

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Abderrahmane Mira Bejaia
Faculté de la technologie
Département de Génie Electrique

Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du diplôme Master en Automatique

Thème

Commande MPPT d'un Aérogénérateur
basée sur des observateurs neuro-flou

Réalisé par :

Mr. FERGANE Salem

Promoteur: Mr. B. MENDIL

Co-promotrice: M^{lle}. F.ACHOURI

Membres de jury :

Examineur 1 : Mr. A.Y. ACHOUR.

Examineur 2 : Mme. N.BELLAHSENE.

Promotion : 2012/2013

Remerciements

Je tiens à remercier le bon DIEU qui m'a donné la patience et le courage pour mener ce travail jusqu'au bout.

Mes vifs remerciements pour mon promoteur M^r MENDIL Boubekeur

Et ma co-promotrice M^{lle} ACHOURI Fouzia pour leur aide, leur suivi et conseils.

Je tiens à remercier également :

Les membres de jury d'avoir accepté de juger mon travail.

En fin je remercie à travers ce travail tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Salem

Dédicace

Salém



À ceux qui m'ont tout donné sans rien en retour

À ceux qui m'ont encouragé et soutenu depuis toujours

Et ceux à qui je dois tant

À 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.

À mon frère et mes sœurs : Moumouh, Fouzia, Lila, Salima, Djahida Zahra.

À mes neveux : Ali, Aya, Amir.

À mes chers tantes et oncles.

À mes cousins et cousines

À mes adorables amis : Sabrina, Halim, Menad, Fares, Nacer.

À tous ceux que j'aime et qui m'aiment.

Table des matières

Liste des figures

Introduction générale	1
I. Généralités sur les systèmes éoliens	3
I.1 L'aérogénérateur	3
I.2. Les différents types d'éoliennes	3
I.2.1. Les éoliennes à axe vertical	4
I.2.2. Le rotor de Darrieus	4
I.2.3. Le rotor de Savonius	5
I.2.4. Les éoliennes à axe horizontal	5
I.3 Composants de l'aérogénérateur	6
I.4. Stratégie de fonctionnement de l'aérogénérateur	7
I.4.1. Bilan des forces sur la pale	7
I.4.2. Moyen de réglage de la conversion d'énergie	8
I.4.3. Système à pas variable « pitch »	8
I.4.4. Système à décrochage aérodynamique ou système « stall »	9
I.5. La conversion électromécanique	9
I.5.1. Fonctionnement à vitesse fixe	10
I.5.2. Fonctionnement à vitesse variable	10
I.6. Type d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens	11
I.6.1. Structure à base de la machine synchrone	11
I.6.2. Structure à base de la machine asynchrone à cage	11
I.6.3. Structure à base de la machine asynchrone à double alimentation MASDA	12
I.7. Conclusion	13
II. Modélisation de l'éolienne	14
II.1. Introduction	14
II.2. Conversion de l'énergie éolienne	14

II.2.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	14
II.2.2. Loi de Betz	15
II.2.3. La vitesse spécifique (Tip-Speed-Ratio)	16
II.2.4. Le coefficient de puissance (power coefficient)	16
II.2.5. Le coefficient de couple (torque coefficient)	17
II.2.6. Courbe caractéristique de la turbine éolienne	18
II.2.7. Production d'énergie mécanique	19
II.2.7.1. La caractéristique de la puissance optimale de l'éolienne	19
II.3. Modélisation de la turbine éolienne	20
II.3.1. Hypothèse simplificatrice pour modélisation mécanique de la turbine	20
II.3.1.1 Vitesse du vent continument variable	21
II.3.2. Modélisation de la turbine	22
II.3.3. Modèle aérodynamique	23
II.3.3.1 Modèle analytique du coefficient de puissance	24
II.3.4. Modèle du multiplicateur	24
II.3.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission	24
II.3.6. Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable	26
II.3.7. Méthode de recherche du point maximum de puissance	27
II.3.7.1. Bilan des puissances	27
II.3.7.2. Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse	29
II.3.7.3. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse sans estimation de la vitesse du vent	30
II.3.7.4. Maximisation de la puissance avec estimation de la vitesse du vent	31
II.3.7.4.1. Estimation par filtrage de Kalman	31
II.4. Conclusion	33
III. Logique flou	34
III.1 Introduction	34
III.2 Bases générales de la logique floue	34
III.2.1 Ensembles flous	35
III.2.2 Variable et valeurs de variable linguistique	36
III.2.3 Fonction d'appartenance	38

III.2.4. Règles et opérateurs flous	38
III.3. Structure interne d'un système flou	39
III.3.1. Interface de fuzzification	40
III.3.2 Inférences avec la base des règles	40
III.3.3. Méthode Max-min	42
III.3.4. Défuzzification (Passage du symbolique vers le numérique)	43
III.3.4.1. La méthode de centre de gravité COG	43
III.3.4.2. La méthode de maximum	43
III.3.4.3. La méthode de la moyenne des maxima	43
III.4. Structure du contrôleur flou	43
III.5. Estimation par le contrôleur flou	44
III.6. Configuration du contrôleur flou	44
III.6.1. Fuzzification et défuzzification	44
III.6.2. Variables linguistiques	46
III.6.3. Base des règles	46
III.7. conclusion	48
IV. Réseaux de neurones	49
IV.1 Réseaux de neurones	49
IV.1.1 Un modèle biologique	49
IV.1.2 Le neurone formel	50
IV.1.3 Réseaux non bouclés	52
IV.1.4 Réseaux bouclés	53
IV.1.5. Apprentissage dans les réseaux de neurones	54
IV.1.5.1. Apprentissage supervisé	54
IV.1.5.2. Apprentissage semi-supervisé	54
IV.1.5.3. Apprentissage non supervisé	54
IV.1.6. Algorithme de rétro-propagation du gradient	55
IV.1.6.1. Règle de Hebb	55
IV.1.6.2. Rétro-propagation du gradient de l'erreur	55

