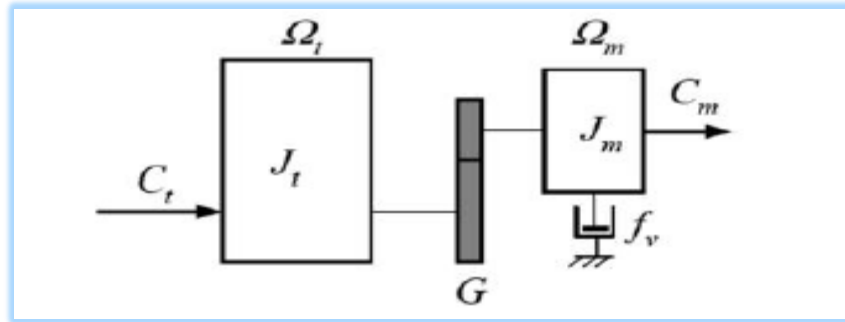


Fig.II.9 : Modèle mécanique de la turbine éolienne [30].

II.5.2.1 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est l'intermédiaire entre la turbine et le générateur. Son but est d'ajuster la vitesse de la turbine Ω_t trop lente à la vitesse du générateur Ω_{mec} . Comme il se caractérise par l'absence de pertes d'énergie dans le multiplicateur, nous pouvons l'exprimer simplement en utilisant les deux équations suivantes :

$$C_m = \frac{C_t}{G} \quad (\text{II. 24})$$

$$\Omega_m = G \Omega_t \quad (\text{II. 25})$$

D'après la Fig. (II.10), nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique par [22] :

$$\left(\frac{J_t}{G^2} - J_m\right) \frac{d\Omega_m}{dt} + f_v \Omega_m = c_m - c_{em} \quad (\text{II. 26})$$

Le schéma bloc de la Fig. (II.10) correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation Ω_m de la turbine, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} . La vitesse du vent V est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

II.5.2.2 Modèle de l'arbre mécanique

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie *turbine* J et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice [22].

D'après la deuxième loi de Newton, on trouve :

$$J = J_g + G^2 J_t$$

$$J = \frac{J_{turbin}}{G^2} + J_g$$

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \quad (\text{II. 27})$$

Il est à noter que l'inertie du rotor du générateur est très faible par rapport à l'inertie du Turbines portées par cet axe. L'équation de base de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse Ω_{mec} du couple mécanique total appliqué au rotor.

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

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f \quad (\text{II. 28})$$

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

C_m : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux :
Donc :

$$C_f = f\Omega_{mec} \quad (\text{II. 29})$$

La transmission complexe dans laquelle le couple mécanique est situé sur l'arbre de transmission, ne dépend que de la vitesse du vent et de la probabilité de la direction des pales. Le vent est par nature imprévisible et offre des variations.

L'important est que la paire résultante représente des ondulations qui doivent être prises en compte Dans l'étude de la production d'électricité par les éoliennes.

Les variables d'entrée de l'arbre de transmission sont donc : le couple issu du Multiplicateur C_m et le couple électromagnétique C_{em} .

Ou une autre description :

Le schéma bloc de la fig (II.10) Son mécanisme de travail est correspond à la modélisation aérodynamique et Mécanique de la turbine éolienne. Il montre que la vitesse de rotation $\Omega_{méc}$ de la génératrice.

Donc de la turbine, peut être contrôlée par action sur le couple électromagnétique C_{em} de la génératrice, ou par action sur l'angle de calage β [22].

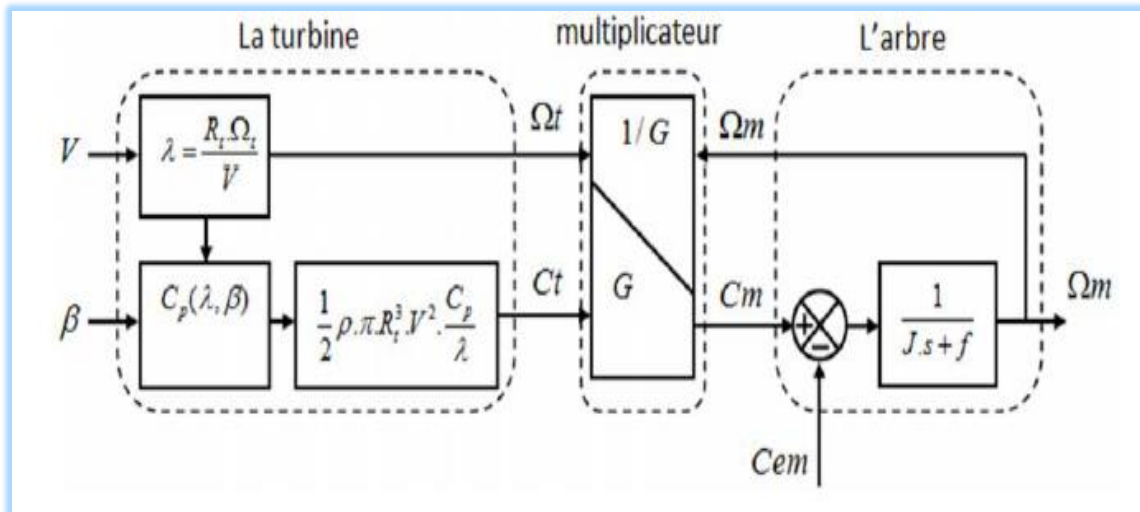


Fig.II.10 : Schéma bloc de modèle de la turbine [19].

II.6 Stratégies de commande de la turbine éolienne

II.6.1 Caractéristique puissance vitesse d'éoliennes de grande puissance

La caractéristique Puissance-vitesse d'une éolienne peut se décomposer en quatre zones principales de fonctionnement (FigII.11).

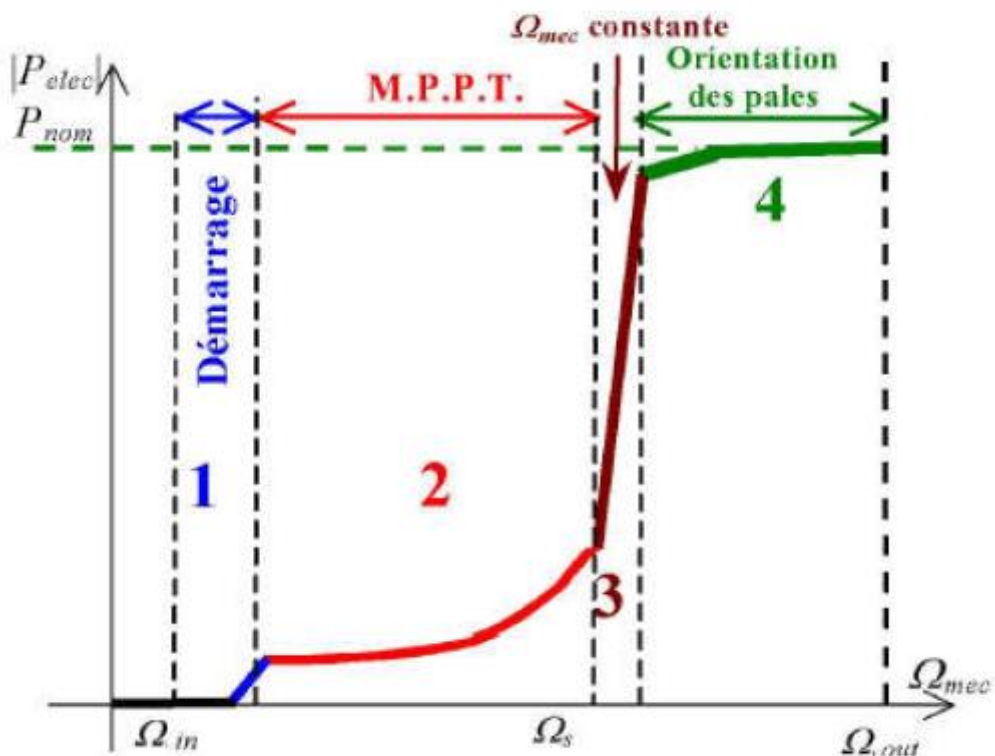


Fig.II.11 : Caractéristique puissance vitesse typique d'une éolienne de grande puissance.

- Zone 1 : C'est ce qu'on appelle la zone de démarrage de l'appareil, et à partir d'une certaine vitesse minimale nécessaire au fonctionnement de l'éolienne, l'éolienne se met à tourner.
- Zone 2 : Lorsque la vitesse du générateur atteint une valeur limite, un algorithme de contrôle est appliqué permettant d'extraire le maximum de puissance du vent. Pour extraire la puissance maximale, l'angle de tangage est maintenu à sa valeur minimale qui correspond au facteur de puissance maximal, et ce processus se poursuit jusqu'à ce qu'une certaine valeur de la vitesse mécanique soit atteinte.
- Zone 3 : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale p_{nom} .
- Zone 4 : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales (pitch control).

Dans ce qui suit nous sommes intéressés à la zone 2 ou la maximisation de l'énergie électrique extraite, cette opération est réalisée par le contrôle du couple électromagnétique généré.

- Au-delà de la vitesse Ω_{out} , un dispositif d'urgence est actionné de manière à éviter une rupture mécanique.

Si comme nous l'avons dit plus tôt nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. En effet, dans cette zone, nous considérerons que l'angle de calage des pales β est constant.

Dans la Zone 2, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT (Maximum Power Point Tracking). On peut distinguer deux modes de contrôle.

Pour l'étude de ces deux modes de contrôle, on supposera que sa commande sont idéales : quelle que soit la puissance mécanique transmise par la turbine, le couple électromagnétique développé par est donc à tout instant égal à sa valeur de référence imposée par la commande [22].

II.6.2 Technique d'extraction de maximum de puissance

En pratique on constate que la vitesse de rotation est contrôlée par le couple électromagnétique, de manière à maximiser la puissance électrique générée, c'est le principe du MPPT. Il existe deux types de structures de contrôle Fig. (II. 12).

- Le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique.
- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique.

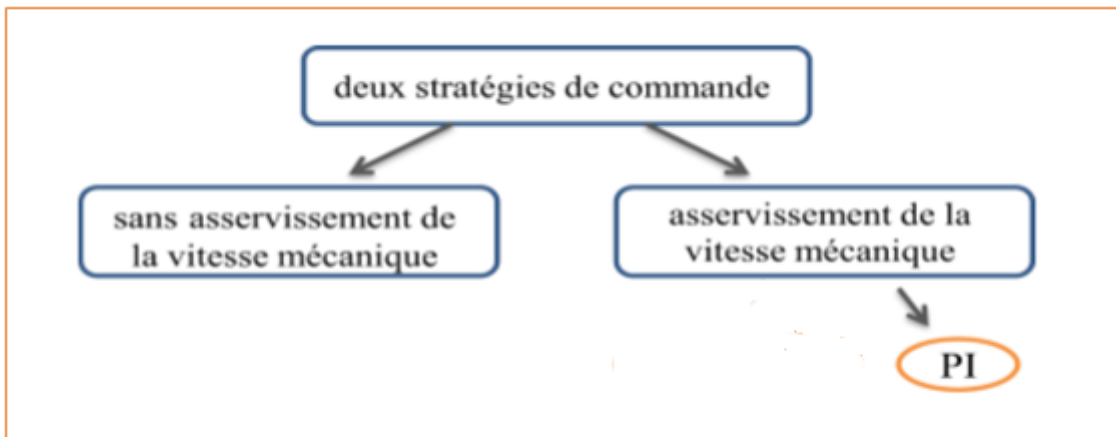


Fig.II.12 : Stratégies de commande de la turbine.

A partir de l'étude ci-dessus, il est difficile de mesurer avec précision la vitesse du vent qui est par nature une quantité très volatile. Ainsi, une mauvaise mesure de la vitesse conduit à une détérioration de la puissance captée selon la technologie MPPT. C'est la raison pour laquelle la plupart des éoliennes sont contrôlées sans retour de vitesse.

MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne :

Cette façon de procéder exige du constructeur de l'éolienne des essais de caractérisation (soufflerie) ou des simulations du profil des pales. Une telle Caractérisation permet de simplifier considérablement l'algorithme de la recherche de Puissance maximale et d'utiliser des convertisseurs plus basiques et moins coûteux. Deux familles de structures de commande sont présentées dans cette approche Comme nous l'avons mentionné précédemment [19].

II.6.2.1 Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Etant donné que la technique précédente de maximisation de puissance repose sur la connaissance précise de la vitesse du vent.

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

- L'anémomètre est situé derrière le rotor de la turbine, ce qui erroné la lecture de la vitesse du vent.
- Le diamètre de la surface balayée par les pales étant important, une variation sensible du vent apparaît selon la hauteur où se trouve l'anémomètre. L'utilisation d'un seul anémomètre conduit donc à n'utiliser qu'une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est donc pas suffisamment représentative de sa valeur moyenne apparaissant sur l'ensemble des pales.

Une mesure erronée de la vitesse conduit donc forcément à une dégradation de la puissance captée selon la technique d'extraction précédente. C'est pourquoi la plupart des turbines éoliennes sont contrôlées sans asservissement de la vitesse [22].

Cette seconde structure de commande repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent varie très peu en régime permanent Fig. (II.13).

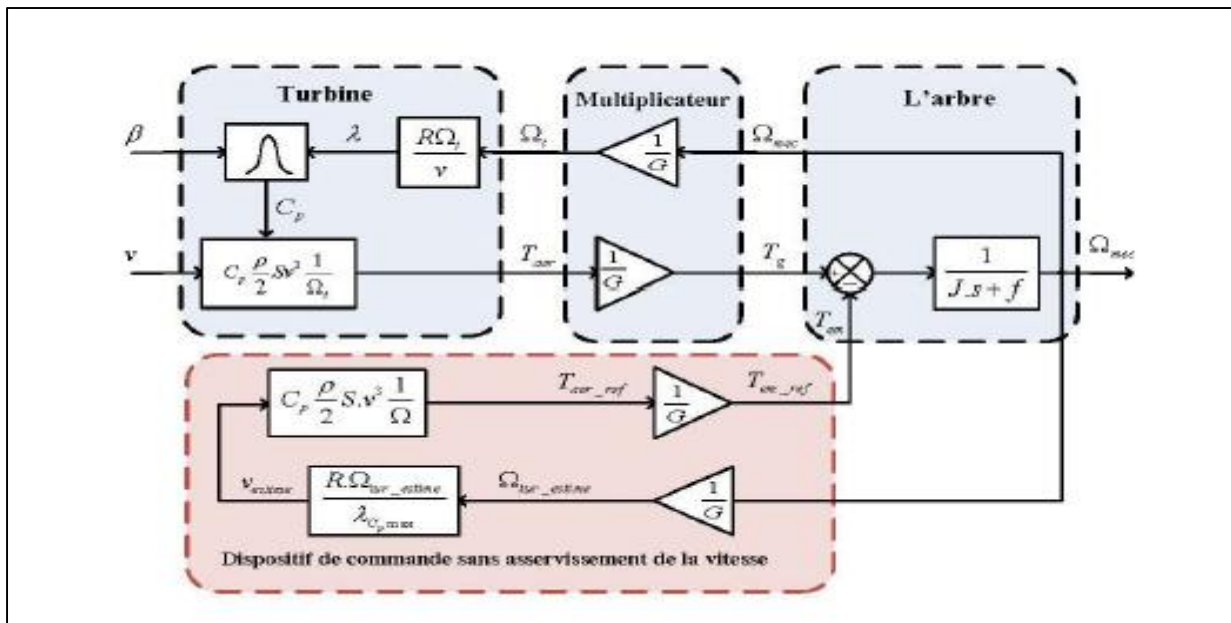


Fig.II.13 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse [22].

II.6.2.2 Maximisation de puissance avec asservissement de la vitesse mécanique

La nature volatile des vents crée des turbulences dans le Changement de vent, et crée des variations continues d'énergie. De cet effet, on suppose que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence. Quelle que soit la puissance générée, ce couple doit être retrouvé.

Nous pouvons le résumer en deux étapes importantes :

- Il doit contrôler la vitesse mécanique à sa valeur de référence.
- Il doit atténuer l'effet du couple de vent, qui constitue une entrée perturbatrice.

Une représentation simplifiée sous la forme d'un schéma fonctionnel est donnée à la Fig. (II.14).

$$T_{em} = T_{em-ref} \quad (\text{II. 30})$$

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

$$T_{em-ref} = k_{ass} (\Omega_{ref} - \Omega_{mec}) \quad (\text{II.31})$$

k_{ass} : Régulateur de vitesse.

Ω_{ref} : La vitesse mécanique de référence.

Cette vitesse de référence dépend de la vitesse de la turbine à fixer pour maximiser la puissance. Selon l'équation, la vitesse de rotation de la turbine est égale à :

$$\Omega_{ref} = \Omega_{tur-ref} \quad (\text{II. 32})$$

Puissance extraite. En prenant en compte le gain du multiplicateur, on a donc :

$$\Omega_{tur} = \frac{V_v \lambda}{R} \quad (\text{II. 33})$$

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{opt} et le coefficient de puissance maximale C_p peut se déduire de p_{max} l'équation.

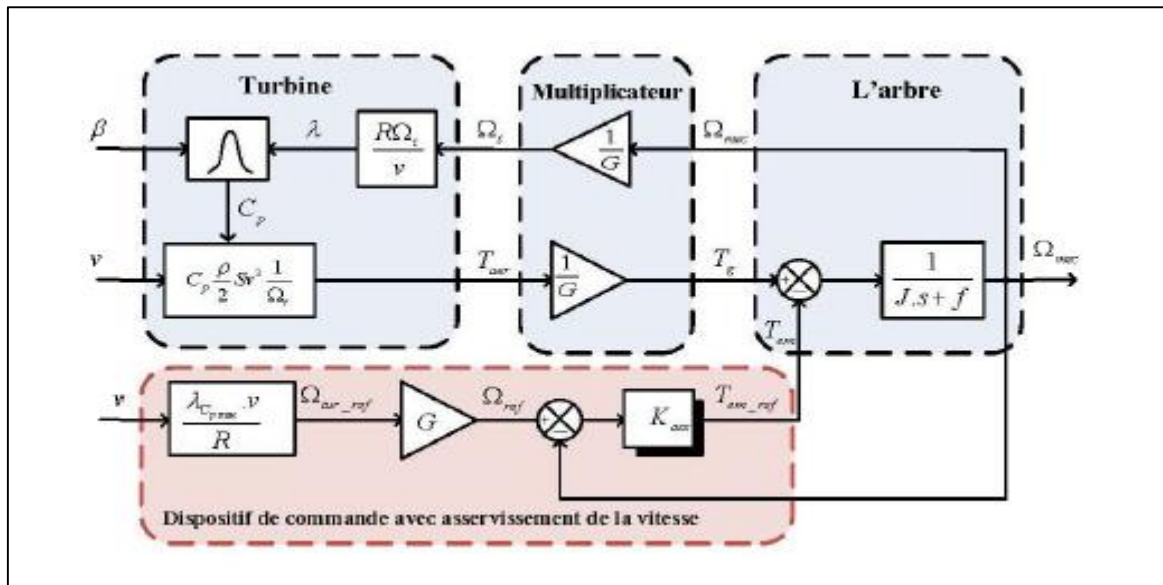


Fig.II.14 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse [22].