IV.2. Type d'Application du Réseau	55
IV.2.1. Réseaux pour l'Approximation de Fonctions	56
IV.2.2. Réseaux pour la Classification	56
IV.3. Le perceptron monocouche à deux entrées	56
IV.4. Estimation de la vitesse du vent par un RNA	57
IV.4.1. Procédure Entraînement du réseau de neurone	58
IV.4.2. Stratégie de contrôle avec compensation de coefficient de puissance	59
IV.5. Conclusion	60
V. Résultats de simulation et discussions	61
V.1 profil du vent	61
V.2 MPPT avec asservissement de la vitesse	61
V.2.1 la vitesse de rotation (W_r)	65
V.2.2 la puissance mécanique (P)	65
V.3. MPPT avec estimateur de Kalman	66
V.4. MPPT avec estimateur flou	67
V.5. MPPT avec estimateur neuronal (RNA)	68
V.6. Table comparative des trois méthodes d'estimations	69
 Conclusion générale	 71
 Références bibliographiques.	

Liste des figures

Figure I-1 : Les deux types d'éoliennes	3
Figure I-2 : Schéma de principe du rotor de Darrieus	4
Figure I-3 : Schéma de principe du rotor de Savonius.....	5
Figure I-4 : Bilan des forces sur une section de pale	8
Figure I-5 : Variation de l'angle de calage d'une pale.....	9
Figure I-6 : Structure MS.....	11
Figure I-7 : Structure MAS à vitesse fixe.....	12
Figure I-8 : Schéma de principe d'un entraînement à vitesse variable-machine asynchrone à double alimentation MAS	12
Figure I-9 : Processus de conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique	13
Figure II-1 : Colonne d'air animée d'une vitesse v	14
Figure II-2 : Tube de courant autour d'une éolienne	15
Figure II-3 : coefficients C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour différentes β	18
Figure II-4 : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation	19
Figure II-5 : Représentation du système éolien	20
Figure II-6 : Modèle simplifié de la turbine éolienne.....	21
Figure II-7 : Schéma de la turbine éolienne.....	22
Figure II-8 : Profil du vent utilisé.....	23
Figure II-9 : Organigramme de simulation de la turbine éolienne	25
Figure II-10 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....	26
Figure II-11 : Les quatre zones de fonctionnement de la turbine	27
Figure II-12 : Diagramme de conversion de puissance	28
Figure II-13 : Stratégies de commande de la turbine étudiée	28

Figure II-14 : MPPT sans asservissement de la vitesse	30
Figure II-15 : Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse	31
Figure II-16 : Estimateur du couple aérodynamique et de la vitesse du vent.....	33
Figure III-1 : Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et flous.....	35
Figure III-2 : Variable linguistique.....	36
Figure III-3 : La partition supérieure ne peut s'interpréter en termes linguistiques.....	37
Figure III-4 : a/ Forme triangulaire, b/ Forme trapézoïdale, c/ Forme gaussienne	38
Figure III-5 : Structure interne d'un système flou.....	39
Figure III-6 : Univers de discours normalisé uniforme de 5 ensembles.....	40
Figure III-7 : Matrice de Macvicar et Whelan à neuf règles	41
Figure III-8 : Méthode d'inférence Max-Min	42
Figure III-9 : Contrôler flou	44
Figure III-10 : Fonction d'appartenance de la vitesse de rotation Ωr	45
Figure III-11 : Fonction d'appartenance de la puissance P_m	45
Figure III-12 : Fonction d'appartenance de la vitesse estimée Ω^* (sortie)	45
Figure III-13 : Matrice d'inférence du régulateur flou.....	46
Figure III.14 : Schéma bloc du modèle de la turbine avec le contrôleur flou	47
Figure IV-1 : Un modèle biologique.....	50
Figure IV-2 : Modèle de base d'un neurone formel	50
Figure IV-3 : Les différentes fonctions d'activation pour les neurones	51
Figure IV-4 : Perceptron à une couche	52
Figure IV-5 : Réseaux de neurones récurrents.....	54
Figure IV-6 : Modèle du Perceptron monocouche à deux entrées.....	56
Figure IV-7 : Schéma bloc de l'estimation de la vitesse du vent de la turbine.....	57

Figure IV-8 : Structure de l'estimateur RNA avec cinq neurones caché avec tan-sigmoïde et un neurone linéaire en sortie	57
Figure IV-9 : Algorithme d'entraînement d'un réseau multicouche par la rétro-propagation	58
Figure IV-10 : Module de commande à base RNA de la vitesse du rotor de la turbine	59
Figure IV-11 : Schéma bloc du modèle de la turbine avec le contrôleur neuronal.....	59
Figure V-1 : Profil du vent	61
Figure V-2 : $C_p=f(W_r)$	61
Figure V-3 : $C_p=f(W_r)$	62
Figure V-4 : $C_p=f(\text{Lambda})$	62
Figure V-5 : $P=f(\text{Lambda})$	63
Figure V-6 : Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.....	63
Figure V-7 : $P=f(\text{Lambda})$	64
Figure V-8 : $P=f(wr)$	64
Figure V-9 : $\Omega r=f(t)$	65
Figure V-10 : $P=f(t)$	65
Figure V.11 Vitesse de rotation et le couple mécanique	66
Figure V.12 Vitesse du Vent estimée par Kalman	66
Figure V-13 : Résultats de simulation puissance mécanique	66
Figure V-14 : Erreur de vitesse	67
Figure V.15 : Vitesse de rotation	67
Figure V.16 : Vitesse du vent.....	67
Figure V.17 : Erreur de Vitesse.....	68
Figure V.18 : Vent estimé par RNA.....	68
Figure V.19 : Vitesse mécanique	68
Figure V.20 : Erreur de vitesse	69

Figure V. 21: Estimation de la Vitesse mécanique par les trois estimateurs	70
Figure V. 22: Estimation de la vitesse du vent par des trois estimateurs	70

Introduction générale

La consommation mondiale d'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années. Ceci revient à l'industrialisation massive qui a tendance de s'amplifier de plus en plus et, plus précisément, dans certaines zones géographiques notamment dans les pays de l'Asie [COG04]. Les risques de pénurie des matières fossiles et leurs effets sur le changement climatique, dénotent encore une fois de l'importance des énergies renouvelables. Plusieurs sources des énergies renouvelables sont en cours d'exploitation et de recherche. Le but est de développer des techniques d'extraction de puissances visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage, et de recyclage), et d'augmenter l'efficacité énergétique [MIR05].

Dans ce contexte général, notre étude porte sur la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique qui est devenue compétitive grâce aux trois facteurs essentiels [CUN01] :

- la nature motivante de cette énergie,
- le développement de l'industrie des éoliennes,
- l'évolution de la technologie des semi-conducteurs, ainsi que les nouvelles méthodologies de contrôle des turbines à vitesses variables.

Néanmoins, plusieurs problèmes rencontrés liés, d'une part, à la complexité des systèmes de conversion éolienne telle que la nécessité du multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice et, d'une autre part, l'instabilité de la vitesse du vent [MAY08].

Le but de notre travail est de concevoir un modèle d'un aérogénérateur à attaque direct basé sur une structure performante, et différentes stratégies permettant de contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique de manière à maximiser la puissance mécanique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne à axe horizontale.

Dans notre étude on s'est focalisé sur la structure de commande d'optimisation de la puissance produite, qui est le contrôle par asservissement de la vitesse mécanique avec ou sans estimation de la vitesse du vent.

L'utilisation d'un unique anémomètre sur l'aérogénérateur conduit à utiliser une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est pas représentative de la valeur moyenne de la vitesse du vent apparaissant sur les pales. Une mesure erronée de la vitesse du vent conduit à

une valeur erronée de la vitesse de référence à imposer au générateur et donc une dégradation de la puissance extraite. Pour cette raison, nous proposons ici d'utiliser les techniques avancées pour l'observation basés sur la logique floue et les réseaux de neurones.

Structure du mémoire

Le premier chapitre présente des généralités sur les systèmes éoliens. Des notions de base de la technologie éolienne sont ainsi introduites. Quelques exemples d'architectures de chaînes de conversion d'énergie sont cités en association avec les différents types de génératrices.

Le second chapitre est dédié à l'étude du système de conversion aérodynamique comportant, essentiellement, les caractéristiques et stratégies de fonctionnement de l'éolienne. Un modèle analytique de la turbine éolienne, a été conçu en utilisant différentes méthodes d'optimisation de puissance. Elle comporte aussi un estimateur de Kalman pour l'estimation de la vitesse du vent et le couple aérodynamique.

Le troisième chapitre est consacré à la description d'un observateur flou. Ce dernier est utilisé pour estimer la vitesse du vent et la vitesse de rotation de la turbine éolienne.

Le quatrième chapitre, présente les concepts de base des réseaux de neurone, ainsi le concept d'un observateur neuronal pour l'estimation de la vitesse du vent de la turbine éolienne

Le cinquième chapitre est dédié aux discussions des résultats de simulation et une étude comparative entre les trois observateurs.

CHAPITRE I

Généralités sur les systèmes éoliens

I. Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 L'aérogénérateur

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [GHE11]:

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

I.2. Les différents types d'éoliennes

Selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice on classe les éoliennes en deux types ; les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal (Figure I.1). Que l'éolienne soit à axe vertical ou horizontal, il s'agit de générer un couple moteur pour entraîner la génératrice [GOU82].



Figure I. 1 Les deux types d'éolienne

I.2.1. Les éoliennes à axe vertical

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

Cependant, les vents sont faibles à proximité du sol, ce qui induit un moins bon rendement. De plus, ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mât subit de fortes contraintes mécaniques. Pour ces raisons, de nos jours, les constructeurs d'éoliennes privilégient les éoliennes à axe horizontal.

I.2.2. Le rotor de Darrieus

C'est la structure la plus répandue; le fonctionnement de son rotor est basé sur le principe de la variation cyclique d'incidence. Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles, est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif (Figure. I.2).

Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe.

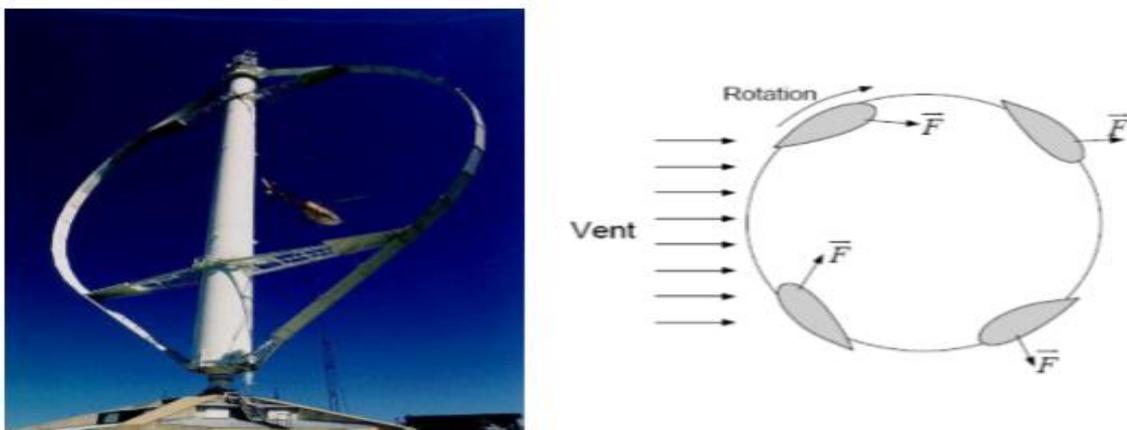


Figure I. 2 Schéma de principe du rotor de Darrieus

I.2.3. Le rotor de Savonius

Son fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble (Figure I.3). L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur [ZIO08].