II.7 Synthèse du régulateur PI pour le contrôle MPPT

L'approche la plus classique utilisée dans notre travail consiste à contrôler la vitesse de rotation par un régulateur PI. Dans l'objectif d'annuler l'erreur statique et réduire le temps de réponse tout en conservant la stabilité du système un correcteur proportionnel intégral est utilisé [21]. Les performances obtenues (stabilité, précision, temps de réponse) sont satisfaisantes pour un tel système électromécanique. Cependant le couple peut présenter un dépassement important qui peut nuire au fonctionnement du système, pour palier à ce problème on utilise une limitation de la référence du couple à la sortie du correcteur, la vitesse à régler se définit à partir de l'équation mécanique, la structure du régulateur de vitesse est montrée sur la fig.II.15.

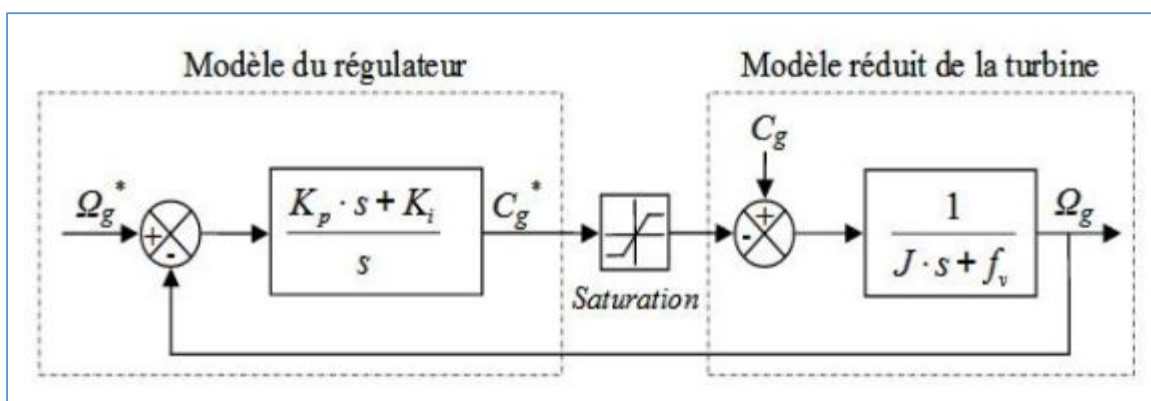


Fig.15 : Schéma bloc de régulation de la vitesse de rotation.

Nous pouvons écrire la fonction de transfert en boucle fermée sous la Forme mathématique suivante :

$$\Omega_g = F(s) \cdot \Omega_g^* + G(s) \cdot C_g \quad (\text{II. 34})$$

Où F(s) est la fonction de transfert de la référence sur la vitesse :

Et G(s) est la fonction de la perturbation :

$$G(s) = \frac{s}{j \cdot s^2 + (f_v + k_{p\Omega})s + k_{i\Omega}} \quad (\text{II. 35})$$

Pour baisser l'effet de la perturbation (Cg), nous avons intérêt à choisir une valeur élevée pour le gain Ω . L'autre gain est choisi de manière à avoir une fonction de transfert du 2ème ordre, ayant une pulsation naturelle et un coefficient d'amortissement, déterminés comme suit :

$$\begin{cases} W_n = \sqrt{\frac{k_i}{j}} \\ \varepsilon = \frac{f_s + K_p}{j \cdot 2W_n} \end{cases} \quad (\text{II. 36})$$

Donc, pour imposer un temps de réponse et un facteur d'amortissement, Nous trouvons [21] :

$$\begin{cases} K_i = W_n^2 \cdot j \\ K_p = 2\varepsilon j W_n - f_s \end{cases} \quad (\text{II. 37})$$

II.8 Résultats de simulation

Pour évaluer et tester la technique MPPT avec asservissement de vitesse par le régulateur PI, une simulation a été effectuée sous l'environnement MATLAB/Simulink.

Le schéma bloc de la simulation de contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique de la turbine avec le régulateur PI est présenté dans la figure (II.18).

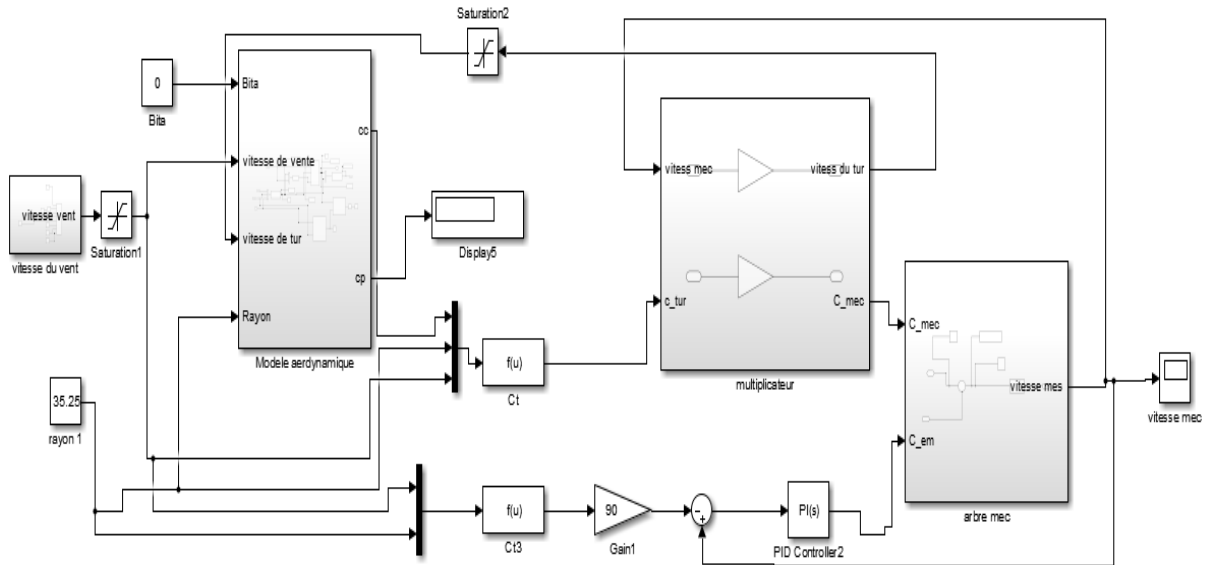


Fig. II. 16: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

Dans ce cas, les gains des régulateurs PI sont calculés ont été affinés après simulation :

$$APN : \begin{cases} K_i = 9000000000 \\ K_p = 1.3976 \end{cases}$$

Cette structure de commande a été simulée en considérant le profil de vent Moyen autour de 8.2m /s représenté sur la figure Fig.II.17 et pour générer ce profile ou a utilisé schéma bloc simulation de Fig.II.16.

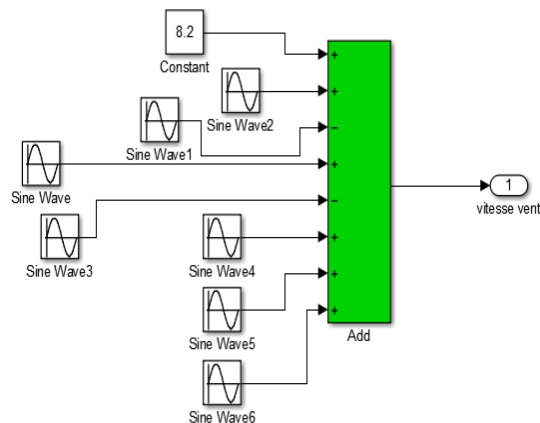


Fig.II.17 : Schéma bloc simulation la vitesse du vent.

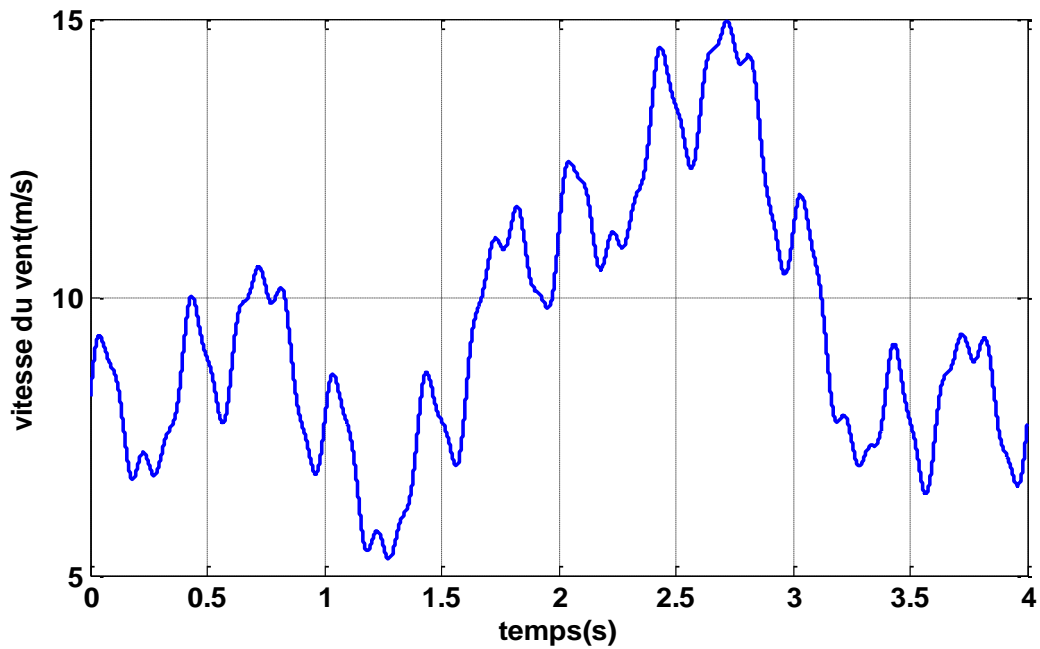


Fig.II.18 : Profile de la vitesse du vent.

On remarque que la vitesse mécanique poursuit le profil de vent proposée (fig.II.19) avec une petite erreur entre le couple électromagnétique mesuré et estimé ce qui signifie que l'extraction de puissance maximale est assurée par se contrôle (fig.II.20) et que le coefficient de puissance est maximal (fig.II.21) et la vitesse ratio est optimal mais il y a des oscillations dans les deux courbes (fig.II.23).

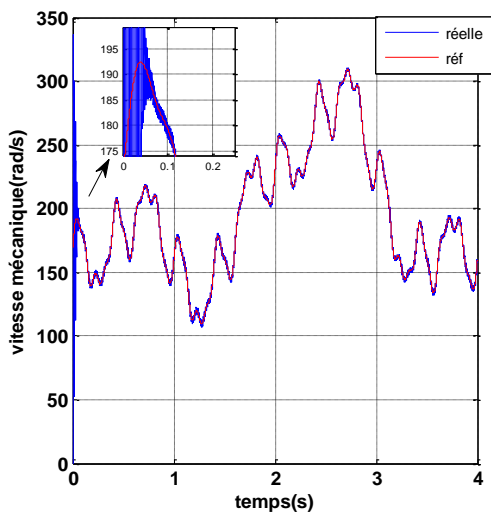


Fig. II. 19 : la vitesse mécanique.

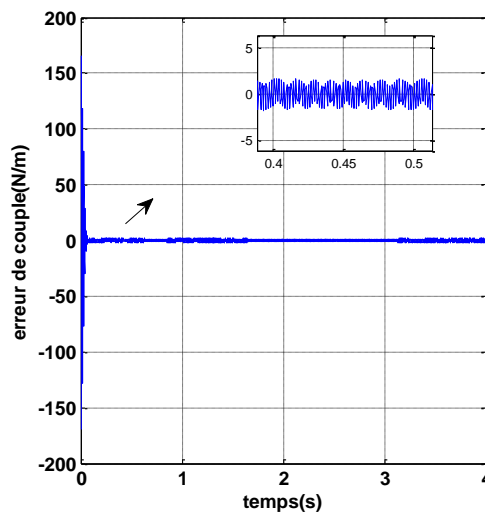


Fig. II. 20 : : erreur de couple
Electromagnétique.

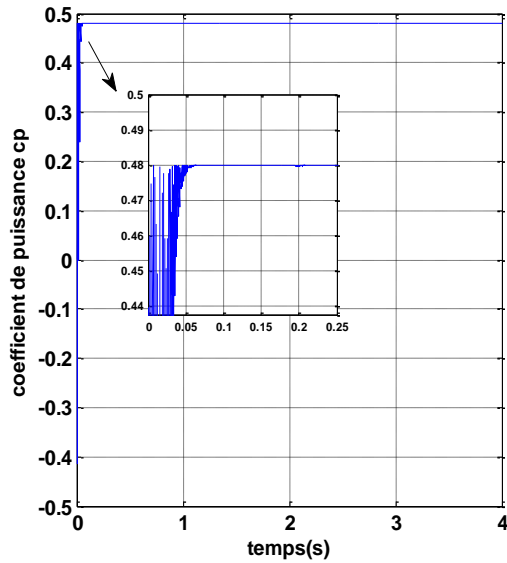


Fig. II. 21 : coefficient de puissance.

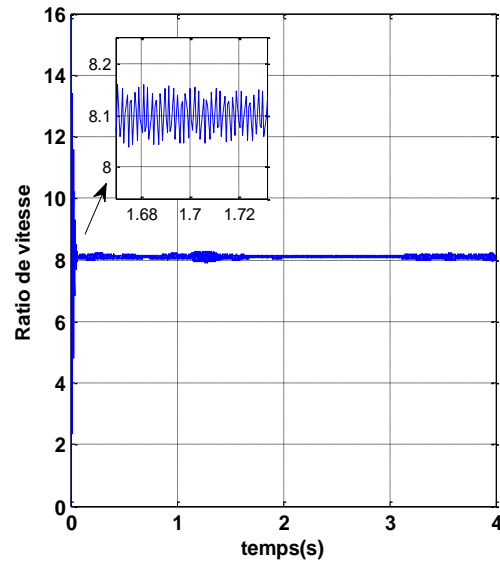


Fig. II. 22 : la vitesse Ratio.

✓ Test de robustesse PI

L'objet de ce test est d'observer l'influence de la variation des paramètres interne de la turbine éolienne sur le contrôle MPPT avec asservissement de vitesse étudiés.

Pour cela, nous avons augmenté l'inertie de 50 % de sa valeur nominale. Les résultats de simulation obtenus sont montrés par la fig.II.23. Cette figure représente le coefficient de puissance C_p , on remarque des fluctuations et diminution de C_p , avec l'augmentation de régime transitoire.

Ce résultat nous permet de conclure que le contrôle de PI à moins de robustesse et ne présente pas une solution très attractive pour un bon contrôle de la vitesse des éoliennes.

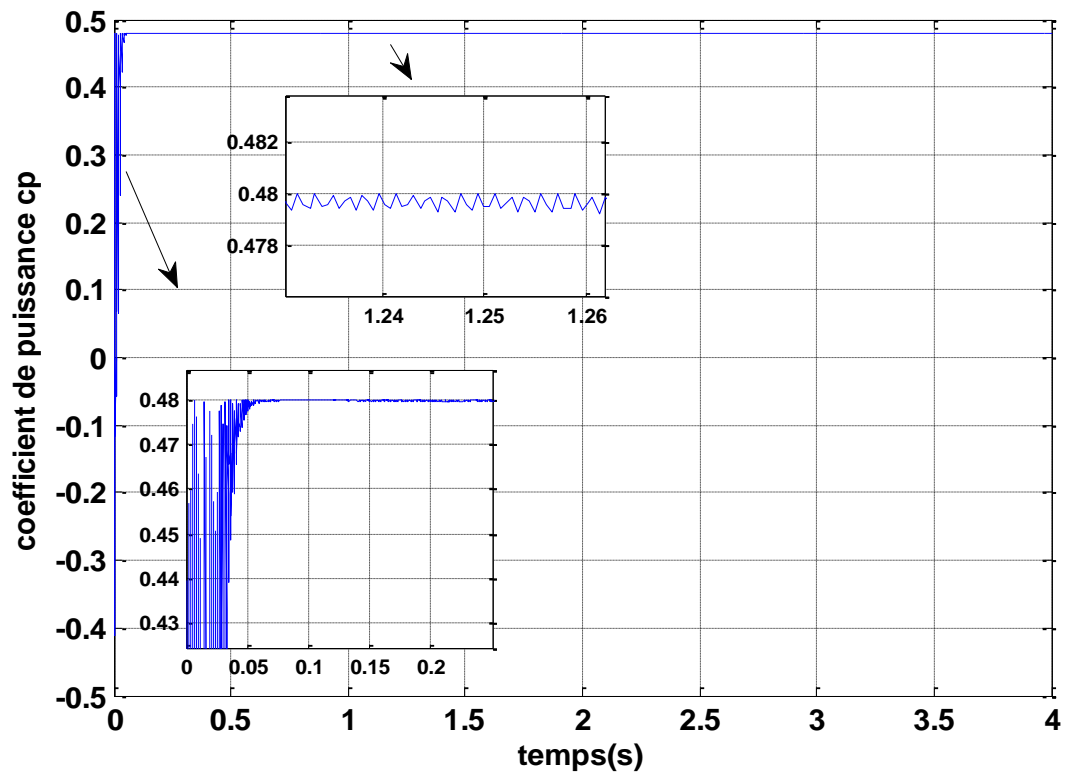
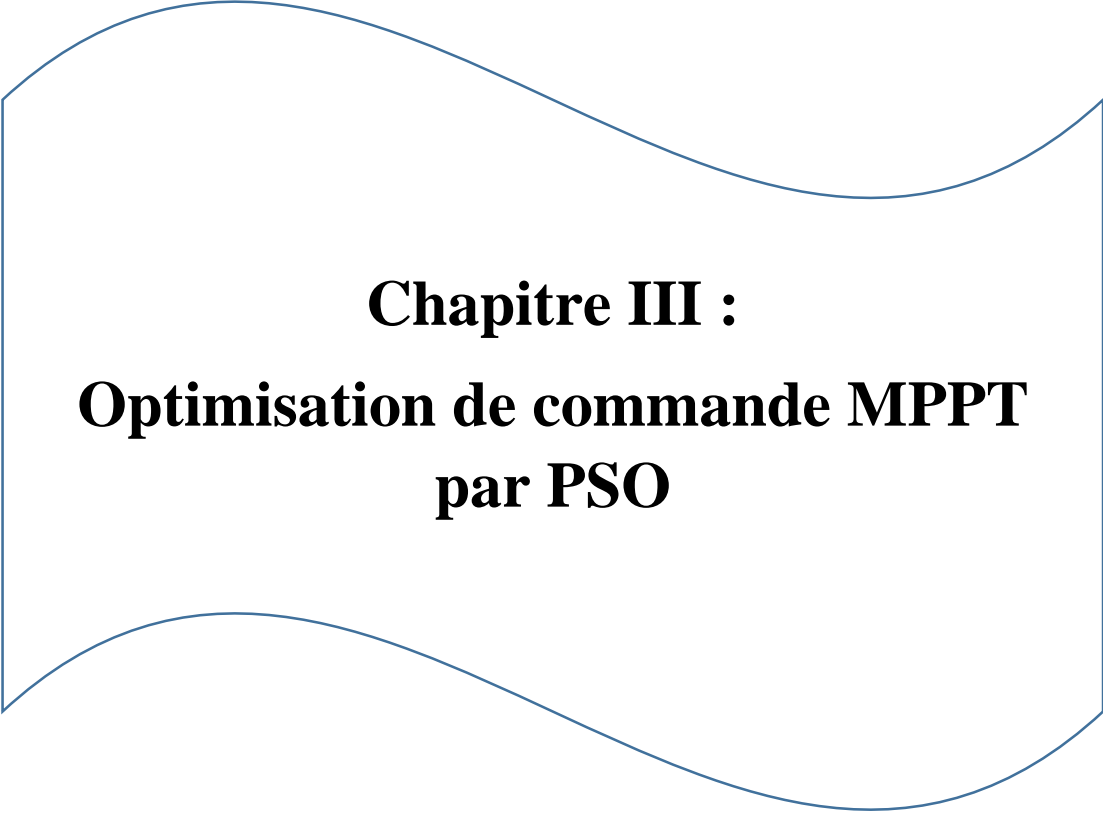


Fig. II.23 : Test de robustesse vis-à-vis une variation de +50 % du moment d'inertie.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, une commande MPPT pour système éolien est étudiée. Dans le but d'obtenir une puissance maximale, un contrôle MPPT avec contrôle de vitesse basé sur un contrôleur à classique a été utilisé. Selon le changement de vitesse du vent, le système de conversion d'énergie éolienne a fourni une bonne performance dynamique. Main nous notons que le régulateur PI a été affecté par le changement de paramètre.