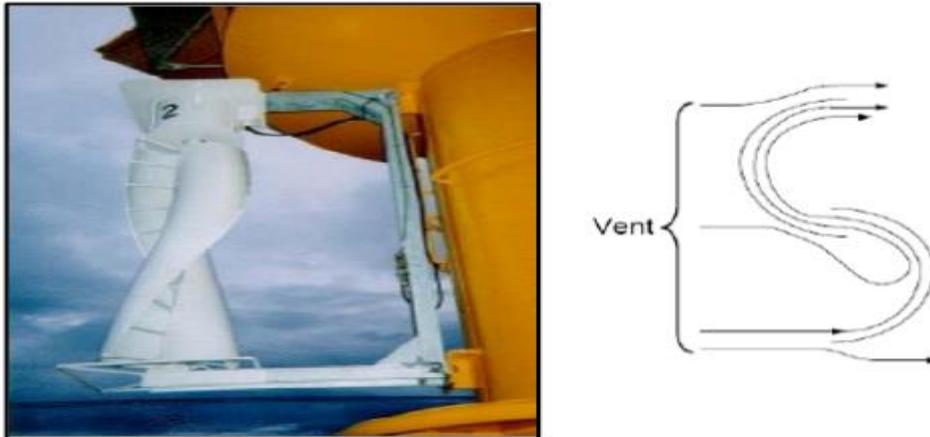


Figure I.3 Schéma de principe du rotor de Savonius

I.2.4. Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituée d'une à trois pales profilées aérodynamique et la circulation du flux d'air dans la turbine entraîne la rotation du rotor de la machine. Le plus souvent, le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect esthétique par rapport aux bipales [BOY06].

Le couple nécessaire pour la mise en route de ce type d'aérogénérateur est très faible et permet donc un fonctionnement à faible vitesse de vent.

Ce type d'éolienne est le plus répandu dans le monde car ; leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol [BEN08].

I.3 Composants de l'aérogénérateur

- **La tour** : C'est un élément porteur, généralement un tube en acier ou un treillis métallique. Avec l'augmentation de puissances nominales des éoliennes, le mat devient de plus en plus haut pour éviter les perturbations près du sol et permettre l'utilisation de pales plus longues.
A l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.
- **La nacelle** : C'est le coffret qui se trouve en haut de la tour. IL contient et protège les différents composants mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique. Et ses différents composants selon [Red09] sont :
- **Arbre de transmission** : Il reçoit le mouvement de rotation du moyeu afin d'entraîner la génératrice électrique. Sur l'arbre de transmission se trouve le frein qui sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance.
- **Un multiplicateur** : Appelé aussi transmission, il adapte la vitesse de rotation de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. On ne trouve pas ce composant dans les éoliennes munies des génératrices synchrones (transmission direct).
- **La génératrice** : La fonction de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Dans notre cas c'est une génératrice synchrone.
- **Le système de refroidissement** : Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement par air ou par eau.
- **Anémomètre** : Il mesure en permanence la vitesse du vent qu'il va transmettre au système de contrôle de façon à démarrer ou arrêter l'éolienne. En général, une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s et elle est arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h) pour assurer la protection de l'éolienne.
- **Frein** : il sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance
- le système de control-commande : il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation à titre d'exemple en cas de surchauffe de la génératrice ou si elle, le système arrête

automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

- **Le rotor et les pales**
- **Le rotor** : est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59%(limite de Betz). Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne .Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.
- **La pale** : est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.
- **Le moyeu** : C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

I.4. Stratégie de fonctionnement de l'aérogénérateur

I.4.1. Bilan des forces sur la pale

La figure (1.4) représente la section d'une pale d'aérogénérateur [MOU07]. La vitesse du vent arrivant face à cette pale est représentée par le vecteur \vec{V} , \vec{V}_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée \vec{V}_{res} .

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

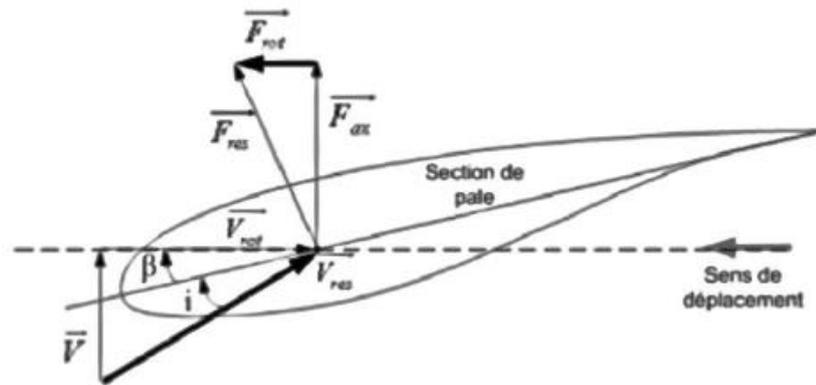


Figure I.4 Bilan des forces sur une section de pale.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse du vent nominale donnée. Lorsque la vitesse du vent devient trop élevée, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale. Il est à noter que β et i sont respectivement l'angle de calage et l'angle d'incidence [ACH10].

I.4.2. Moyen de réglage de la conversion d'énergie

Dans la phase d'exploitation, compte tenu du caractère très fluctuant du vent et aussi de la résistance limitée de la structure, on est amené à opérer deux types de réglage. En effet, pour garantir un captage maximal (optimal) de l'énergie incidente, il faut ajuster en permanence la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent et l'angle d'incidence des pales.

I.4.3. Système à pas variable « pitch »

Sur une éolienne contrôlée à calage variable (appelée aussi une éolienne à pas variable), le contrôleur électronique vérifie plusieurs fois par seconde la puissance de sortie de l'éolienne. En cas de puissance de sortie trop élevée, le contrôleur électronique de l'éolienne envoie une commande au dispositif de calage qui pivote immédiatement les pales légèrement sur le côté, hors du vent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité (Figure. I.5).

Concevoir une éolienne à pas variable suppose une ingénierie très avancée afin d'assurer le positionnement exact des pales. En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient

toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à assurer le meilleur rendement possible à tout moment (Figure. I.5).