Chapitre III :
Optimisation de commande MPPT
par PSO

III.1 Introduction

La nature turbulente des profils de vent ainsi que l'incertitude dans la modélisation de Éoliennes les rendent plus difficiles pour l'extraction d'énergie prolifique. Les contrôleurs proportionnels-intégraux-dérivés sont principalement utilisés. Les gains du ce contrôleur calculés par de nombreuses techniques, ce qui est une tâche assez lourde et dépendant directement à partir des paramètres de système.

Dans cette recherche, la technique d'optimisation par essaim de particules est utilisée mais la technique conventionnelle d'optimisation par essaim de particules ne peut pas s'attaquer à la non-linéarité et aux incertitudes du système. Par conséquent, l'algorithme d'optimisation de l'essaim de particules proposé est utilisé pour le calcul des paramètres optimaux du contrôleur.

Dans ce chapitre on va expliquer l'algorithme d'optimisation des essais de particules (PSO) afin d'utilisé pour notre commande MPPT.

III.2 Définition de PSO

L'optimisation par essaim de particule Esa été introduite, en1995, par Russel Eberhart, ingénieur en électricité, et James Kennedy, socio-psychologue. Cette méthode se base sur la collaboration des individus entre eux : Chaque particule est définie par sa position (une solution) et sa vitesse. Dans l'optimisation par PSO, la vitesse de chaque particule est modifiée de manière itérative par sa meilleure position personnelle, et la meilleure position trouvée par les particules dans son voisinage. En conséquence, chaque particule recherche autour d'une région définie par sa meilleure position personnelle et la meilleure position de son voisinage [33].

Désormais, nous utilisons v_i pour désigner la vitesse de la i particule dans l'essaim, X_i pour désigner sa position P_{ibest} , pour désigner la meilleure position personnelle et G_{best} pour désigner la meilleure position globale trouvée par les particules dans leurs voisinages

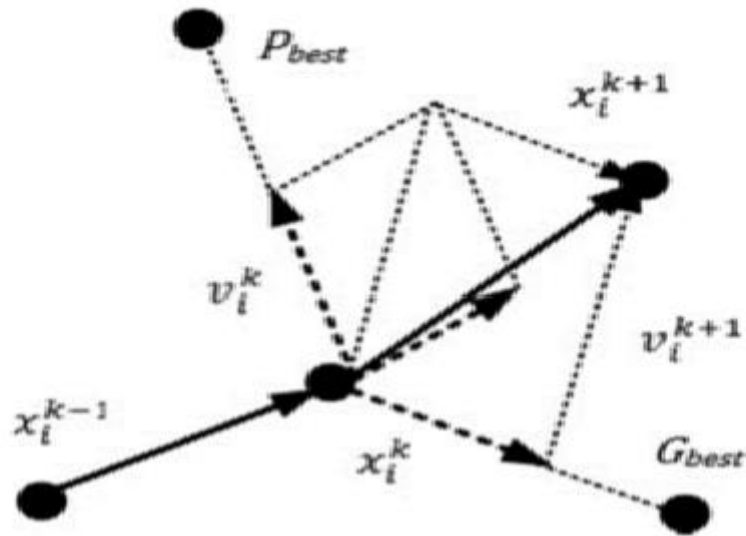


Fig.III.1 : le mouvement des Particules dans P&O.

La position des particules individuelles est définie par :

$$x_{ji}(t+1) = x_{ji}(t) + v_{ji}(t+1) \quad (\text{III.1})$$

la vitesse de la i ème particule calculée par :

$$v_{ji}(t+1) = \omega v_{ji}(t) + c_1 \text{rand}(0,1)(p_{best}(t) - x_{ji}(t)) + c_2 \text{rand}(0,1)(g_{best}(t) - x_{ji}(t)) \quad (\text{III.2})$$

Le paramètre ω est appelé poids d'inertie et contrôle la grandeur de l'ancienne vitesse v dans le calcul de la nouvelle vitesse, alors que c_1 et c_2 déterminent la signification de P_{ibest} et G_{best} , respectivement [33].

III.3 Définitions de Base

En règle générale, on ne connaît pas toujours de méthode exacte pour trouver la solution d'un problème d'optimisation en recherche opérationnelle. Dans ce cas on peut d'abord tenter de voir si le problème que l'on étudie n'a pas de problème équivalent qui a déjà été résolu. Si l'on n'a toujours pas trouvé de méthode de résolution alors on utilise ce que l'on appelle une heuristique, c'est-à-dire un algorithme qui donne une solution approchée. Ces algorithmes sont assez intuitifs ou simples. On les déduit grâce à des observations et en faisant preuve de bon sens. Leur principe consiste souvent à explorer un certain nombre de solutions et de mémoriser la meilleure.

Ils peuvent faire intervenir le hasard : cela permet de balayer un plus grand nombre de solution éventuelle, mais il faut les exécuter plusieurs fois pour tendre au mieux vers la solution optimale.

Certaines heuristiques sont classées parmi le méta heuristique. Ce sont des algorithmes dont le principe peut être réutilisé pour traiter différents problèmes d'optimisation. Ce sont des principes génériques que l'on adapte selon le besoin. La plus utilisée des heuristiques et la plus simple est la descente stochastique. Voici son fonctionnement dans le cas d'un problème de minimisation : on choisit une solution initiale, on sélectionne au hasard un de ses voisins :

- Si la valeur de la fonction objective pour cette nouvelle solution est plus petite alors

On prend ce nouveau point comme point de référence et on observe ses voisins.

- Sinon on recherche un autre voisin. On s'arrête quand on se rend compte que l'on ne trouve plus de meilleure solution.

III.4 Définition de l'Optimisation

Un problème d'optimisation se définit comme la recherche du minimum ou du maximum (de l'optimum) d'une fonction donnée. On peut aussi trouver des problèmes d'optimisation pour lesquelles les variables de la fonction à optimiser sont contraintes d'évoluer dans une certaine partie de l'espace de recherche. Dans ce cas, on a une forme particulière de ce que l'on appelle un problème d'optimisation sous contraintes.

III.5 Optimisation par Essaim de Particules (PSO)

III.5.1 Origines

L'optimisation par essaim de particules est une méthode née en 1995 aux Etats Unis sous le nom de Particle Swarm Optimisation (PSO). Initialement, ses deux concepteurs, Russel Eberhart et James Kennedy, cherchaient à modéliser des interactions sociales entre des « agents » devant atteindre un objectif donné dans un espace de recherche commun, chaque agent ayant une certaine capacité de mémorisation et de traitement de l'information. La règle de base était qu'il ne devait y avoir aucun chef d'orchestre, ni même aucune connaissance par les agents de l'ensemble des informations, seulement des connaissances locales. Un modèle simple fut alors élaboré.

III.5.2 Principe de la Technique PSO

Cette méthode est inspirée du comportement social des animaux évoluant en essaim. L'exemple le plus souvent utilisé est le comportement des nuées d'oiseaux et des bancs de poissons, (Fig. III.2).



Fig. III.2 : Groupe de : (a) oiseaux, (b) poissons.

En effet, on peut observer chez ces animaux des dynamiques de déplacement relativement complexes, alors qu'individuellement chaque individu a une intelligence limitée et une connaissance seulement locale de sa situation dans l'essaim. Un individu de l'essaim n'a pour connaissance que la position et la vitesse de ses plus proches voisins. Chaque individu utilise donc, non seulement, sa propre mémoire, mais aussi l'information locale sur ses plus proches voisins pour décider de son propre déplacement. Des règles simples, telles que "aller à la même vitesse que les autres", "se déplacer dans la même direction" ou encore "rester proche de ses voisins" sont des exemples de comportements qui suffisent à maintenir la cohésion de l'essaim, et qui permettent la mise en œuvre de comportements collectifs complexes et adaptatifs. L'"intelligence globale" de l'essaim est donc la conséquence directe des interactions locales entre les différentes particules de l'essaim. La performance du système entier est supérieure à la somme des performances de ses parties. Kennedy et Eberhart se sont inspirés de ces comportements socio-psychologiques pour créer le PSO. Un essaim de particules, qui sont des solutions potentielles au problème d'optimisation, "survole" l'espace de recherche, en quête de l'optimum global. Le déplacement d'une particule est influencé par les trois composantes suivantes [33] :

Une composante physique : la particule tend à suivre sa direction courante de Déplacement ;

- Une composante cognitive : la particule tend à se diriger vers le meilleur site par lequel elle est déjà passée ; Une composante sociale : la particule tend à se fier à l'expérience de ses congénères et, ainsi, à se diriger vers le meilleur site déjà atteint par ses voisins.

Dans le cas d'un problème d'optimisation, la qualité d'un site de l'espace de recherche est déterminée par la valeur de la fonction objective en ce point. La (fig.III.3) illustre la stratégie de déplacement d'une particule.

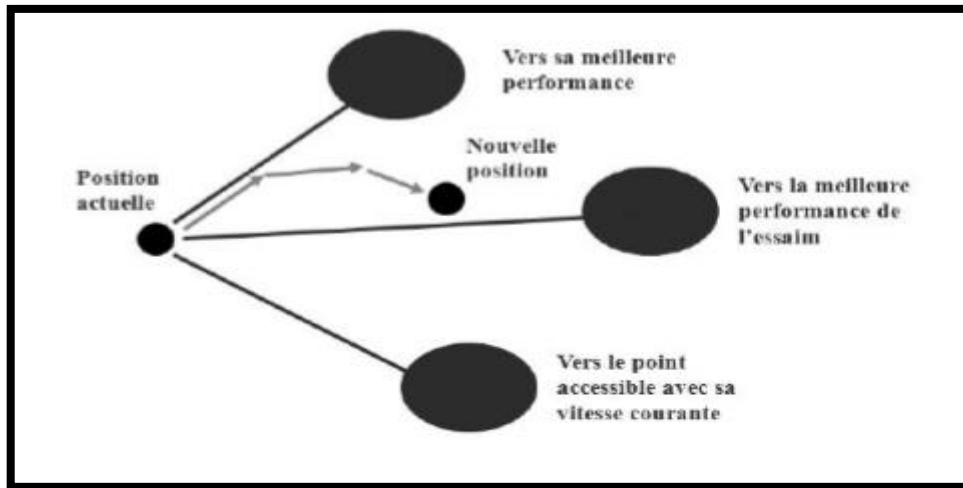


Fig. III.3 : Déplacement d'une particule.

Il faut ensuite définir les voisins et leur structure, il en existe de deux types :

- ✓ Les voisinages géographiques : les voisins d'une particule sont ses voisines les plus proches. Ce type de voisinage impose l'utilisation d'une distance pour recalculer à chaque itération (ou toutes les k itérations) les voisins de chaque particule. Ci-dessous, la (fig.III.4) est un exemple où les voisins d'une particule sont les deux particules qui lui sont le plus proche.

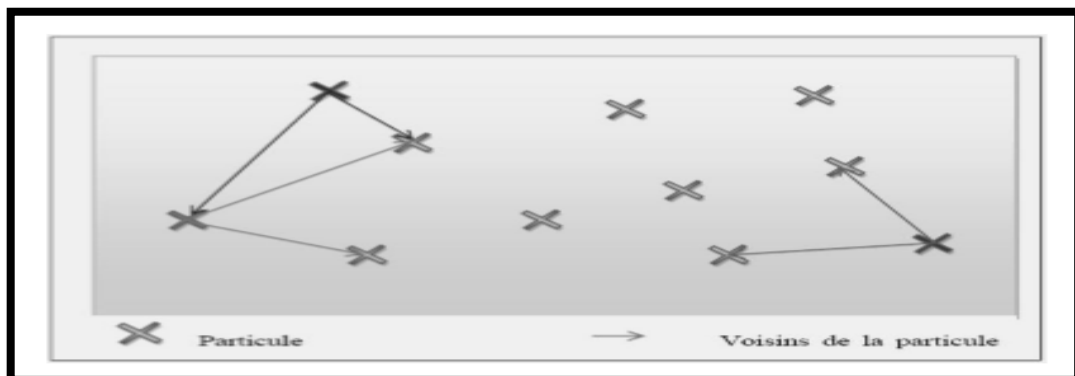


Fig. III.4 : Exemple de voisinage géographique.

- Les voisinages sociaux : les voisinages sont établis à l'initialisation et ne sont pas modifiés ensuite. Il existe différentes structures de voisinages sociaux, nous allons vous en présenter quelques-uns (Fig.III.5).

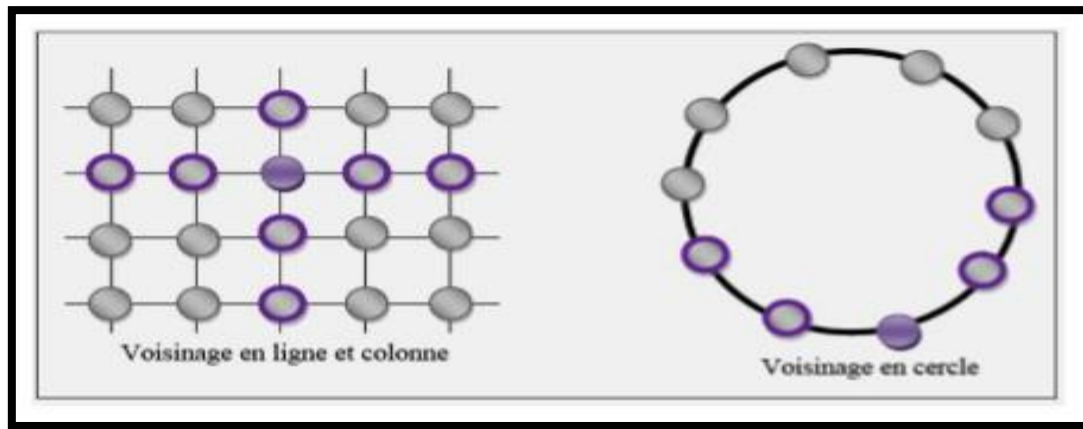


Fig. III.5 : Deux cas de voisinage social.

III.5.3 Principe de l'Algorithme PSO

On dispose une fonction objective à optimiser dans un sens ou dans l'autre. Un essaim est un ensemble de particules positionnées dans l'espace de recherche de la fonction objectif. Le principe de l'algorithme consiste à déplacer ces particules dans l'espace de recherche afin de trouver la solution optimale.

Au départ de l'algorithme, un essaim est réparti au hasard dans l'espace de recherche, chaque particule ayant également une vitesse aléatoire. Ensuite, à chaque pas de temps :

- Chaque particule est capable d'évaluer la qualité de sa position et de garder en mémoire sa meilleure performance, c'est-à-dire la meilleure position qu'elle a atteinte jusqu'ici (qui peut en fait être parfois la position courante) et sa qualité (la valeur en cette position de la fonction à optimiser).
- Chaque particule est capable d'interroger un certain nombre de ses congénères de son voisinage et d'obtenir de chacune entre elles sa propre meilleure performance.
- A chaque pas de temps, chaque particule choisit la meilleure des meilleures performances dont elle à connaissance modifie sa vitesse en fonction de cette information et de ses propres données et se déplace en conséquence.

A partir des quelques informations dont elle dispose, une particule doit décider de son prochain mouvement, c'est-à-dire décider de sa nouvelle vitesse.

Pour ce faire, elle combine trois informations :

- Sa vitesse actuelle.

- Sa meilleure position actuelle.
- La meilleure performance (vitesse et position) de ses voisins.

Le hasard joue un rôle, grâce à une modification aléatoire limitée des coefficients de confiance, ce qui favorise l'exploration de l'espace de recherche. Naturellement, pour pouvoir être programmé, tout ceci est formalisé dans des équations de mouvement. Un point intéressant est que, contrairement à bien d'autres heuristiques qui restent purement expérimentales, il existe une analyse mathématique précisant les conditions de convergence et le choix du paramètre.

III.5.4 Formulation Mathématique de l'Algorithme PSO

Dans un espace de recherche de dimension D , la particule i de l'essaim est modélisée par son vecteur position $\bar{X}_i = (x_{i1}, x_{i2}, x_{i3}, \dots, x_{iD})$ et par son vecteur vitesse $\bar{V}_i = (v_{i1}, v_{i2}, v_{i3}, \dots, v_{iD})$. Cette particule garde en mémoire la meilleure position par laquelle elle est déjà passée, que l'on note $\overline{p_{ibest}} = (p_{i1best}, p_{i2best}, p_{i3best}, \dots, p_{iDbest})$. La meilleure position atteinte par toutes les particules de l'essaim est notée. Au temps t , le vecteur vitesse est calculé à partir de l'équation précédent, [36].

$$V_i^k(t) = w y_i^k(t+1) + c_1 r_1 (p_{igbest}(t-1) - X_{ij}(t-1)) + c_2 r_2 (g_{ibest} - X_{ij}(t-1)) \quad (\text{III.3})$$

La position au temps t de la particule i est alors définie par l'équation :

$$x_{ij}(t) = x_{ij}(t-1) + v_{ij}(t), j \in \{1, \dots, D\} \quad (\text{III.4})$$

Où [34] :

- w est en général une constante appelée, coefficient d'inertie, c_1 et c_2 sont deux constantes appelées coefficients d'accélération, r_1 et r_2 sont deux nombres aléatoires tirés uniformément dans $[0,1]$ à chaque itération et pour chaque dimension.
- $w.V_{ij}(t-1)$ correspond à la composante physique du déplacement. Le paramètre w contrôle l'influence de la direction de déplacement sur le déplacement futur. Il est à noter que, dans certaines applications, le paramètre w peut être variable.
- $c_1 r_1 (p_{igbest}(t-1) - X_{ij}(t-1))$ correspond à la composante cognitive du déplacement où c_1 contrôle le comportement cognitif de la particule.
- $c_2 r_2 (g_{ibest}(t-1) - X_{ij}(t-1))$ correspond à la composante sociale du déplacement, où c_2 contrôle l'aptitude sociale de la particule.