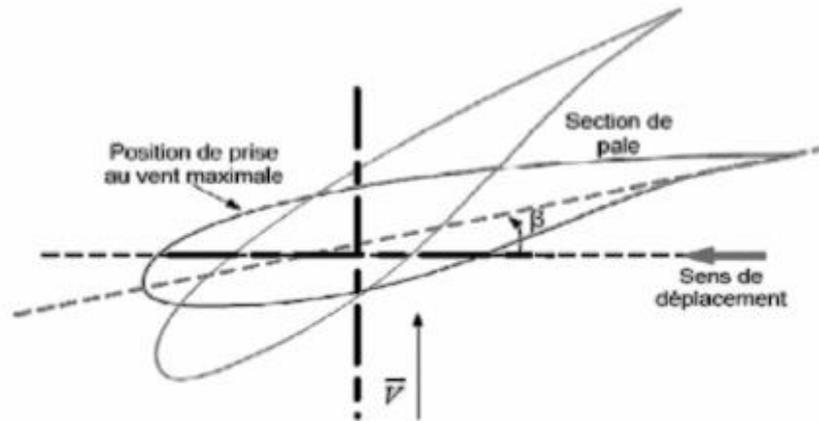


Figure I. 5 Variation de l'angle de calage d'une pale

I.4.3. Système à décrochage aérodynamique ou système « stall »

C'est le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux. Les pales ont un profil optimisé pour obtenir le décrochage.

Cette solution est utilisée surtout quand la génératrice et le couplage conduisent à une vitesse de rotation peu variable (génératrice asynchrone à couplage direct sur le réseau).

Il existe également des dispositifs intermédiaires qualifiés de « stall actif » dans lesquels un très faible réglage de l'angle de calage est associé à un profil de pale optimisé.

I.5. La conversion électromécanique

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend, par exemple, de cette configuration [CAM03]. Les avantages et les inconvénients de chaque configuration peuvent se résumer comme suit :

I.5.1.Fonctionnement à vitesse fixe

Avantages

- Système électrique plus simple et moins cher.
- pas besoin de système électronique et plus fiable (moins d'entretien).

Inconvénient

- l'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau.
- présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance.

I.5.2.Fonctionnement à vitesse variable

Avantages

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance. Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées. L'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple [CAM03].
- 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
- Réduction des bruits acoustiques.

Inconvénient

- utilisation de machines spéciales
- Coûts supplémentaire plus importants (convertisseur, commande,...etc.)
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne [CAM03].

I.6.Type d'aérogénérateur dans les systèmes éoliens

Le choix technologique des éoliennes actuellement implantées est dominé par l'existence de trois grandes familles de structure.

I.6.1.Structure à base de la machine synchrone

Ce type de structures est la solution étudiée dans le cadre de ce travail. Diverses architectures sont proposées par les constructeurs parmi lesquelles se trouve la machine synchrone spécifique multipolaire permettant de supprimer ou de détruire le multiplicateur de vitesse et machine synchrone avec un nombre réduit de paires de pôles donc moins volumineuses. La structure étant à vitesse variable, une interface d'électronique de puissance est intercalée avant la connexion au réseau. La présence d'un filtre après les convertisseurs permet de contrôler le niveau des harmoniques.

Les avantages de la structure sont le fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de la vitesse du vent, la puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens, l'amélioration de la qualité d'énergie en contrôlant le rejet des harmoniques.

Son inconvénient est le prix dû à la capacité de la machine et au prix de l'électronique de puissance (dimensionnée à 100% de la puissance nominale). [CAM03].

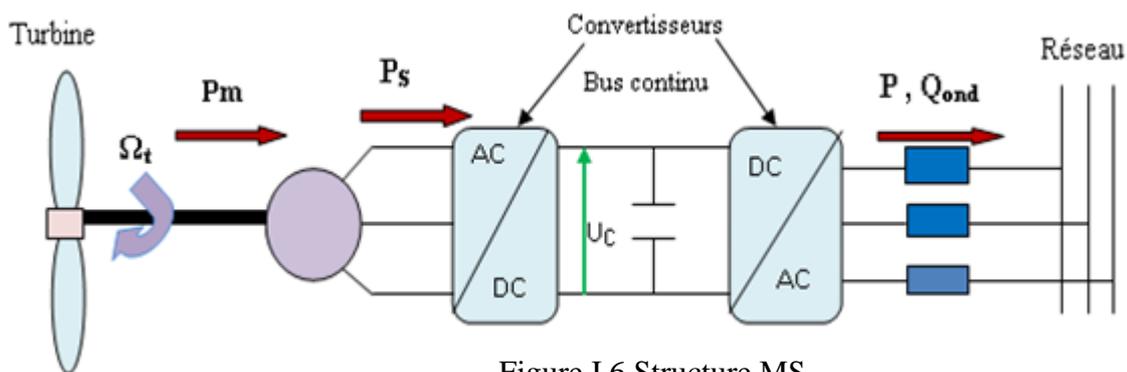


Figure I.6 Structure MS

I.6.2.Structure à base de la machine asynchrone à cage

Il s'agit d'un système à vitesse fixe, appelé aussi concept danois. La machine est simple et robuste. La connexion avec le réseau est directe, nécessitant la présence d'un convertisseur statique de type gradateur pour limiter la forte demande du courant qui est dû à la magnétisation brutale au moment du couplage.

Il faut noter aussi la présence d'un multiplicateur de vitesse entre la turbine et la génératrice. Le principal avantage de la structure est le faible coût dû au caractère standard de la machine et à l'absence d'électronique de puissance d'interface. Néanmoins, on peut noter la puissance extraite non optimisée, la maintenance de la boîte de vitesse, l'absence de la gestion de l'énergie réactive par le générateur.

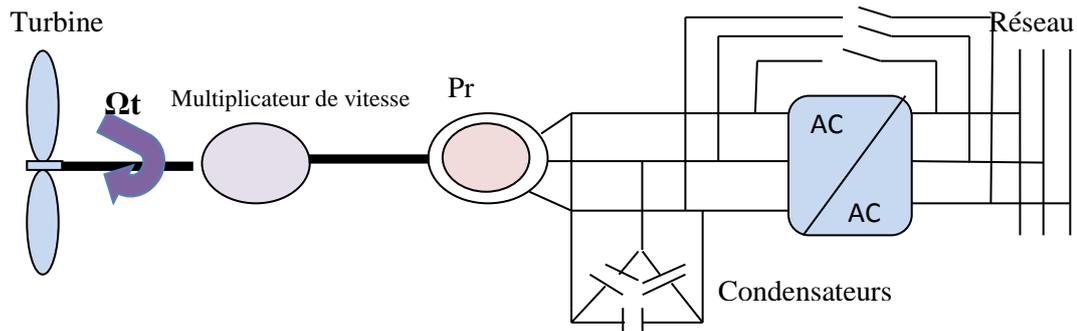


Figure I. 7 Structure MAS à vitesse fixe

I. 6.3. Structure à base de la machine asynchrone à double alimentation MASDA

Une machine asynchrone à double alimentation est une machine asynchrone dont le rotor (bobine) est raccordé au réseau par l'intermédiaire d'une interface électronique de puissance. Cette interface adapte l'amplitude et la fréquence des courants rotorique, en contrôlant la tension aux bornes du rotor en fonction du point de fonctionnement de la machine.

On s'autorise une variation de vitesse de $\pm 30\%$ autour de la vitesse de synchronisme. Le stator est lui directement connecté au réseau (Figure.I.8) [TEN08].

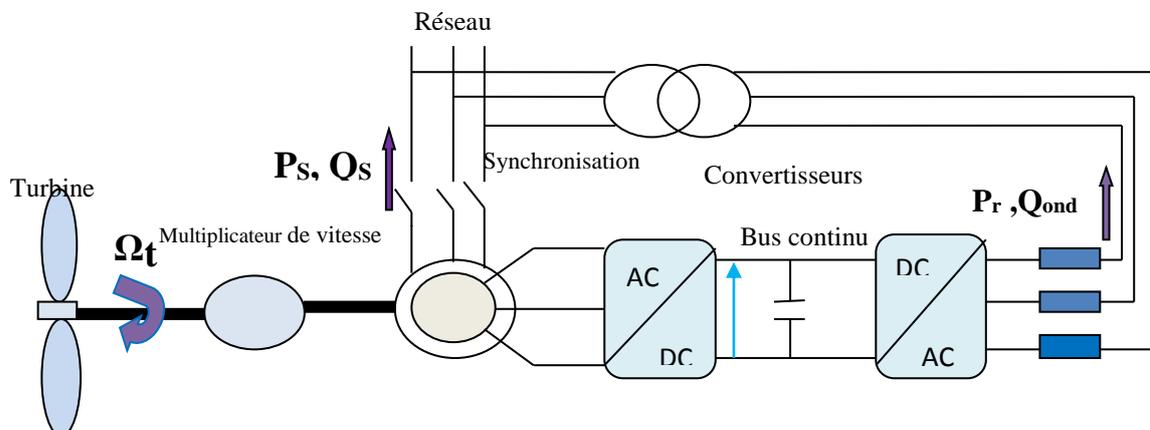
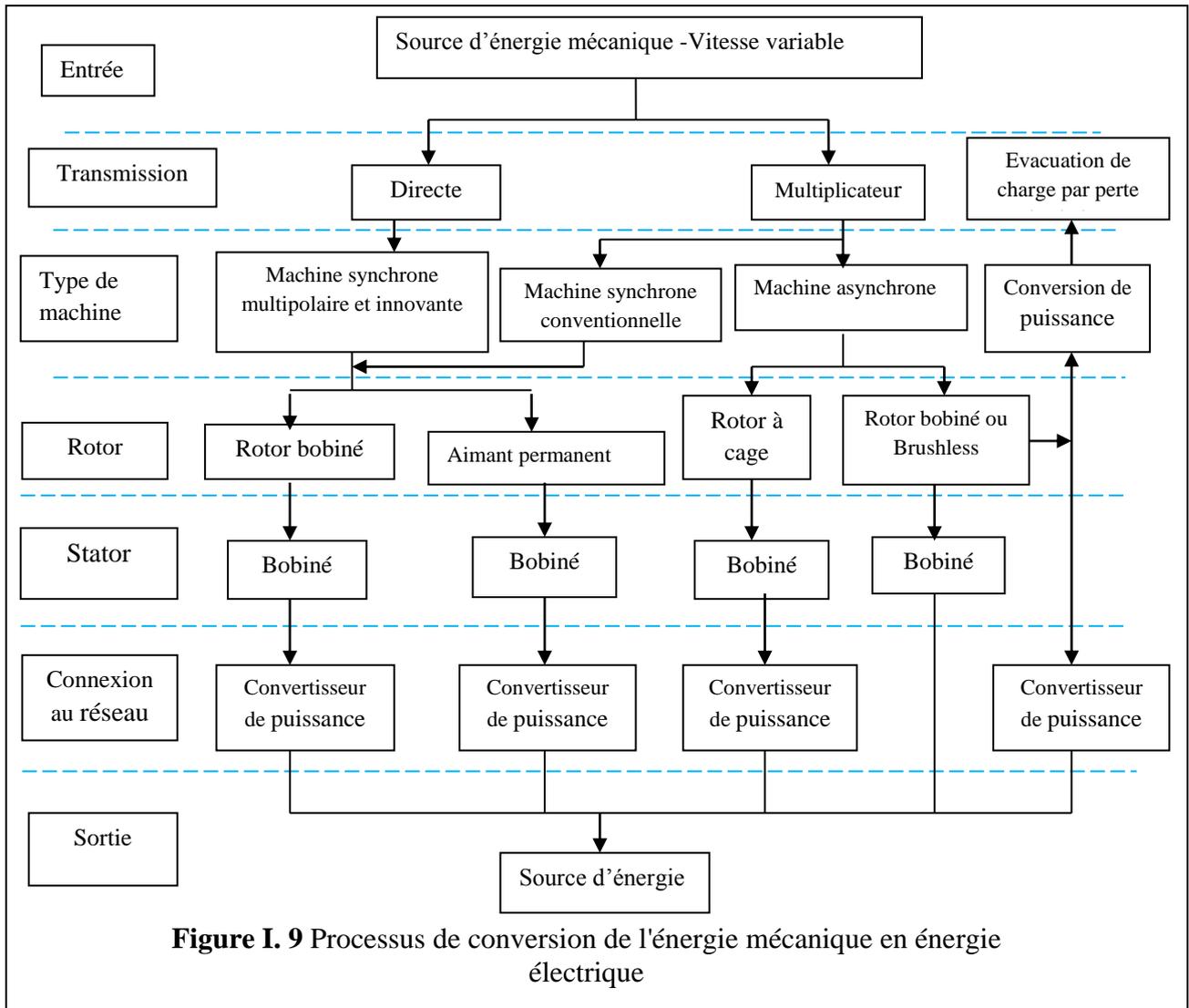