Les gammes appropriées de valeur pour c_1 et c_2 sont de 1 à 2, mais 2 est le plus approprié dans beaucoup de ça. Le coefficient d'inertie est donné par :

$$w = w_{max} - \left(\frac{w_{max} - w_{min}}{k_{max}} \right) \quad (\text{III.5})$$

Où max k, k sont respectivement le nombre maximum des itérations et le nombre d'itération courante. w_{max} Et w_{min} sont respectivement les coefficients minimum et maximum d'inertie.

Dans un algorithme de PSO, les particules volent autour un espace multidimensionnel de recherche. Pendant le vol, chaque particule ajuste sa position selon sa propre expérience (P_{ijbest}), et selon l'expérience d'une particule voisine (g_{ibest}), servie la meilleure position produite par elle-même et son voisin, (Fig. III.6).

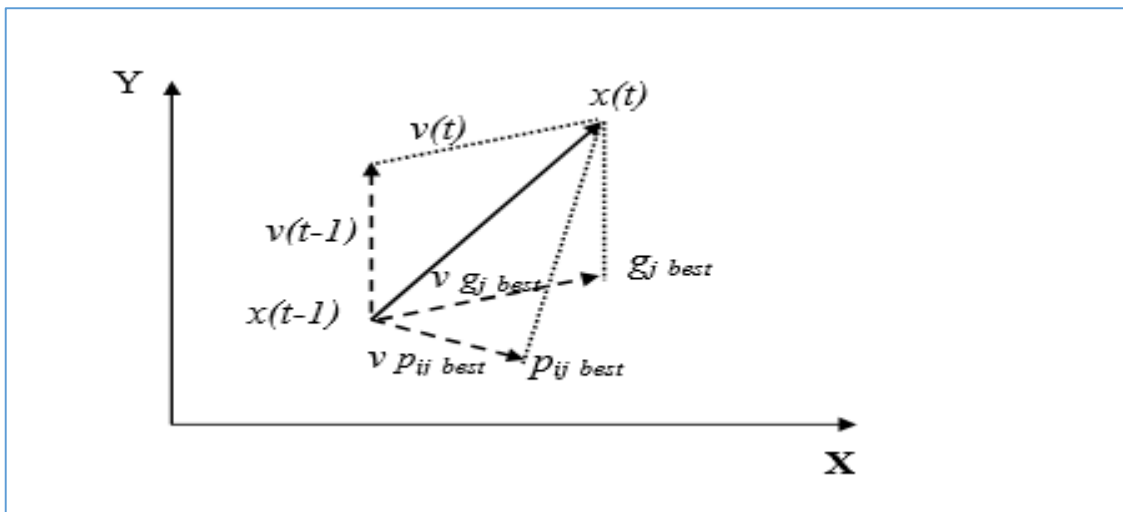


Fig. III.6 : Schéma du déplacement d'une particule.

A chaque itération de l'algorithme, chaque particule est déplacée suivant les équations une fois le déplacement des particules effectué, les nouvelles positions sont évaluées. Les $\overline{p_{ibest}}$ ainsi que $\overline{G_{ibest}}$ sont alors mises à jour. Cette procédure est résumée par l'algorithme Le critère d'arrêt peut être différent suivant le problème posé. Si l'optimum global est connu a priori, on peut définir une erreur acceptable " ϵ " comme critère d'arrêt. Sinon, il est commun de fixer un nombre maximum d'évaluations de la fonction objectif ou un nombre maximum d'itérations comme critère d'arrêt. Cependant, au regard du problème posé et des exigences de l'utilisateur, d'autres critères d'arrêt peuvent être utilisés [35].

La stratégie de confinement de la vitesse :

La particularité de l'algorithme de PSO utilisé est que la vitesse de chaque particule (i) est contrôlée dans un intervalle $[V_{i\min}, V_{i\max}]$ par l'algorithme suivant :

$$(v_i < V_{i\min}) \text{ ou } (v_i > V_{i\max}) \quad v_i = rand * (V_{i\max} - V_{i\min}) \quad (\text{III.6})$$

Où $V_{i\min} = X_{i\min} - x_i$ (III.7)

$$V_{i\max} = X_{i\max} - x_i \quad (\text{III.8})$$

Donc l'intervalle de contrôle de vitesse $[v_{i\min}, V_{i\max}]$ dépend de l'intervalle de contrôle de position $[X_{i\min}, X_{i\max}]$. De la sorte, la position de particule sera toujours confinée dans son espace de recherche, Fig. (III.7).

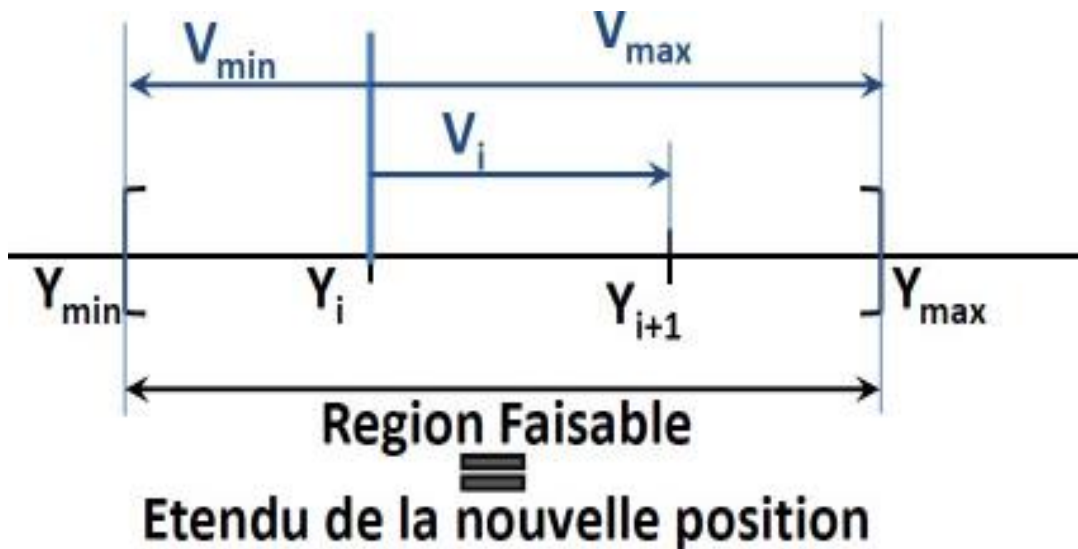


Fig.III.7 : Stratégie de confinement de vitesse

III.6 Optimisation du régulateur PI par la méthode PSO de Commande

Cette partie est consacrée à l'optimisation, par la technique PSO, des gains du régulateur PI qui Utilisé pour contrôler l'énergie pour le contrôle appliquée à une turbine.

Les éoliennes, où les équations de ce générateur ont été mentionnées dans le deuxième chapitre.

III.7 Algorithme d'optimisation des essais

de particules L'optimisation des essais de particules est basée sur le comportement social qu'une population d'individus adapte à son environnement en retournant dans des régions prometteuses précédemment découvertes [36]. Cette adaptation à l'environnement est un processus stochastique qui dépend à la fois de la mémoire de chaque individu et des connaissances acquises par l'ensemble de la population. Dans l'implémentation numérique de

ce modèle social simplifié, la population est qualifiée d'essaim et chaque individu de particule. L'implémentation numérique commence par un essaim initial de particules distribuées aléatoirement, chacune avec un vecteur vitesse initial aléatoire. L'algorithme met ensuite à jour à plusieurs reprises la position de chaque particule sur une période de temps pour simuler l'adaptation de l'essaim à son environnement. La position de chaque particule est mise à jour à l'aide de la position actuelle, d'un vecteur vitesse et d'un incrément de temps. La nouvelle position de chaque particule à l'itération $k+1$ est calculée à partir de l'Eq. (8) :

$$X_{k+1}^i = X_k^i + V_{k+1}^i \Delta t \quad (\text{III.9})$$

Où : X_{k+1}^i est la position de la particule i à l'itération $k + 1$; V_{k+1}^i est le vecteur vitesse correspondant ; et Δt est la valeur du pas de temps. Un pas de temps unitaire est utilisé tout au long du présent travail. Le vecteur vitesse de chaque particule peut être obtenu à partir de nombreuses formulations différentes. Une formulation largement utilisée dans la littérature a été introduite par Shi et Eberhart et est illustrée dans l'eq. (9).

$$V_{k+1}^i = wV_k^i + c_1 r_1 \frac{(p^i - x_k^i)}{\Delta t} + c_2 r_2 \frac{(p_g^i - x_k^i)}{\Delta t} \quad (\text{III.10})$$

Dans l'éq. (9), r_1 et r_2 sont des nombres aléatoires entre 0 et 1, p_i est la meilleure position trouvée par la particule i jusqu'à présent, et P_g est la meilleure position dans l'essaim lors de l'itération k . Il existe trois paramètres dépendant du problème, l'inertie de la particule (w), et deux paramètres de « confiance » c_1 et c_2 . L'inertie contrôle les propriétés d'exploration de l'algorithme, avec des valeurs plus grandes facilitant un comportement plus global et des valeurs plus petites facilitant un comportement plus local. Les paramètres de confiance indiquent le degré de confiance que la particule a en elle-même (c_1) et le degré de confiance qu'elle a dans l'essaim (c_2). Une formulation légèrement différente de la vectrice vitesse consiste à remplacer la meilleure position de l'itération courante P_g^k par la meilleure position trouvée jusqu'ici p_g . Les deux formulations seront considérées ici. Les améliorations apportées à l'algorithme de base incluent le traitement des problèmes d'optimisation contraints, un opérateur de folie et la modification dynamique de la valeur d'inertie. Ces améliorations sont discutées plus en détail. Les problèmes d'optimisation sous contrainte sont généralement traités à l'aide d'une approche de fonction de pénalité, mais celle-ci n'est pas utilisée dans le présent travail où un problème d'optimisation sans contrainte est considéré. L'opérateur de folie ajoute un caractère aléatoire supplémentaire à l'essaim pour éviter une convergence prématurée et est similaire à l'opérateur de mutation d'un algorithme génétique. Un petit sous-ensemble de particules est sélectionné à

chaque itération de conception, et les vecteurs de position et/ou de vitesse sont modifiés de manière aléatoire. Comme mentionné, le paramètre d'inertie contrôle les propriétés d'exploration de l'algorithme. L'objectif est de commencer avec une valeur d'inertie plus grande (une recherche plus globale) qui est dynamiquement réduite vers la fin de l'optimisation (une recherche plus locale) [37].

III.8 Avantages et inconvénient de l'algorithme PSO

III.8.1 Avantages

- ❖ Peut converger rapidement vers des bonnes solutions.
- ❖ Implémentations simples, avec peu de paramètres.
- ❖ Versatilité : peut résoudre beaucoup de différents problèmes.

III.8.2 Inconvénients

- ❖ Tendence à une convergence rapide et prématurée en milieu Optimum.
- ❖ Convergence lente en phase de recherche détaillée (faible capacité de recherche locale).
- ❖ Choix des paramètres d'optimisation, ces derniers sont le plus souvent spécifiques pour chaque type de problème.

III.9 Résultats de simulation

Dans ce qui suit les simulations sont menées pour investiguer l'efficacité de l'algorithme. Commande de PSO dans le but de régler et ajuster les gains de correcteur PI pour avoir un Résultat optimal.

Paramètres de régulateur PI sont donnés par le tab (III.1) :

Paramètres de l'algorithme PSO sont donnés par le tab (III.2).

Les Paramètre	K_p	K_i
Les valeurs	1.3976	9000000000

Tab.III.1 : Paramètres du PI.

Les Paramètre	c_1	c_2	K_p	K_i	de population	des itérations
Les valeurs	2	2	343170000	26.8658	100	10

Tab.III.2 : Paramètres program PSO.

Paramètres de codage du régulateur PI :

Le codage porte sur la manière dont les paramètres binaires $\{K_p, K_i\}$ du régulateur PI sont représentés sous la forme d'une particule susceptible d'évoluer au cours du processus d'optimisation.

La Tab.III.3 montre la structure des particules PSO utilisées, elle est divisée en deux parties et chaque partie contient la valeur réelle du paramètre.

	K_p	K_i
Valeur Minimale	3.000e+08	0
Valeur Maximale	10.0000e+08	28

Tab.III.3 Les plages de variations des trois paramètres sont données.

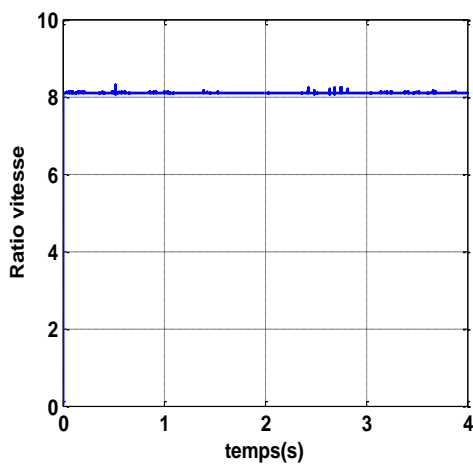


Fig. III.9 : la vitesse Ratio en Fonction temps.

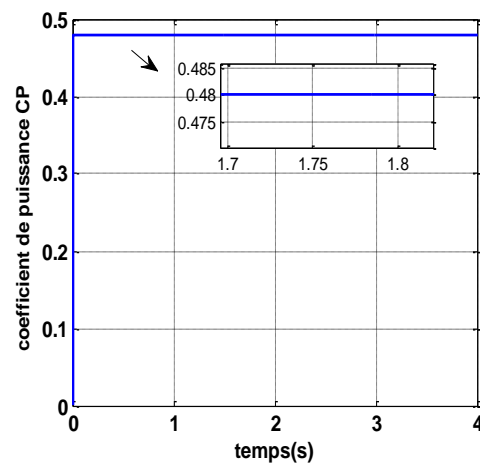


Fig. III.10 : coefficient de puissance en fonction de temps.

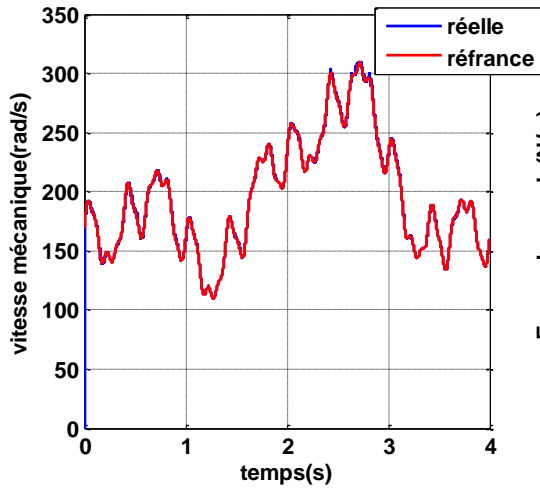


Fig. III.11 : la vitesse mécanique en
Fonction de temps.

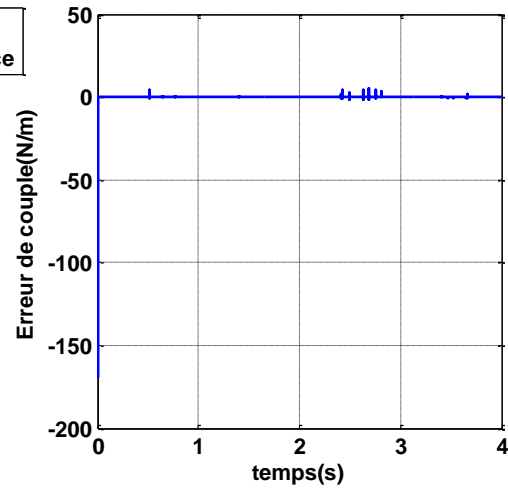


Fig. III.12 : l'erreur de couple
Electromagnétique.

Les résultats de simulation montre les différents courbes de la commande MPPT avec ajustement de paramètre de régulateur PI par la technique PSO.

Fig. III.10 on s'aperçoit que le rendement aérodynamique C_p est quasiment constant (rendement aérodynamique maximal), en imposant un ratio de vitesse optimal comme la montre la figIII.9. Les variations de la vitesse mécanique à la variation de la vitesse du vent sont adaptées (fig.III.11). En plus l'erreur de couple est adjacente à zéro plus rapidement (fig.III.12).

Test de robustesse PSO

Calculer paramètres K_p et K_i pour une augmentation de l'inertie de 50 % de sa valeur nominale :

$$\text{APN} : \begin{cases} K_i = 9004500000 \\ K_p = 1.3983 \end{cases}$$

La fig (III.13) présentent une robustesse apparente (en mode dynamique et statique).

C'est un résultat qui nous permet de conclure que le contrôle pso offre une solution très intéressante pour le contrôle de la vitesse des éoliennes et la robustesse face aux changements de paramètres.

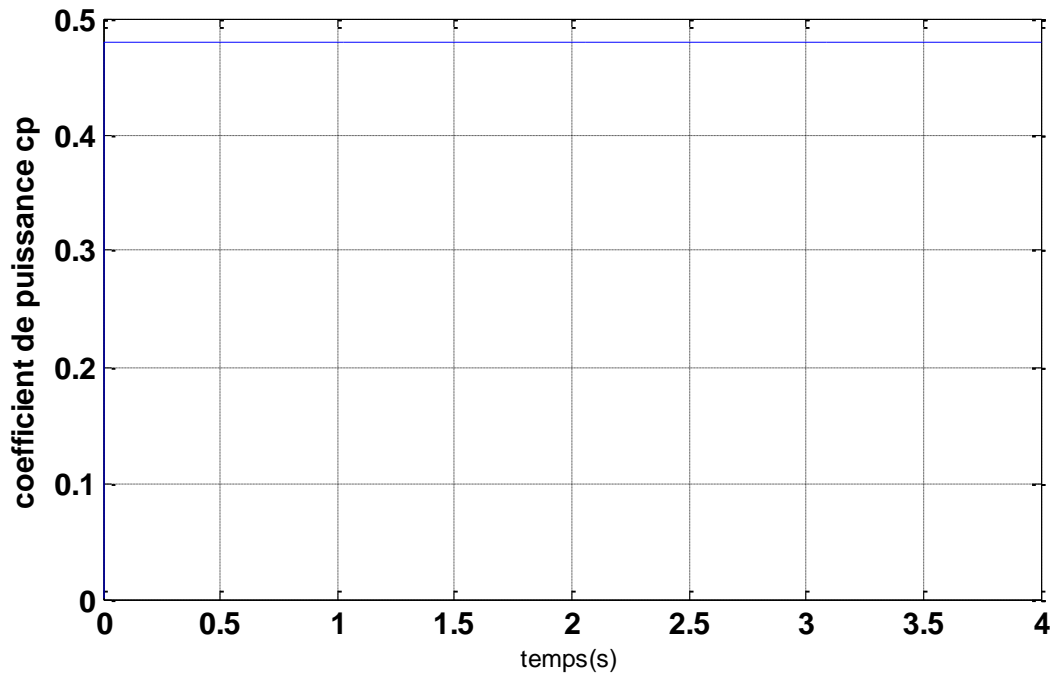


Fig. III.13 : Test de robustesse vis-à-vis une variation de +50 % du moment d'inertie.

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous expliquons les concepts de base de l'algorithme PSO. Ensuite, nous avons présenté le concept d'algorithme et ses étapes pour améliorer les gains de l'unité de commande PI pour contrôler MPPT avec l'esclavage de vitesse.

Lorsque des résultats satisfaisants ont été obtenus à partir de la glorification énergétique, en tant que bonne efficacité de l'énergie et améliorée, c'est mieux que le régulateur classique avec une bonne durabilité et un bon test.



Chapitre IV
Commande MPPT par
réseaux de neurones

IV.1 Introduction

Les réseaux de neurones se sont imposés dans un grand nombre de domaines (traitement du signal, reconnaissance de forme, commande, ...). Le secteur de l'électronique de puissance et celui des entraînements électrique sont également concernés par cette avancée. En effet, ces deux dernières décennies, l'activité scientifique liée aux applications de ces techniques dans l'estimation, l'identification et la commande des systèmes électriques n'a cessé d'augmenter. Les solutions proposées dépassent les limitations des méthodes classiques et apportent des possibilités novatrices [38].

Dans ce chapitre on va présenter une stratégie de contrôle de la turbine en utilisant le contrôle par les réseaux de neurones artificiels. Cette commande est ensuite simulée sur Matlab/Simulink.

IV.2 Historique

- ❖ 1890 : W. James, célèbre psychologue américain introduit le concept de mémoire associative, et propose ce qui deviendra une loi de fonctionnement pour l'apprentissage sur les réseaux de neurones connue plus tard sous le nom de loi de Hebb.
- ❖ 1943 : J. Mc Culloch et W. Pitts, laissent leurs noms à une modélisation du neurone biologique (un neurone au comportement binaire). Ceux sont les premiers à montrer que des réseaux de neurones formels simples peuvent réaliser des fonctions logiques, arithmétiques et symboliques complexes (tout au moins au niveau théorique).
- ❖ 1949 : D. Hebbel, physiologiste américain explique le conditionnement chez l'animal par les propriétés des neurones eux-mêmes. Ainsi, un conditionnement de type pavlovien tel que, nourrir tous les jours à la même heure un chien, entraîne chez cet animal la sécrétion de salive à cette heure précise même en l'absence de nourriture. La loi de modification des propriétés des connexions entre neurones qu'il propose explique en partie ce type de résultats expérimentaux.
- ❖ 1957 : F. Rosenblatt développe le modèle du Perceptron. Il construit le premier neuro ordinateur basé sur ce modèle et l'applique au domaine de la reconnaissance de formes. Notons qu'à cet époque les moyens à sa disposition sont limités et c'est une

prouesse technologique que de réussir à faire fonctionner correctement cette machine plus de quelques minutes.

❖ 1960 : B. Widrow, un automaticien, développe le modèle Adeline (Adaptative Liner Elément). Dans sa structure, le modèle ressemble au Perceptron, cependant la loi d'apprentissage est différente. Celle-ci est à l'origine de l'algorithme de retro propagation de gradient très utilisé aujourd'hui avec les Perceptrons multicouches. Les réseaux de type Adeline restent utilisés de nos jours pour certaines applications particulières.

❖ 1982 : J.J. Hop Field est un physicien reconnu à qui l'on doit le renouveau d'intérêt pour les réseaux de neurones artificiels. Il présente une théorie du fonctionnement et des possibilités des réseaux de neurones.

❖ 1983 : La machine de Boltzmann est le premier modèle connu apte à traiter de manière satisfaisante les limitations recensées dans le cas du Perceptron. Mais l'utilisation pratique s'avère difficile, la convergence de l'algorithme étant extrêmement longue (les temps de calcul sont considérables).

❖ 1985 : La rétro propagation de gradient apparaît. C'est un algorithme d'apprentissage adapté aux réseaux de neurones multicouches (aussi appelés Perceptrons multicouches). Sa découverte réalisée par trois groupes de chercheurs indépendants indique que « la chose était dans l'air ». Dès cette découverte, nous avons la possibilité de réaliser une fonction non linéaire d'entrée/sortie sur un réseau en décomposant cette fonction en une suite d'étapes linéairement séparables. De nos jours, les réseaux multicouches et la rétro propagation de gradient reste le modèle le plus productif au niveau des applications.

IV.3 Définition des réseaux de neurones

L'origine des réseaux de neurones vient de l'essai de modélisation mathématique du cerveau humain les premiers travaux datent de 1943 et sont l'œuvre de W.M. Culloch et W. Pitts. Ils supposent que l'impulsion nerveuse est le résultat d'un calcul simple effectué par chaque neurone et que la pensée née grâce à l'effet collectif d'un réseau de neurone interconnecté (fig. IV.1) Explique cela [39].

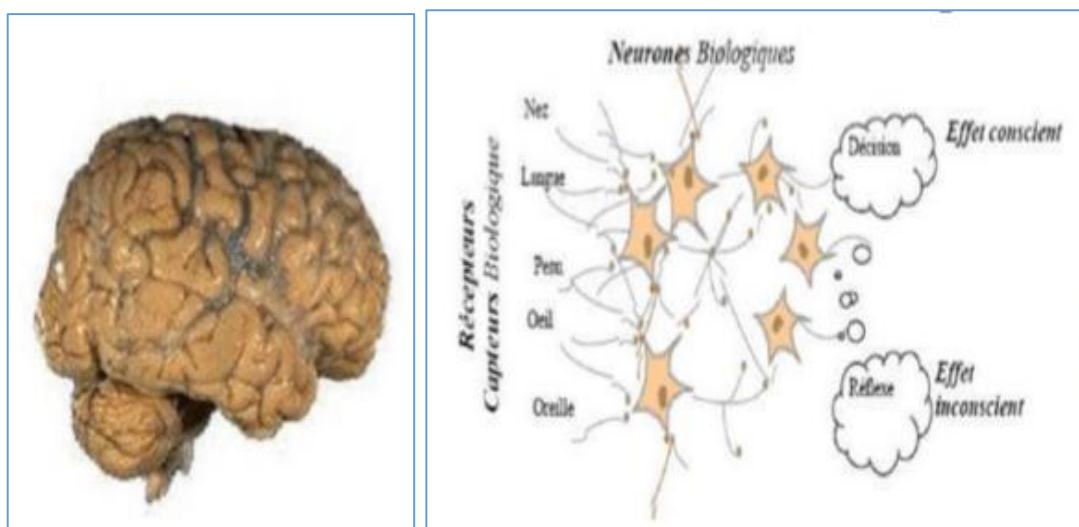


Fig. IV.1 : Structure d'un réseau de neurone biologique et le cerveau humain.

Un réseau de neurones est un assemblage de constituants élémentaires interconnectés (appelés « neurones » en hommage à leur modèle biologique), qui réalisent chacun un traitement simple mais dont l'ensemble en interaction fait émerger des propriétés globales complexes. Chaque neurone fonctionne indépendamment des autres de telle sorte que l'ensemble forme un système massivement parallèle. L'information est stockée de manière distribuée dans le réseau sous forme de coefficients synaptiques ou de fonctions d'activation, il n'y a donc pas de zone de mémoire et de zone de calcul, l'une et l'autre sont intimement liés.

Un réseau de neurone ne se programme pas, il est entraîné grâce à un mécanisme d'apprentissage. Les tâches particulièrement adaptées au traitement par réseau de neurones sont : l'association, la classification, la discrimination, la prévision ou l'estimation, et la commande de processus complexes.

Les réseaux de neurones artificiels consistent en des modèles plus ou moins inspirés du fonctionnement cérébral de l'être humain en se basant principalement sur le concept de neurone.

IV.4 type modèle de Réseaux de neurones

IV.4.1 Un modèle biologique

Cette section décrit un modèle très grossier des neurones biologiques qui a servi à la mise en place des premiers neurones formels Fig. IV.2.

Dans le cerveau, les neurones sont reliés entre eux par l'intermédiaire d'axones et de dendrites. En première approche, On peut considérer que ces sortes de filaments sont

conductrices d'électricité et peuvent ainsi véhiculer des messages depuis un neurone vers un autre. Les dendrites représentent les entrées du neurone et son axone sa sortie.

Un neurone émet un signal en fonction des signaux qui lui proviennent des autres neurones. On observe en fait au niveau d'un neurone, une intégration des signaux reçus au cours du temps, c'est à dire une sorte de sommations des signaux. En général, quand la somme dépasse un certain seuil, le neurone émet à son tour un signal électrique.

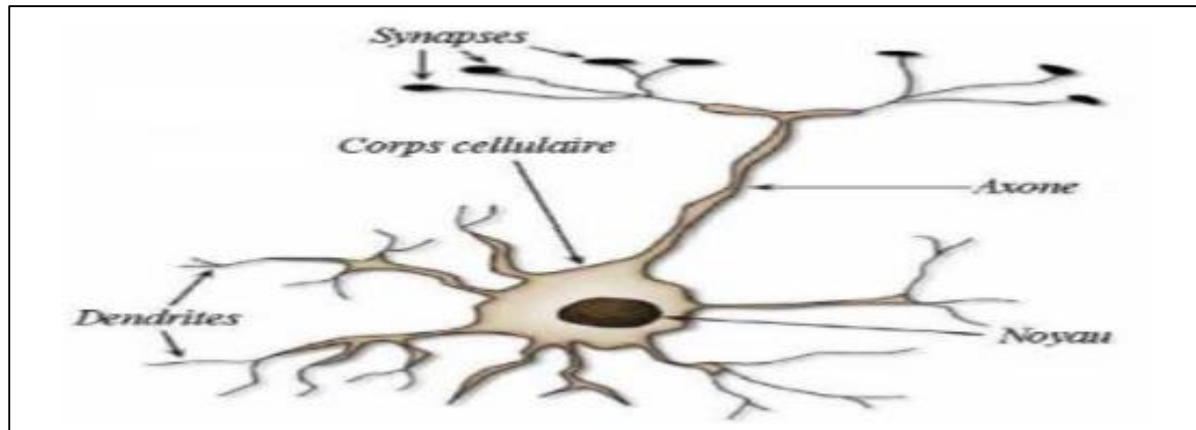


Fig. IV.2 : Un modèle biologique.

IV.4.2 Le neurone formel

Un neurone formel est un automate très simple imitant grossièrement la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique. La première version de ce dernier est celle de Mc Culloch et W. Pitts et date de 1943. S'inspirant de leurs travaux sur les neurones biologiques, ils ont proposé le modèle du neurone formel qui se voit comme un opérateur effectuant une somme pondérée de ses entrées suivie d'une fonction d'activation (ou de transfert) comme indiqué par la fig. IV.3. [39].

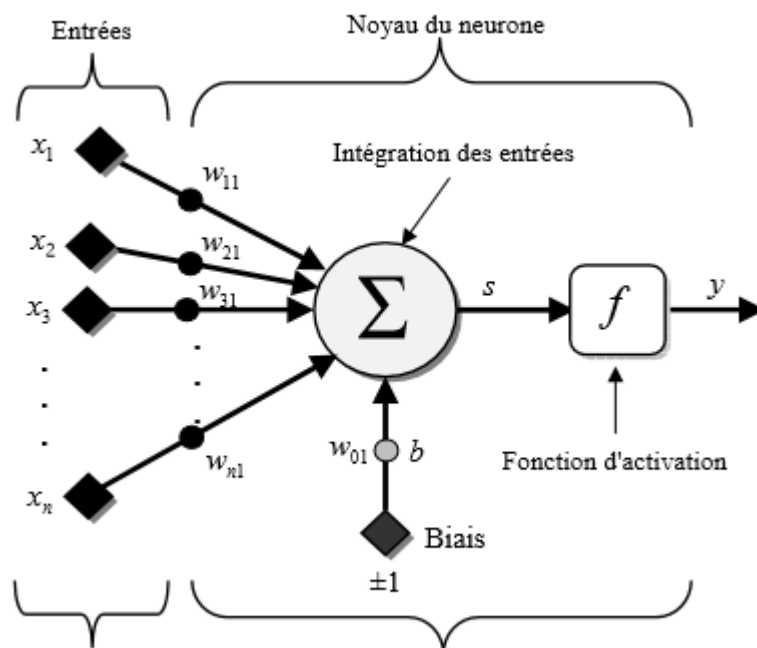


Fig. IV.3 : Modèle d'un neurone artificiel.

Des observations de neurone biologique, découle le modèle du neurone formel proposé par W. M. Culloch et W. Pitts en 1943 :

✓ Les X_i représentent les vecteurs d'entrées, elles proviennent soit des sorties d'autres neurones, soit de stimuli sensoriels (capteur visuel, sonore...) [39] ;

✓ Les W_{ij} sont les poids synaptiques du neurone j . Ils correspondent à l'efficacité synaptique dans les neurones biologiques ($0 > W_{ij}$: synapse excitatrice ; $W_{ij} < 0$: synapse inhibitrice). Ces poids pondèrent les entrées et peuvent être modifiés par apprentissage ;

✓ Biais : entrée prend souvent les valeurs -1 ou +1 qui permet d'ajouter de la flexibilité au réseau en permettant de varier le seuil de déclenchement du neurone par l'ajustement des poids et du biais lors de l'apprentissage ;

✓ Noyau : intègre toutes les entrées et le biais et calcul la sortie du neurone selon une fonction d'activation qui est souvent non linéaire pour donner une plus grande flexibilité d'apprentissage.

IV.5 Modélisation d'un neurone formel

Un neurone formel est un automate très simple imitant grossièrement la structure et le fonctionnement d'un neurone biologique. La première version de ce dernier est celle

de Mc Culloch et W. Pitts et date de 1943. S'inspirant de leurs travaux sur les neurones biologiques, ils ont proposé le modèle du neurone formel qui se voit comme un opérateur effectuant une somme pondérée de ses entrées suivie d'une fonction d'activation (ou de transfert) comme indiqué par la fig. IV.3.

La modélisation consiste à mettre en œuvre un système de réseau de neurones sous un aspect non pas biologique mais artificiel, cela suppose que d'après le principe biologique on aura une correspondance pour chaque élément composant le neurone biologique, donc une modélisation pour chacun d'entre eux. On pourra résumer cette modélisation par le tab IV.1, qui nous permettra de voir clairement la transition entre le neurone biologique et le neurone formel.










Neurone biologique	Neurone formel
Synapses	Poids des connexions
Axones	Signal de sortie
Dendrites	Signal d'entrée
Noyau ou Somma	Fonction d'activation

TAB. III.1 : Analogie entre le neurone biologique et le neurone formel [40].

IV.6 Fonctions d'activations

Jusqu'à présent, nous n'avons pas spécifié la nature de la fonction d'activation de notre modèle. Il se trouve que plusieurs possibilités existent. Différentes fonctions de transfert pouvant être utilisées comme fonction d'activation du neurone sont énumérées au tab.III.2. Les fonctions d'activations les plus utilisées sont les fonctions «seuil» (en anglais «hard limit»), «linéaire» et «sigmoïde». Comme son nom l'indique, la fonction seuil applique un seuil sur son entrée. Plus précisément, une entrée négative ne passe pas le seuil, la fonction retourne alors la valeur 0 (on peut interpréter ce 0 comme signifiant faux), alors qu'une entrée positive ou nulle dépasse le seuil, et la fonction retourne à 1 (vrai). Utilisée dans le contexte d'un neurone, cette fonction est illustrée à la fig.IV.4 a. On remarque alors que le biais b dans l'expression de $y = \text{hard lim}(W_t x - b)$ détermine l'emplacement du seuil sur l'axe $W_t x$, où la fonction passe de 0 à 1. Nous verrons plus loin que cette fonction permet de prendre des décisions binaires.

Différents types de fonctions d'activation peuvent être utilisés à savoir :

Nom de la fonction	Relation entrée/sortie	Icône	Nom MATALB
Seuil	$a=0$ si $n < 0$ $a=1$ si $n \geq 0$		Hard Lim
Seuil symétrique	$a=-1$ si $n < 0$ $a=1$ si $n \geq 0$		Hard limas
Linéaire	$a=n$		Pure lin
Linéaire saturée	$a=0$ si $n < 0$ $a=n$ si $0 \leq n \leq 1$ $a=1$ si $n > 1$		Staline
Linéaire saturée symétrique	$a=-1$ si $n < -1$ $a=n$ si $-1 \leq n \leq 0$ $a=1$ si $n > 0$		Satins
Linéaire positive	$a=0$ si $n < 0$ $a=n$ si $n \geq 0$		Polin
Sigmoïde	$a = \frac{1}{1 + \exp^{-n}}$		Logis
Tangente hyperbolique	$a = \frac{e^n - e^{-n}}{e^n + e^{-n}}$		Tansig
Compétitive	$a = \text{si } n \text{ maximun}$ $a = 0 \text{ autrement}$		Compet

Tab. IV 2-Différentes fonctions d'activations utilisées dans les RNA.

La fonction de transfert sigmoïde est quant à elle illustrée à la fig.6.c. Son équation est donnée par :

$$y = \frac{1}{1 + \exp^{-x}} \quad (\text{IV.1})$$

Elle ressemble soit à la fonction seuil, soit à la fonction linéaire, selon que l'on est loin ou près de b , respectivement. La fonction seuil est très non linéaire car il y a une discontinuité lors que $W_t x = b$. De son côté, la fonction linéaire est tout à fait linéaire. Elle ne comporte aucun changement de pente. La sigmoïde est un compromis intéressant entre les deux précédentes. Notons finalement, que la fonction «tangente hyperbolique (tanh)» est une version symétrique de la sigmoïde.

IV.7 Architecture des réseaux de neurones

L'architecture d'un réseau de neurones est l'organisation des neurones entre eux dans un même réseau. En d'autres termes, il s'agit de la façon dont ils sont ordonnés et connectés. La plupart des réseaux de neurones utilisent le même type de neurones. Certaines architectures rares sont basées sur des neurones spécialisés. L'architecture du réseau de neurones dépend de la tâche à apprendre.

Un réseau de neurone est en général composé de plusieurs couches de neurones, des entrées jusqu'aux sorties. On distingue deux grands types d'architectures de réseaux de neurones : les réseaux de neurones non bouclés et les réseaux de neurones bouclés.

IV.7.1 Les réseaux de neurone non bouclés

Les réseaux de neurones acycliques exécutent une (ou plusieurs) fonctions algébriques de leurs entrées en combinant les fonctions exécutées par chaque neurone. Les réseaux de neurones acycliques sont représentés graphiquement par un ensemble de neurones "connectés" les uns aux autres, les informations circulant de l'entrée à la sortie sans "retour en arrière" ; si nous représentons le réseau sous forme de graphe, ses nœuds sont des neurones et les arêtes sont entre eux des "connexions". , Alors le graphe d'un réseau acyclique est acyclique. Le terme « connexion » est une métaphore : dans la grande majorité des applications, les réseaux de neurones sont des formules algébriques dont les valeurs sont calculées par des programmes informatiques plutôt que des objets physiques (circuits électroniques spécialisés) ; le terme connexion d'origine biologique a été utilisé car c'est pratique, si trompeur. Il a même donné naissance au terme de connexionnisme.