Figure I. 8 Schéma de principe d'un entraînement à vitesse variable-machine asynchrone à double alimentation MASDA

La figure (I. 9) illustre les différentes configurations électriques conçues pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique [CAM03].



I. 7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons décrit en premier lieu les types des aérogénérateurs ainsi que les différents constituants d'un aérogénérateur. Ensuite, nous avons présenté les avantages et les inconvénients de fonctionnement à vitesse fixe et variable. À la fin on a illustré les différentes configurations électriques conçues pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

CHAPITRE II

Modélisation de l'éolienne

II.1. Introduction

Une 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. Ce chapitre concerne la modélisation et la commande de la turbine éolienne. Dans la première partie, une étude aérodynamique de la turbine est présentée, en vue de connaître ces principaux paramètres de fonctionnement, à savoir le coefficient de puissance, de couple et la limite de Betz.

Différentes stratégies de commande sont décrites dans le but de maximiser la puissance aérodynamique de la turbine. Un modèle analytique d'une turbine éolienne à une seule masse est étudié en utilisant différentes méthodes d'optimisation de puissance.

II.2. Conversion de l'énergie éolienne

II.2.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v , s'écrit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho S dl v^2 \quad (\text{II.1})$$

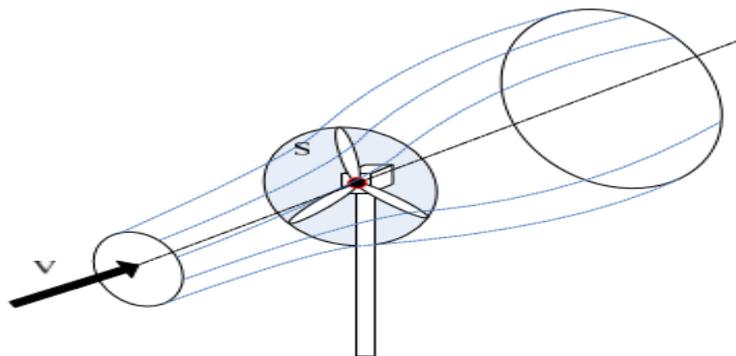


Figure II.1 colonne d'air animée d'une vitesse v

La puissance P_m extraite du volume d'air en mouvement est la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En écrivant $dl = v dt$, on déduit l'expression de P_m :

$$P_m = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (\text{II.2})$$

ρ : Masse volumique de l'air (en Kg/m^3).

v : Vitesse instantanée du vent (en m/s).

E_c : En joules.

II.2.2. Loi de Betz

Une éolienne ne peut exploiter toute l'énergie contenue dans le courant d'air qui la traverse. En 1926, le physicien allemand Albert Betz a prouvé qu'une éolienne ne peut récupérer au maximum que $(16/27)^{\text{ième}}$ de l'énergie contenue dans le vent.

Nous considérons que le flux d'air qui va traverser la surface balayée par les pales est assimilé à un tube (une veine de vent).

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté à la figure (II.2) où on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

Désignons par V la vitesse de l'air traversant l'aérogénérateur, par S_1 et S_2 les sections amont et aval du tube d'air et par S la surface balayée par l'hélice [POIT03].

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aérogénérateur. En réalité, la totalité de la vitesse du vent n'est pas utilisée pour faire tourner les pales, puisque le vent continue à souffler à la vitesse V_2 après avoir traversé l'aérogénérateur.

Nous pouvons dire que pendant une seconde, le volume d'air déplacé est égal à la surface de la section du tube (surface balayée par les pales) S , multiplié par la vitesse V .

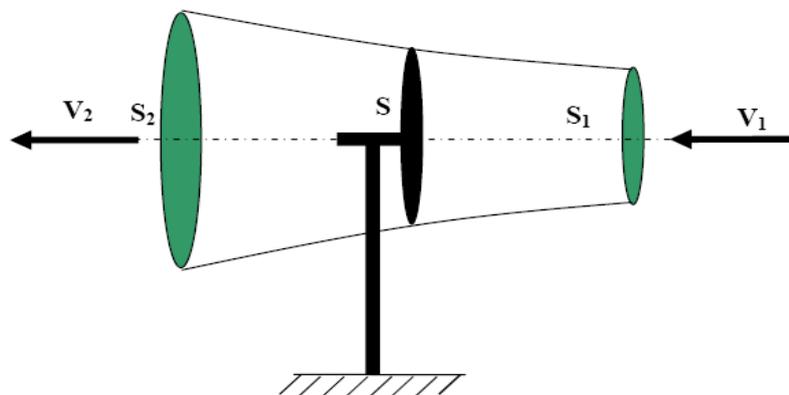


Figure II.2 Tube de courant autour d'une éolienne

La masse d'air en mouvement traversant ce tube en une seconde est donnée par le produit de la densité d'air, la surface, et la vitesse moyenne [MAY08] [GAR01] :

$$m = \frac{\rho S(v_1+v_2)}{2} \quad (\text{II } 3)$$

La puissance réelle extraite par le rotor des pales est la différence des puissances du vent en amont et en aval [MAY 08].

$$P_m = \frac{m(v_1^2-v_2^2)}{2} \quad (\text{II } 4)$$

En remplaçant m par son expression dans (2.4) :

$$P_m = \frac{\rho S(v_1+v_2)(v_1^2-v_2^2)}{4} \quad (\text{II } 5)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit la vitesse v_1 , la puissance P_t correspondante serait alors :

$$P_t = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (\text{II } 6)$$

II.2.3. La vitesse spécifique (Tip-Speed-Ratio)

Le coefficient de vitesse réduite λ est un facteur spécifique des aérogénérateurs, il est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales $R\Omega_t$ sur la vitesse instantanée du vent V Alors :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V} \quad (\text{II } 7)$$

R : Rayon de la surface balayée en m.