IV.7.2 Réseaux de neurones monocouches

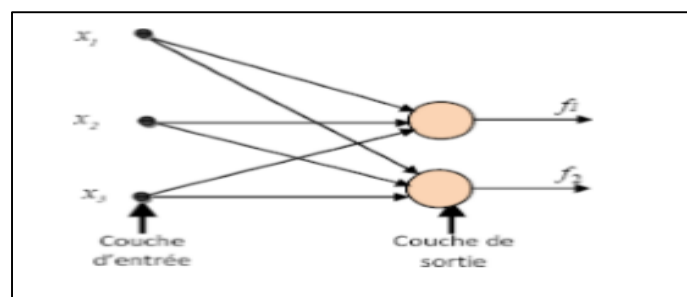


Fig. IV.4 : Schéma d'un réseau de neurones monocouche.

La structure d'un réseau monocouche est telle que des neurones organisés en entrée soient entièrement connectés à d'autres neurones organisés en sortie par une couche modifiable de poids (fig. IV.4).

IV.7.3 Réseaux de neurones multicouches

Les neurones sont arrangés par couche. Il n'y a pas de connexion entre neurones d'une même couche, et les connexions ne se font qu'avec les neurones de couches avales. Habituellement, chaque neurone d'une couche est connecté à tous les neurones de la couche suivante et celle-ci seulement. Ceci nous permet d'introduire la notion de sens de parcours de l'information (de l'activation) au sein d'un réseau et donc définir les concepts de neurone d'entrée, neurone de sortie. Par extension, on appelle couche d'entrée l'ensemble des neurones d'entrée, couche de sortie l'ensemble des neurones de sortie. Les couches intermédiaires n'ayant aucun contact avec l'extérieur sont appelées couches cachées. La fig.IV.5 représente un réseau de neurones non bouclé qui a une structure particulière, très fréquemment utilisée : il comprend des entrées, deux couches de neurones cachés et des neurones de sortie. Les neurones de la couche cachée ne sont pas connectés entre eux. Cette structure est appelée Perceptron multicouches, [38].

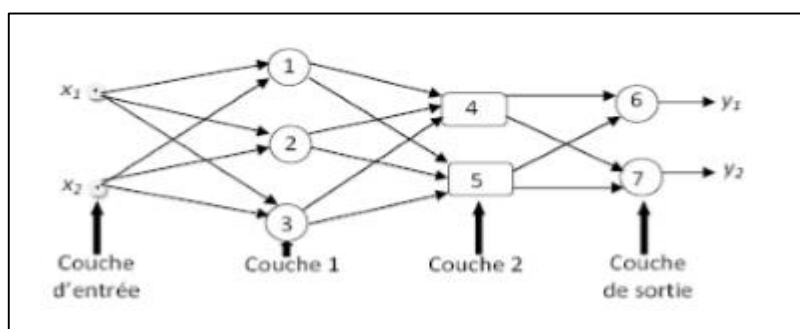


Fig. IV.5 : Schéma d'un réseau de neurones non bouclé (Perceptron multicouches).

On note aussi que Les réseaux multicouches sont beaucoup plus puissants que les réseaux simples à une seule couche. En utilisant deux couches (une couche cachée et une couche de sortie), à condition d'employer une fonction d'activation sigmoïde sur la couche cachée, on peut entraîner un réseau à produire une approximation de la plupart des fonctions, avec une précision arbitraire (cela peut cependant requérir un grand nombre de neurones sur la couche cachée).

IV.7.4 Les réseaux de neurones bouclés

Contrairement aux réseaux de neurones non bouclés dont le graphe de connexions est acyclique, les réseaux de neurones bouclés peuvent avoir une topologie de

connexions quelconque, comprenant notamment des boucles qui ramènent aux entrées la valeur d'une ou plusieurs sorties. Pour qu'un tel système soit causal, il faut évidemment qu'à toute boucle soit associé un retard : un réseau de neurones bouclé est donc un système dynamique, régi par des équations différentielles ; comme l'immense majorité des applications sont réalisées par des programmes d'ordinateurs, on se place dans le cadre des systèmes à temps discret, où les équations différentielles sont remplacées par des équations aux différences. Il s'agit donc de réseaux de neurones avec retour en arrière (feedback network or recurrent network), (fig. IV.6).

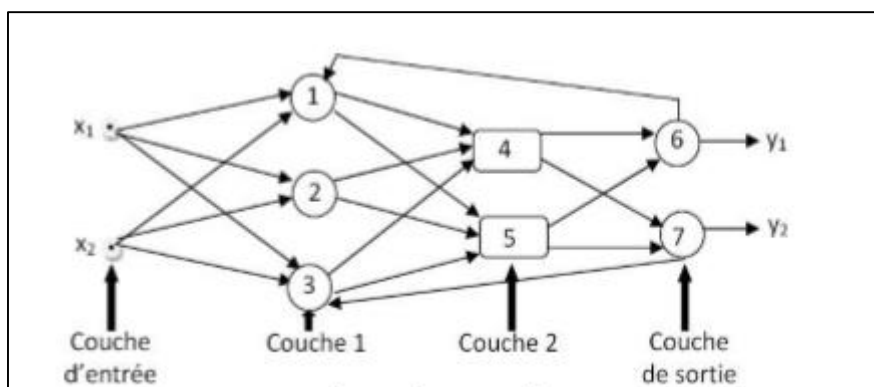


Fig.IV.6 : Schéma de réseau de neurones boucle.

Les réseaux de neurones boucles sont utilisés pour effectuer des tâches de modélisation de systèmes dynamiques, de commande de processus, ou de filtrage.

IV.8 L'apprentissage des réseaux de neurones

L'apprentissage et l'adaptation constituent deux caractéristiques essentielles des réseaux de neurones. Le rôle de l'apprentissage est de définir le poids de chaque connexion. De nombreuses règles existent pour modifier le poids des connexions et donc pour arriver à un apprentissage correct. Lorsque la phase d'apprentissage est achevée, le réseau doit être capable de faire les bonnes associations pour les vecteurs d'entrées qu'il n'aura pas appris. C'est l'une des propriétés importantes dans les réseaux de neurones, car elle permet de donner la capacité de reconnaître des formes ressemblantes et même dégradées des prototypes, c'est la phase de reconnaissance [40].

IV.8.1 Types d'apprentissage

IV.8.1.1 Apprentissage supervisé

L'apprentissage dit "supervisé" est caractérisé par la présence d'un « professeur » qui possède une connaissance approfondie de l'environnement dans lequel évolue le

réseau de neurones. En pratique les connaissances de ce professeur prennent la forme d'un ensemble de Q couples de vecteurs d'entrée et de sortie que nous noterons $(x_1, d_1), (x_2, d_2), \dots, (x_Q, d_Q)$, où x_i désigne un stimulus (entrée) et d_i la cible pour ce stimulus, c'est-à-dire les sorties désirées du réseau.

Chaque couple (x_i, d_i) correspond donc à un cas d'espèce de ce que le réseau devrait produire (la cible) pour un stimulus donné. Pour cette raison, l'apprentissage supervisé est aussi qualifié d'apprentissage par des exemples [41].

L'apprentissage supervisé est illustré d'une manière conceptuelle à la (fig.IV.7). L'environnement est inconnu du réseau. Celui-ci produit un stimulus x qui est acheminé à la fois au professeur et au réseau. Grâce à ses connaissances intrinsèques, le professeur produit une sortie désirée $d(t)$ pour ce stimulus. On suppose que cette réponse est optimale.

Elle est ensuite comparée (par soustraction) avec la sortie du réseau pour produire un signal d'erreur $e(t)$ qui est réinjecté dans le réseau pour modifier son comportement via une procédure itérative qui, éventuellement, lui permet de simuler la réponse du professeur. Autrement dit, la connaissance de l'environnement par le professeur est graduellement transférée vers le réseau jusqu'à l'atteinte d'un certain critère d'arrêt. Par la suite, on peut éliminer le professeur et laisser le réseau fonctionner de façon autonome.

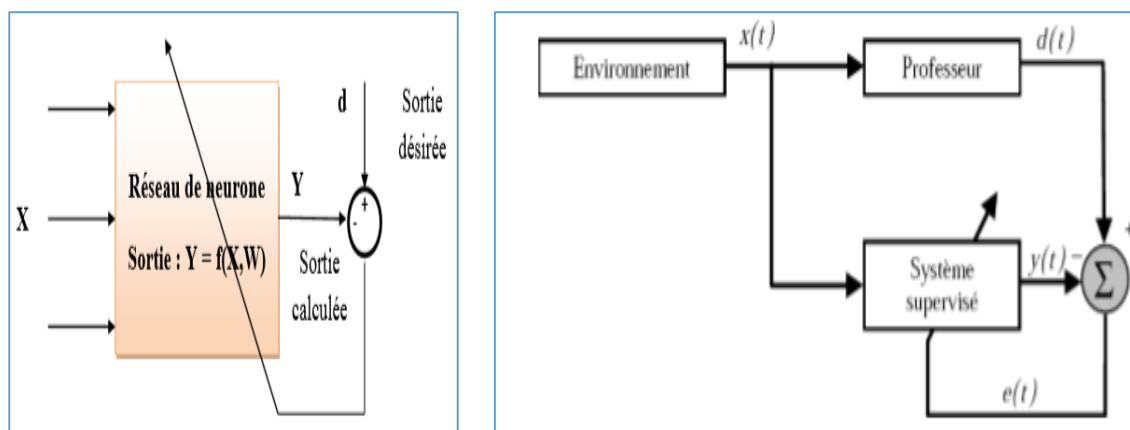


Fig. IV.7 : Schéma bloc de l'apprentissage supervisé.

Le lecteur attentif aura remarqué qu'un apprentissage supervisé n'est rien d'autre qu'un synonyme de l'apprentissage par correction des erreurs. Il possède donc les mêmes limitations, à savoir que sans professeur pour fournir les valeurs cibles, il ne

peut d'aucune façon apprendre de nouvelles stratégies pour de nouvelles situations qui ne sont pas couvertes par les exemples d'apprentissage.

IV.8.1.2 Apprentissage non supervisé

Cet apprentissage consiste à détecter automatiquement des régularités qui figurent dans les exemples présentés et à modifier des connexions pour que les exemples ayant les mêmes caractéristiques de régularité provoquent la même sortie. Les réseaux auto-organiseurs de Kohonen sont des réseaux à apprentissage non supervisé les plus connus.

IV.8.1.3 Apprentissage auto-supervisé

Le réseau de neurones évalue lui-même ses performances, sans l'aide d'un « professeur ». Un objet est présent à l'entrée du réseau de neurones, à qui on a indiqué la classe à laquelle appartient cet objet. Si le réseau ne le classe pas correctement, il mesure lui-même l'erreur qui le faite, le propage cette erreur vers l'entrée. Le réseau procède à autant d'itérations qu'il est nécessaire jusqu'à obtenir la réponse correcte

IV.9 Conception d'un réseau de neurones

Les réseaux de neurones réalisent des fonctions non linéaires paramétrées. Leurs mises en œuvre nécessitent :

- La détermination des entrées et des sorties pertinentes, c'est-à-dire les grandeurs qui ont une influence significative sur le phénomène que l'on cherche à modéliser.
- La collecte des données nécessaires à l'apprentissage et à l'évaluation des performances du réseau de neurones.
- La détermination du nombre de neurones cachés nécessaires pour obtenir une approximation satisfaisante.
- La réalisation de l'apprentissage.
- L'évaluation des performances du réseau de neurones à l'issue de l'apprentissage.

IV.10 Avantages et inconvénients des réseaux de neurones

IV.10.1 Avantage des réseaux de neurones

- Capacité de représenter n'importe quelle fonction, linéaire ou pas, simple ou complexe ;
- Faculté d'apprentissage à partir d'exemples représentatifs, par « rétro propagation des erreurs ». L'apprentissage ou construction du modèle est automatique ;
- Résistance au bruit ou au manque de fiabilité des données ;
- Simple à manier, beaucoup moins de travail personnel à fournir que dans l'analyse statistique classique. Aucune compétence en math, informatique statistique requise ;
- Comportement moins mauvais en cas de faible quantité de données ;
- Pour l'utilisation novice, l'idée d'apprentissage est plus simple à comprendre que les complexités des statistiques multi variables.

IV.10.2 Inconvénients des réseaux de neurones

- L'absence de méthode systématique permettant de définir la meilleure topologie du réseau et le nombre de neurones à placer dans la (ou les) couche (s) cachée (s) ;
- Le choix des valeurs initiales des poids du réseau et le réglage du pas d'apprentissage, qui jouent un rôle important dans la vitesse de convergence ;
- Le problème du sur-apprentissage (apprentissage au détriment de la généralisation);
- La connaissance acquise par un réseau de neurone est codée par les valeurs des poids synaptiques, les réseaux de neurones sont donc des boîtes noires où les connaissances sont inintelligibles pour l'utilisateur.

IV.11 Domaines d'application des réseaux de neurones artificiels

Aujourd'hui, les réseaux de neurones artificiels ont de nombreuses applications dans des secteurs très variés :

- Traitement d'images : reconnaissance de caractères et de signatures, compression d'images, reconnaissance de forme, cryptage, classification, etc.
- Traitement du signal : filtrage, classification, identification de source, traitement de la parole...etc.

- Défense : guidage des missiles, suivi de cible, reconnaissance du visage, radar, sonar, lidar, compression de données, suppression du bruit...etc.
- Optimisation : planification, allocation de ressource, gestion et finances, etc.
- Simulation : simulation du vol, simulation de boîte noire, prévision météorologique, recopie de modèle...etc.
- Contrôle : commande de processus, diagnostic, contrôle qualité, asservissement des robots, systèmes de guidage automatique des automobiles et des avions...etc. [39].

IV.12 Commande MPPT par réseaux de neurones

Nous gardons le contrôle MPPT avec asservissement de vitesse de turbine et on remplaçant le régulateur proportionnel et intégratif (PI) par le régulateur neuronale (ARN) plus puissant.

Pour notre cas, nous cherchons à construire un réseau simple capable d'apprendre le comportement de contrôle par le régulateur PI.

C'est pourquoi nous utilisons un algorithme de rétro-propagation appelé algorithme de Levenberg-Marquardt (LM) pour apprendre les poids des neurones à partir des régulateurs classique.

IV.13 Résultats de simulation

Remplace régulateur PI par un régulateur RN dans le contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique (fig.IV.8).

Lorsque le régulateur PI est remplacé par RN, ce processus comporte.

- Donner l'entrée et la sortie pour l'entraînement de (RN).

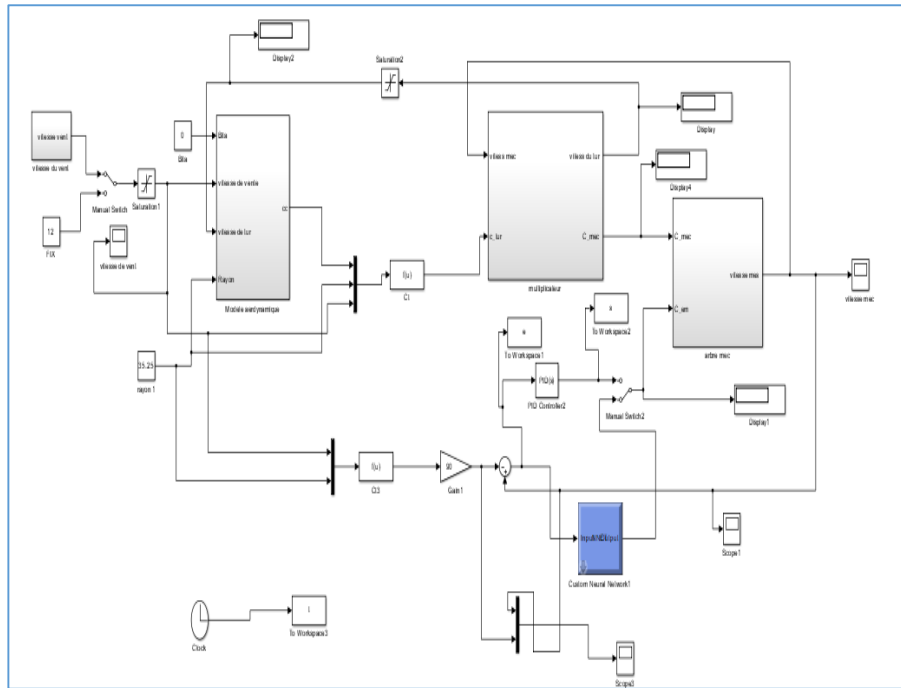


Fig. IV.8 : Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique par réseaux de neurones.

Type de réseau de neurones utilise entre système

Utilise entre système (Fig. IV.10).

Parmi les divers types de RNA existants, nous nous sommes penchés dans notre Étude sur le Perceptron Multicouches (MLP) non bouclé.

Les (MLP) utilisés une seule couche cachée contenant vingt neurones utilisant la Fonction de type « tangente sigmoïde », et une seule couche de sortie possédant un Seul neurone qui a une fonction d’activation « linéaire ».

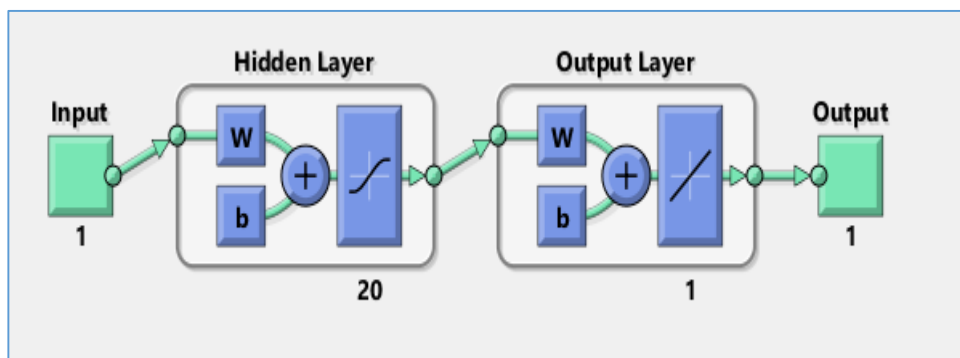


Fig. IV.9 : L'architecture du réseau de neurone proposé.

Les résultats de simulation obtenus avec la structure de commande intelligente par

réseaux de neurones est présente sur les figures suivantes:

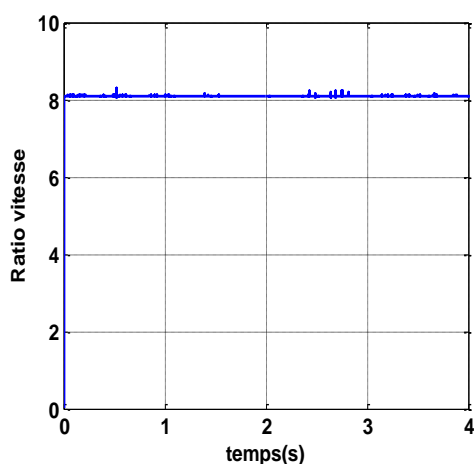


Fig. IV.10 : la vitesse Ratio en fonction temps.

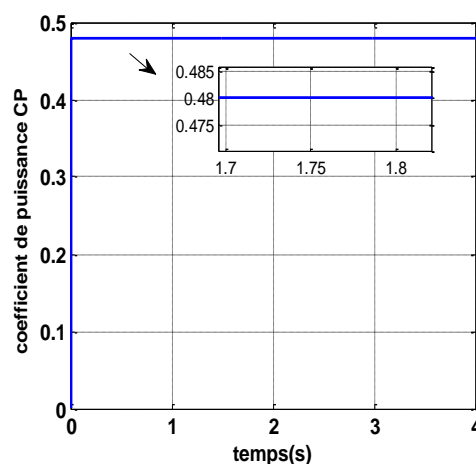


Fig. IV.11 : coefficient de puissance en Fonction de temps.

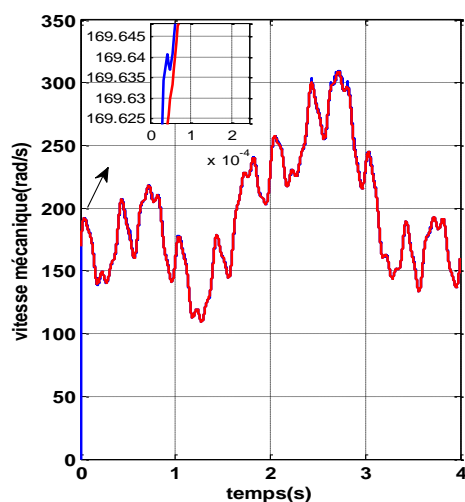


Fig. IV.12 : la vitesse mécanique en Fonction de temps.

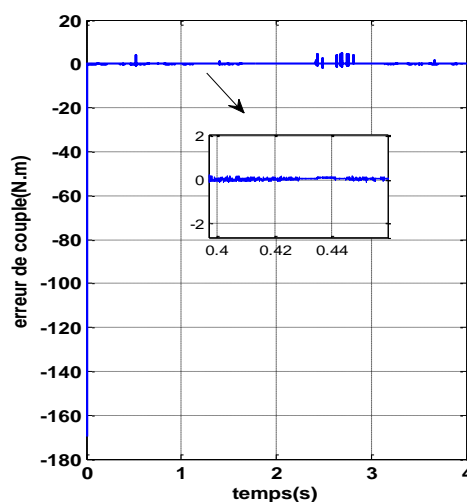


Fig. IV.13 : l'erreur de couple Electromagnétique

Les résultats obtenus montrent les meilleures performances statiques et dynamiques, meilleure poursuite de la consigne contrôlée (vitesse) et un temps de réponse très rapide et souhaitable offertes par le régulateur RN, avec la minimisation des oscillations en régime permanent au niveau de coefficient de puissance (Fig. IV.14) et (Fig. IV.11) et ratio de vitesse (Fig. IV.10) et la vitesse mécanique, en plus l'erreur de couple est adjacente à zéro plus rapidement (Fig. IV.13).

Test de robustesse ANN

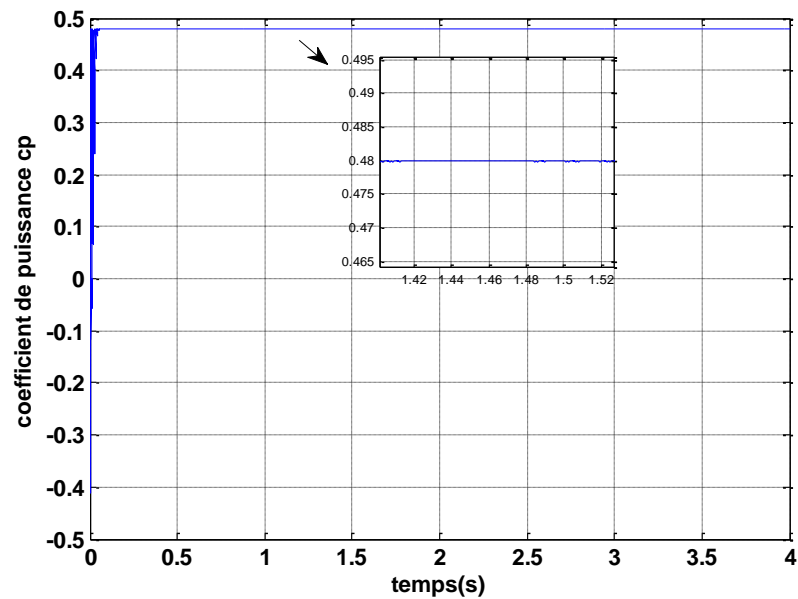


Fig. IV.14 : Test de robustesse vis-à-vis une variation de +50 % du moment d'inertie.

Nous avons obtenu d'une réponse très satisfaisante, l'impact de changement du moment d'inertie n'ont pas d'influence sur le C_p .

C'est un résultat qui nous permet de conclure que le contrôle ANN offre une solution très intéressante pour le contrôle de la vitesse des éoliennes et la robustesse face aux changements de paramètres.

IV.14 Comparaison PI, PSO et ANN

Les résultats obtenus dans les chapitres précédents, nous permettons d'effectuer une comparaison entre les trois types des régulateurs PI, PSO et le régulateur neuronal (RN), cette étape constitue une aide importante pour le choix de commande le plus robuste et performant.

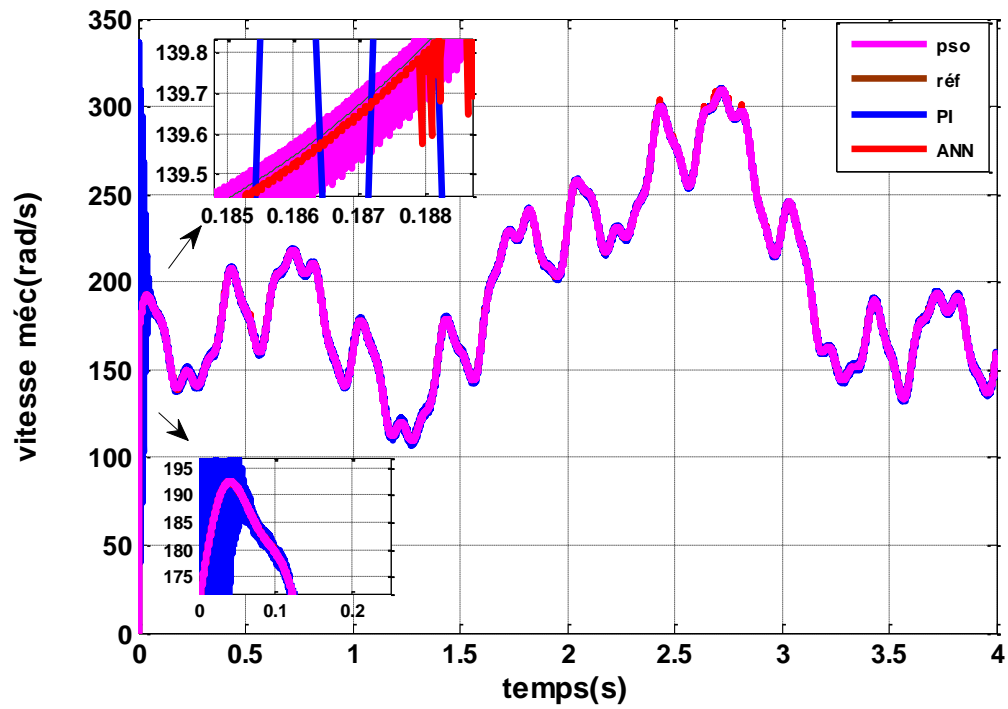


Fig IV. 15: vitesse mécanique PI,PSO et ANN.

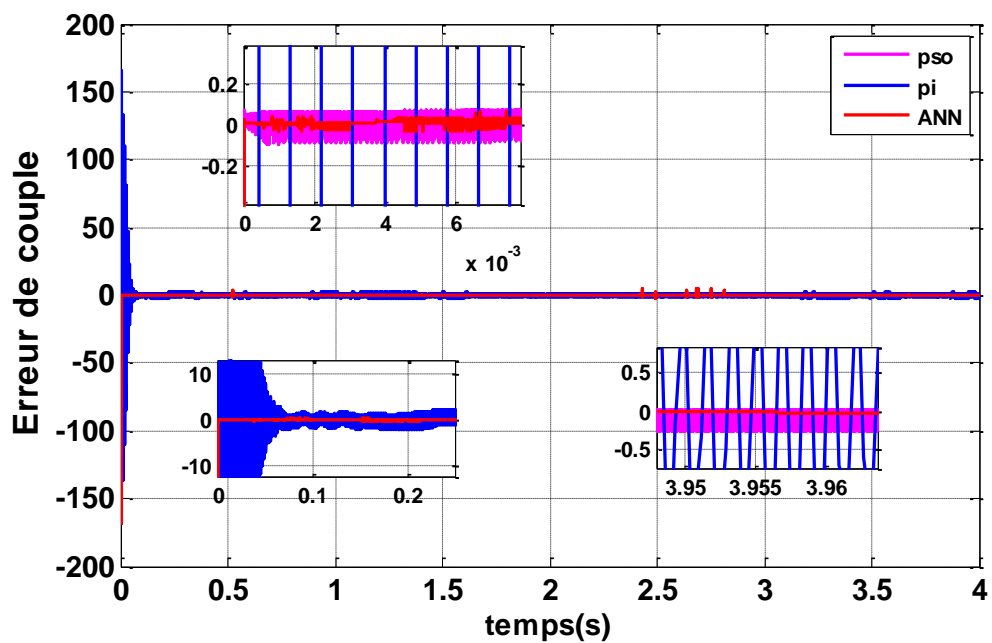


Fig IV. 16: l'erreur de couple électromagnétique PI,PSO et ANN.

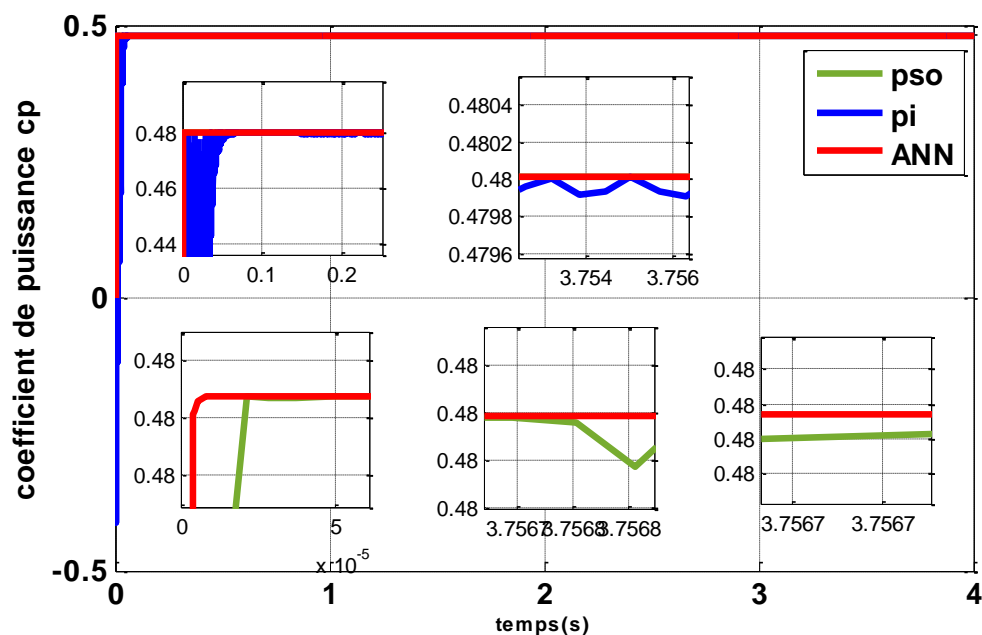


Fig IV. 17: coefficient de puissance PI, PSO et ANN.

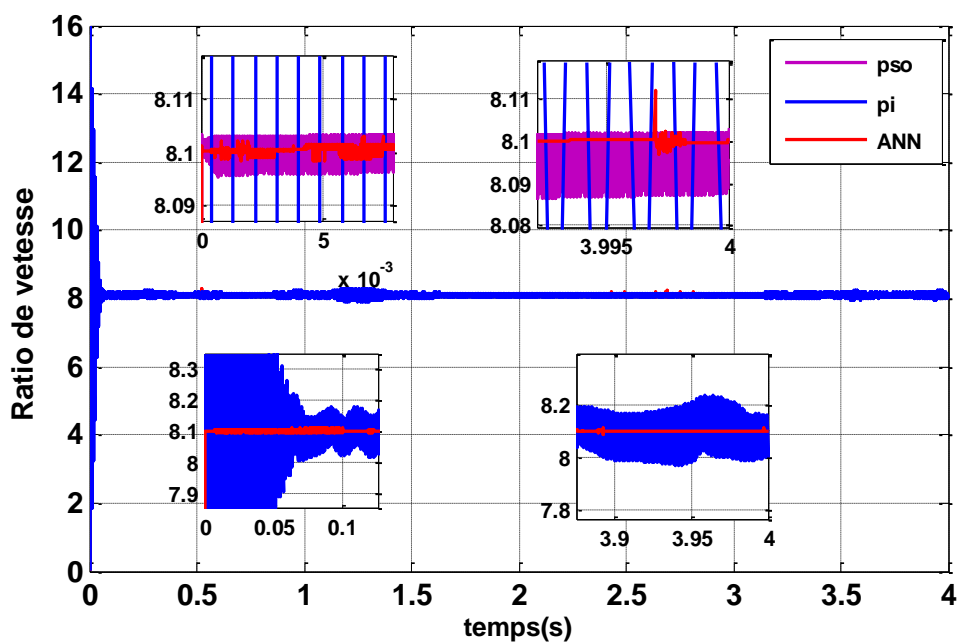


Fig IV. 18: la vitesse Ratio PI, PSO et ANN.

Afin de résumer ces résultats obtenus par les trois régulateurs PI, PSO et RN, la figure IV.15 montre la vitesse mécanique ainsi que sa référence obtenus avec les trois types de commande de la turbine, on peut voir qu'il y a un bon accord entre la vitesse du rotor et sa référence avec une meilleur adaptation à la vitesse par le régulateur RN, en plus l'erreur de couple est adjacente à zéro plus rapidement pour cette commande (Fig. IV.16).

Grâce aux bons contrôles de vitesse, le rendement de puissance C_p est bien ajusté sa valeur maximale par le contrôleur neuronal comme le montre la « Fig.IV.17».

Le régulateur RN minimise les oscillations en régime dynamique et permanent au niveau de coefficient de puissance (Fig. IV.17) et ratio de vitesse (Fig. IV.18)

A partir de ces résultats, nous avons observé que le contrôle basé sur des réseaux neuronaux est la méthode la plus efficace par rapport aux autres méthodes. Il atteint une puissance maximale avec une stabilité, de précision et un meilleur temps de réponse dans des conditions de vitesse de vent variable.

IV.15 test de robustesse PI,PSO,ANN

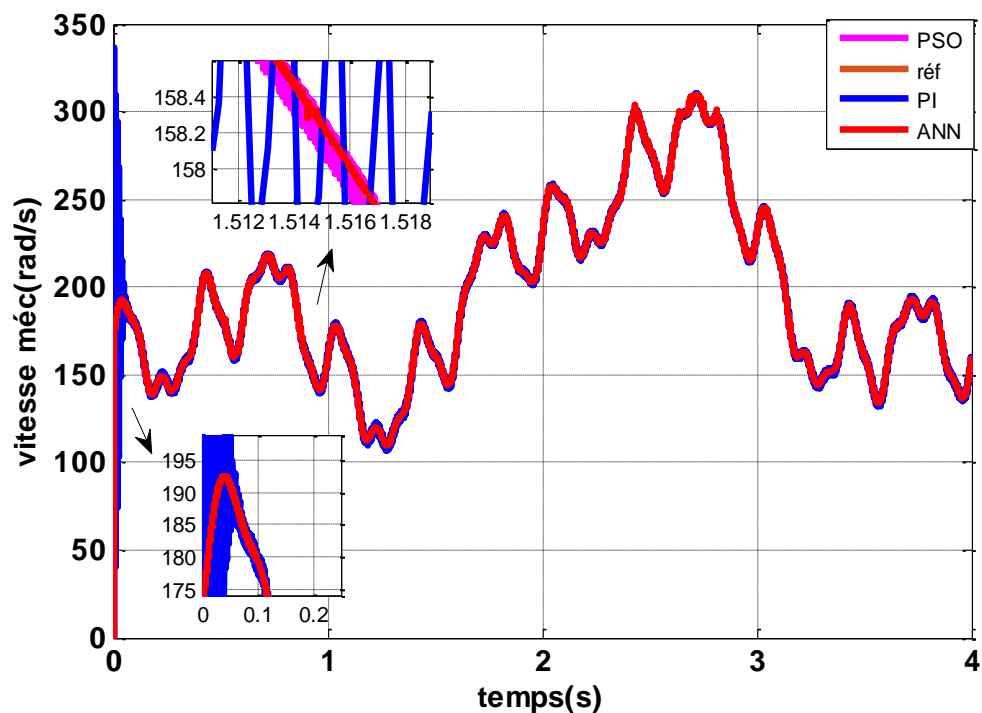


Fig IV. 19 : Test de robustesse vitesse méc contre une variation de +50% du moment d'inertie PI,PSO et ANN.

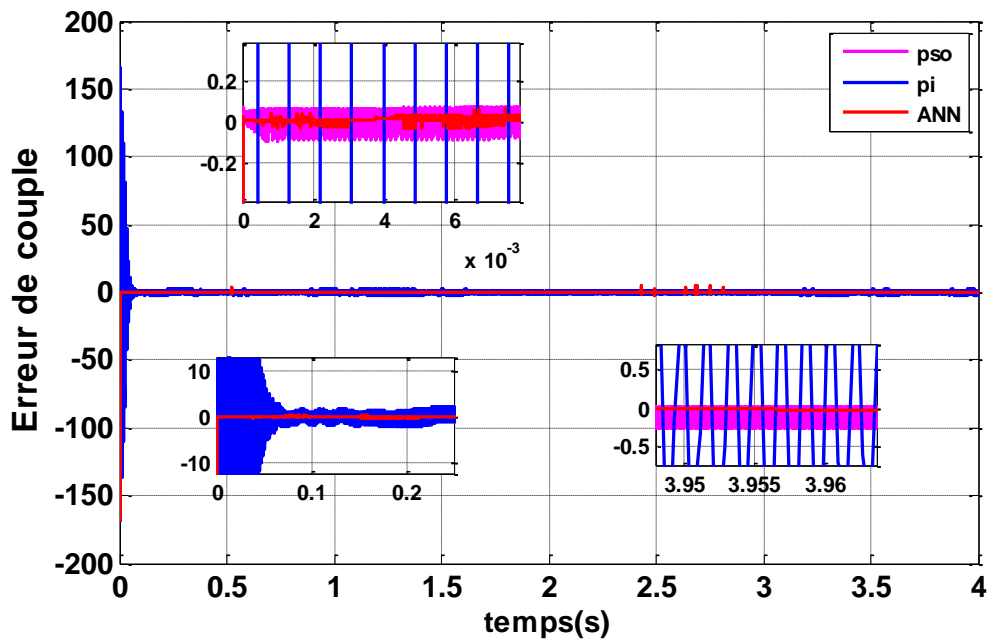


Fig IV. 20 : Test de robustesse erreur de couple contre une variation de +50% du moment d'inertie PI, PSO et ANN.

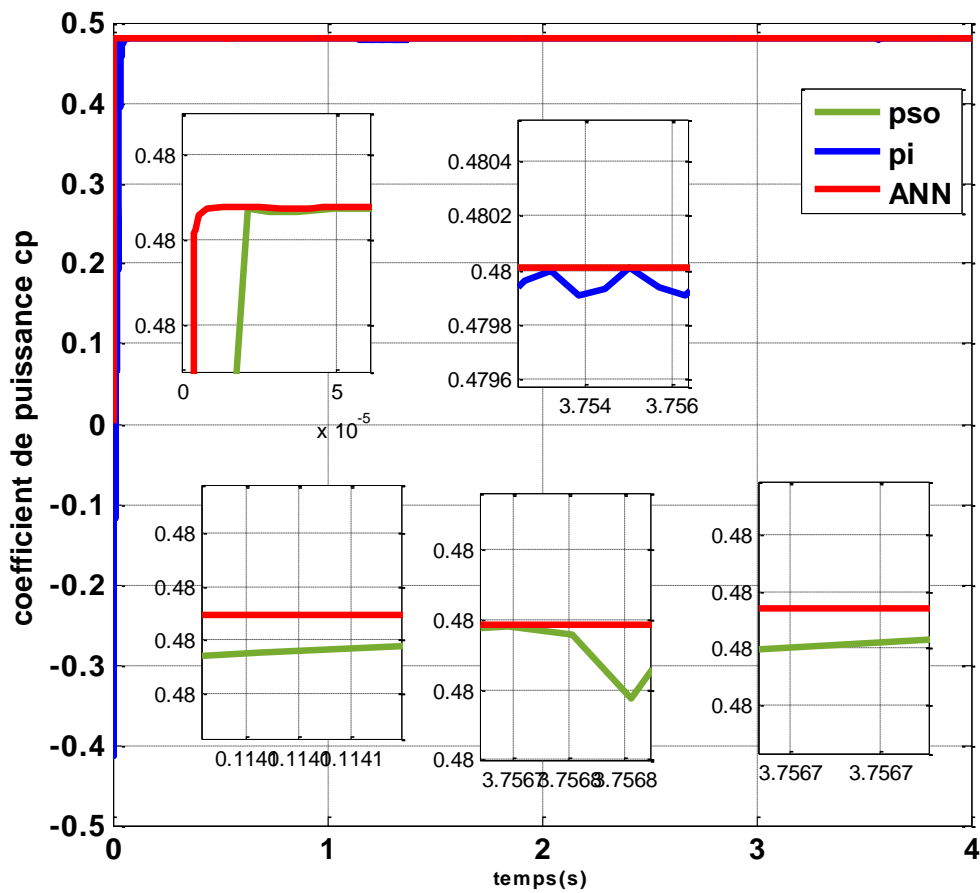


Fig IV. 21 : Test de robustesse CP contre une variation de +50% du moment d'inertie PI, PSO et ANN.

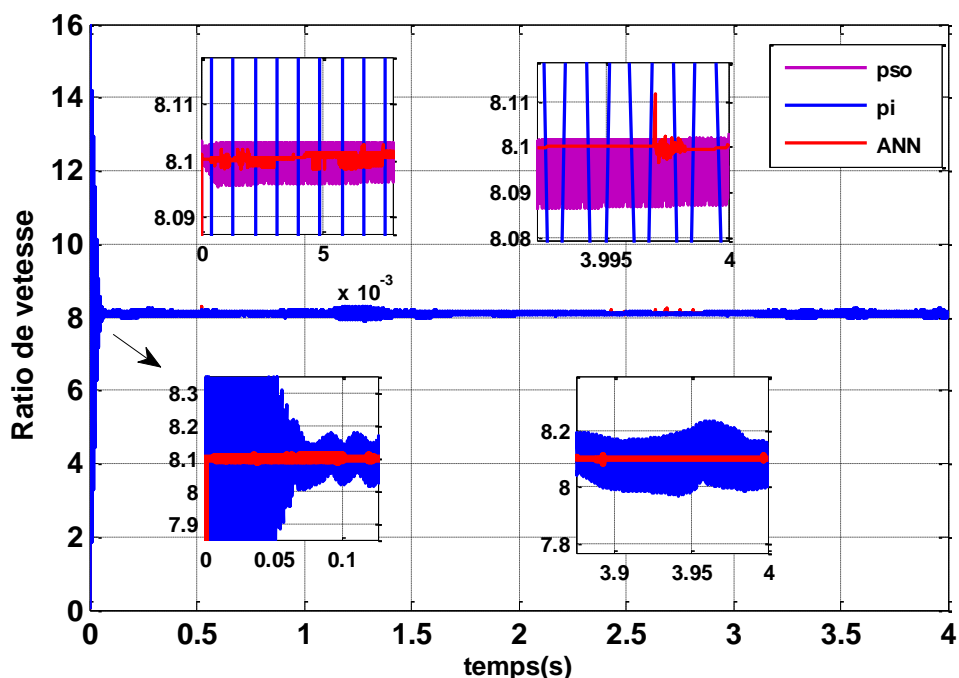


Fig IV. 22 : Test de robustesse vitesse de ratio contre une variation de +50% du moment d'inertie PI, PSO et ANN.

Les résultats de simulation obtenus sont montrés par les figures I.V.19, IV.20, IV.21 et IV.22, telle que on remarque que les régulateurs ANN et PSO présentent une robustesse claire en régime dynamique et statique par rapport au PI classique mais ANN le plus robuste.

C'est un résultat qui nous permet de conclure que le contrôle PSO offre une solution intéressante pour le contrôle de la vitesse des éoliennes et la robustesse face aux changements de paramètres. Le régulateur ANN par rapport à le régulateur PSO est très haut robuste. nous conduit à conclure que le régulateur par réseau de neurones est le régulateur le plus robuste avec un temps de réponse rapide, une bonne poursuite de référence et il ne présente aucune oscillation ou dépassements lors du régime transitoire. Ce régulateur présente une solution très attractive pour la commande en vitesse des turbines éoliennes.

IV.16 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les concepts de base des réseaux de neurone.

Dans la première partie de ce chapitre nous avons présenté quelques éléments essentiels qui permettent de comprendre pourquoi, et dans quels cas, il est avantageux de mettre en œuvre des réseaux de neurones artificiels (RNA).

Ce contrôleur est implanté dans la commande MPPT avec asservissement de vitesse de turbine.

Ensuite, nous avons analysé et comparé les résultats des différents régulateurs (PI, PI-PSO et RN) pour montrer les solutions les meilleures.

les résultats obtenus nous a permis de mettre en évidence la supériorité du régulateur par réseau de neurones.



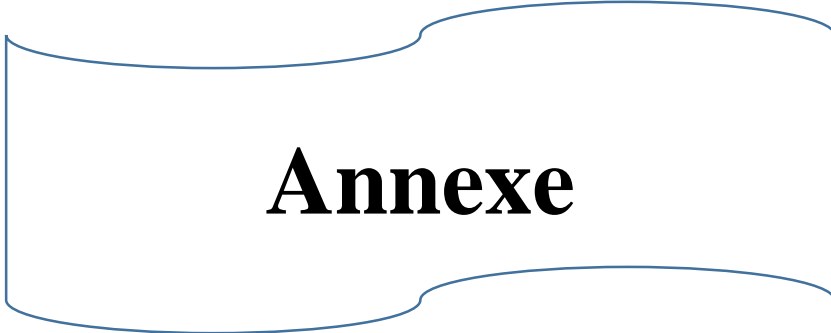
Conclusion Générale

Conclusion générale

Les objectifs principaux fixés dans le cadre de ce mémoire sont atteints, ils consistaient à élaborer une stratégie de commande permettant de répondre à des exigences spécifiques dans la zone de fonctionnement II des éoliennes à vitesse variable. Où le but est d'optimiser le rendement énergétique du système et donc extraire un maximum d'énergie éolienne.

Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement et les différentes stratégies de commande, L'étude d'une commande MPPT est alors étalée, dans le but d'extraire le maximum de puissance ensuite nous nous sommes intéressés, particulièrement à la stratégie de contrôle avec asservissement de la vitesse basé sur le régulateur classique.

Nous avons étudié dans ce travail l'apport des techniques avancées tels que les régulateurs PSO et neuronal. Ces trois commandes ont été testés et comparés afin d'analyser leurs performances en suivi de la meilleure valeur pour la puissance de la turbine, Le contrôle du réseau de neurones a été conservé afin d'améliorer la capacité de la turbine à se façonner et à donner de meilleures performances.



Annexe

ANNEXE A : 1. Paramètres de la turbine :

Significations	Symboles	Unités
Rayon de l'éolienne	R	35.25m
Surface de balayage des pales	S	Πr^2
Gain du multiplicateur de vitesse	G	90
La densité d'air	ρ	1.22
Inertie de l'arbre	J	1000
Coeffiiont de fronttemment	f	$0.0024N.m.S^{-1}$.

Tab. Annexe A. 1: Paramètres de la turbine.



Bibliographie

[1] H. Camblong, « minimisation de l'impact des perturbations d'origine eolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable »; thèse de doctorat, ensam, bordeaux, france, décembre 2003.

[2] <http://www.gwec.net/>.

[3] Ministère de l'énergie et des mines, Algérie;
<http://www.memalgeria.org/francais/index.php?page=enr>.

[4] J. Fortmann, «Modeling of Wind Turbines with Doubly Fed Generator System» 2015.

[5] P. Frédéric, « etude et commande de generatrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie eolienne –machine asynchrone à cage autonome -machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, » universite de nantes ecole, 2003.

[6] M. MAYOUF, « Contribution A La Modélisation De L'aérogénérateur Synchrone Aimants Permanents, »l'Université de Biskra, 2008.

[7] énergie éolienne <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm>.

[8] M. Mohamed Abdel basset « Modélisation et commande d'un system éolien à base d'une génératrice double alimentée sans balais »université ferhat abbas — setif ufas (algerie). 18/ 06/2012.

[9] O.GUERRI « L'Energie éolienne en Algérie '' Maitre de Recherche Classe A Directrice de la Division Energie Eolienne. juillet 2014.

[10] F. POITIERS, « etude et commande de generatrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie eolienne –machine asynchrone à cage autonome -machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, » UNIVERSITE DE NANTES ECOLE, 2003.

[11] B .TOUAL « Etude et Commande d'un Système Eolien à Base d'une Génératrice 0Asynchrone » mémoire de Magister, Université de BATNA, 2010.

[12] I .MENY, « Modélisation et réalisation d'une chaîne de conversion éolienne petite puissance» laboratoire d'électronique de Montpellier (LEM), soutenue le 14/12/2004.

[13] S. METATLA «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger,2009.

[14] A .BOYETTE «contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne» thèse de doctorat de L'université Henri Poincaré, Nancy, 2006.

[15] M. MAYOUF, « Contribution A La Modélisation De L'aérogénérateur Synchrone Aimants Permanents, » l'Université de Biskra, 2008.

[17] D. KAOUA and Y. ZIDELMAL, « Commande linéaire d'un éolienne basé sur la machine asynchrone double alimentation, » Université Ahmed Draïa Adrar, 2020.

[18] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B.DAKYO, C. NICHITA «état de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en, 2002.

[19] A. MIRECKI «etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat, inpt de france, 2005.

[20] B.sofiane «etude d'un système eolien à vitesse variable», université ferhat abbas – sétif ufas (algerie). 24/10/2012.

- [21] S. Belakhal, « conception et commande des machines à aimants dédiées aux énergies renouvelables », thèse de doctorat de l'université de constantine, 2010.
- [22] G. Abdel Karim « étude et commande d'une chaîne de conversion éolienne moyenne puissance raccordée au réseau moyenne tension » Université Mohamed Khider – Biskra 11 / 01 / 2017.
- [23] S. El Aimani, « modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension, » de l'école centrale de lille (ecl) co habilité avec l'université des sciences et technologies de lille i(ustl), 2004.
- [24] B. TOUAL, « modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable, » université de batna, 2010.
- [25] A. Abdelli, B. Sareni, and X. Roboam, "optimization of a small passive wind turbine generator with multiobjective genetic algorithms," *proc int j appl electromagn mech*, vol. 26, n° 1, pp. 175–182, 2007.
- [26] A. Dahbi, N. Nait-Said, and M. S. Nait-Said, "A novel combined MPPT-pitch angle control for wide range variable speed wind turbine based on neural network," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 41, no. 22, pp. 9427–9442, 2016, doi: 10.1016/j.ijhydene.2016.03.105.
- [27] M. BRIK NACIRA. « étude de l'importance du stabilisateur de système de puissance (pss) en présence des fermes éoliennes à vitesse variable » université de setif1 ufas (algerie), 24 / 06 / 2012.
- [28] F. Kendouli, K. Nabti, K. Abed, and H. Benalla, « modélisation, simulation et contrôle d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la génératrice asynchrone à double alimentation, » *rev. des énergies renouvelables*, vol. 14 n° 1, no. 5532, pp. 109–120, 2011, doi: 10.1136/bmj.1.5532.113-c.
- [29] B. E. Elnaghi, F. A. Elkader, M. M. Ismail, and A. E. Kalas, « adaptation of pi controller used with combination of perturbation and observation method and feedback method for dfig, *electr. eng* », vol. 100, no. 2, pp. 1047–1058, 2018, doi: 10.1007/s00202-017-0565-8.
- [30] N. HAMDI, « Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation en vue de son utilisation comme aérogénérateur, » université mentouri de constantine, 2008.
- [31] A. GAILLARD « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service » Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy-I, 2010.
- [32] A. Dhabi, Abderrahmane Khelfaoui, Boualam Benlahbib, Miloud Benmedjahed. « mppt fuzzy logic control of a variable speed wind turbine, ». article · juin 2022.
- [33] S. Ben Youcef Abou « commande mppt pour les systèmes photovoltaïques en utilisant pso » université djilali bounaama khemis miliana. 2019/2020.
- [34] Y. Cooren, « Perfectionnement d'un algorithme adaptatif d'optimisation par essaim particulaire - applications en génie médical et en électronique, » Thèse de Doctorat de l'Université Paris 12, Val de Marne, 2008.

- [35] Y. bekara « contribution à l'étude et à la commande robuste d'un aérogénérateur asynchrone à double alimentation »université mohamed khi der – biskra. 21/10/2014.
- [36] J.Kennedy, and Spears, W. M. « matching algorithms to problems: an experimental test of the particle swarm and some genetic algorithms on the multimodal problem generator», proceedings of the 1998 ieee international conference on evolutionary computation (held in anchorage, ak), 1998.
- [37] J.SOBIESZCZANSKI-SOBIESKIA « Parallel Particle Swarm Optimization Algorithm Accelerated by Asynchronous Evaluations''Vanderplaats Research and development, colorado springs, usa nasa langley research center, hampton», USA. Rio de Janeiro, 30 May - 03 June 2005, Brazil.
- [38] P. Wira, “ approches neuromimetiques pour l'identification et la commande ”; habilitation à diriger des recherches, universite de haute alsace, france, novembre 2009.
- [39] Y. DJERIRI « Commande directe du couple et des puissances d'une MADA associée à un système éolien par les techniques de l'intelligence artificielle »; Doctorat en Sciences, universite djillali liabes de sidi-bel-abbes, 05 /11/2015.
- [40] S. BOUHAFNA « Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone Apport des Réseaux de Neurones » ; MAGISTERE EN ELECTROTECHNIQUE / ,2013.
- [41] I. YAICHI " Contribution à l'amélioration de la qualité d'énergie électrique d'un système éolien basé sur la MADA" Doctorat en Electrotechnique, universite djillali liabes de sidi-bel-abbes, 14 /11 //2019.

Résumé : Le but de ce travail est de présenter la production d'électricité au réseau électrique dépendant d'une turbine à vitesse variable pour atteindre l'utilisation maximale de son énergie, où nous avons divisé notre travail en deux parties, où nous avons consacré la première partie dans l'ordre pour obtenir le maximum d'énergie éolienne par la stratégie MPPT avec ou sans contrôle de vitesse. Notre deuxième objectif était d'appliquer des technologies intelligentes afin de contrôler et d'obtenir de meilleurs résultats pour la grande énergie.

En utilisant la technique de l'intelligence artificielle, les réseaux de neurones, nous avons également analysé et comparé les outils de ces régulateurs utilisés dans le système susmentionné. Les performances de l'appareil ont été analysées et comparées en termes de suivi, car il a obtenu de meilleurs résultats que les contrôleurs PI et PID traditionnels les plus utilisés.

Mots clés :

Eolienne, stratégie MPPT, contrôle MPPT intelligent par réseaux de neurones, optimisation de l'essaim de particules.

Abstract: The purpose of this work is to present the generation of electricity to the power grid depending on a variable speed turbine to achieve the maximum use of its energy, where we have divided our work into two parts, where we have devoted the first part in order to get the maximum wind power by MPPT strategy with or without speed control. Our second goal was to apply smart technologies to control and achieve better results for big energy.

Using the technique of artificial intelligence, neural networks, we also analyzed and compared the tools of these regulators used in the above-mentioned system. The performance of the device was analyzed and compared in terms of tracking, as it performed better than the most widely used traditional PI and PID controllers.

Keywords:

Wind turbine, MPPT strategy, intelligent MPPT control by neural networks, optimization of the particle swarm.

ملخص: ان الهدف من هذا العمل تقديم إنتاج الكهرباء للشبكة الكهربائية اعتمادا على توربين متغيرة السرعة للوصول لاستغلال أقصى طاقة لها حيث قسمنا عملنا إلى قسمين حيث خصصنا القسم الأول من أجل الحصول على أقصى قدر من طاقة الرياح بواسطة استراتيجية MPPT مع أو بدون التحكم في السرعة. هدفنا الثاني كان تطبيق تقنيات ذكية من أجل التحكم والوصول إلى نتائج أفضل للطاقة العظمى.

باستعمال خوارزمية تحسين سرب الجسيمات وتقنية الذكاء الاصطناعي الشبكات العصبية، كما قمنا بتحليل ومقارنة أدوات هذه المنظمات المستعملة في النظام المذكور سالفًا. وقد تم تحليل أداء الجهاز ومقارنة من حيث تتبع، حيث حققت نتائج أفضل من المتحكمات التقليدية PI و PID المستخدمة في الغالب.

الكلمات المفتاحية: نظام الرياح، استراتيجية تعظيم الطاقة MPPT، تحكم ذكي MPPT بواسطة الشبكات العصبية، تحسين سرب الجسيمات.