V : Vitesse du vent en m/s.

Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicateur en rad/s.

λ : Vitesse spécifique ou normalisée.

$R\Omega_t$: vitesse tangentielle.

II.2.4. Le coefficient de puissance (power coefficient)

On définit le coefficient de puissance comme le rapport entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible :

$$C_p = \frac{P_m}{P_t} = \frac{\left(1 + \frac{v_2}{v_1}\right) \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^2\right)}{2} \quad (\text{II } 8)$$

Le coefficient C_p est variable. Il est en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine Ω_t et les paramètres des pales de la turbine comme l'angle d'incidence et l'angle de calage, il est souvent représenté en fonction de la vitesse spécifique λ . La valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz, est de 16/27 soit 0.59 [Win].

Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, ne dépasse pas 60-65% de la puissance maximale calculée par la formule de Betz.

$$P_{\text{extraite}}^{\text{max}} = \frac{16}{27} P_{\text{incidente}} \quad (\text{II } 9)$$

$C_{p\text{max}}$ étant la valeur maximale que peut prendre le coefficient de puissance C_p . Cette valeur est associée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} pour laquelle la turbine a été dimensionnée suivant une vitesse de vent nominale v_n et une vitesse de rotation nominale Ω_m [ACH10], [GAR01].

II.2.5. Le coefficient de couple (torque coefficient)

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle [LEC04].

En combinant les équations (II.6), (II.7), et (II.8), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho \pi R^2 v_1^3 \quad (\text{II } 10)$$

Avec :
$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v_1} \quad (\text{II } 11)$$

D'où l'expression du couple suivante :

$$C_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R P_m}{\lambda v} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 \quad (\text{II } 12)$$

C_t : couple de la turbine éolienne.

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_t}{\frac{1}{2}\rho S R v^2} \quad (\text{II } 13)$$

II.2.6. Courbe caractéristique de la turbine éolienne

La courbe essentielle caractérisant la turbine éolienne à une seule masse est décrites par le coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ .

En général, les turbines disposent d'un système d'orientation des pales destiné à limiter la vitesse de rotation. L'allure de coefficient C_p changeant donc pour chaque angle de calage β comme représenté à la figure II 3.

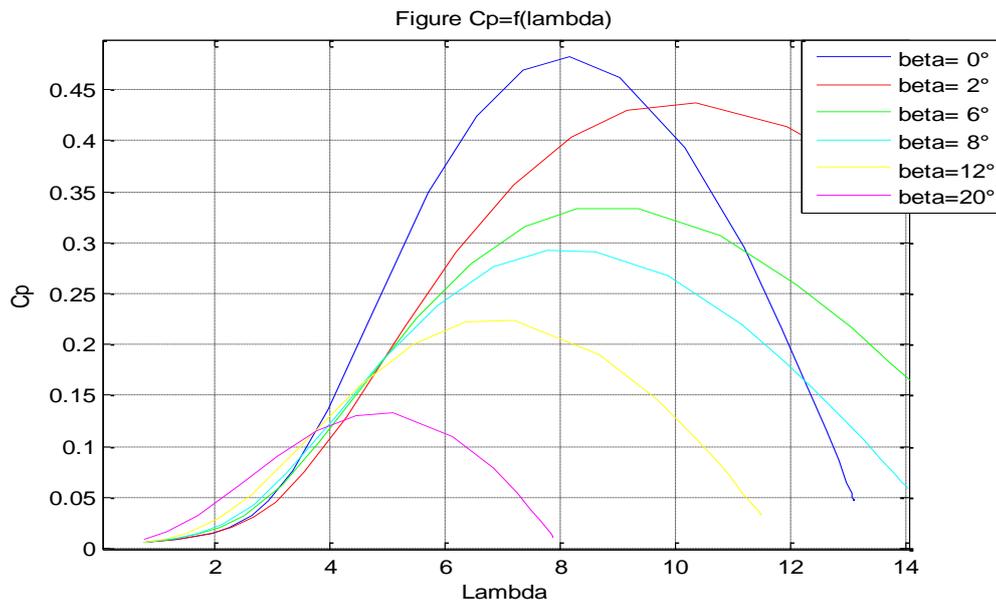


Figure II.3 coefficients C_p en fonction de la vitesse spécifique λ pour différentes β

D'après la courbe du coefficient de puissance obtenue nous pouvons statuer que cette courbe possède un point optimal ($\lambda_{opt} = 8$, $C_{p,max} = 0.48$) correspondant au rendement maximal de la turbine. Sur ce point, le maximum e la puissance mécanique peut être récupéré à partir de la puissance disponible dans le vent.

II.2.7. Production d'énergie mécanique

En tenant compte du rapport du multiplicateur G et à partir des équations (II.10) et (II.11), l'expression de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur peut s'exprimer par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_t R}{v_1} \right) \rho \pi R^2 v_1^3 \quad (\text{II } 14)$$

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

II.2.7.1. La caractéristique de la puissance optimale de l'éolienne

La caractéristique de la puissance optimale de l'éolienne étudiée est fortement non linéaire et en forme de « cloche ». pour chaque vitesse de vent, le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherche de la vitesse de rotation optimale. Le schéma de la figure (II.4) illustre la courbe caractéristique de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe colorée correspond à une vitesse de vent V donnée, l'ensemble des sommets de ces caractéristiques, qui sont les points optimaux recherchés, définit une courbe dite de puissance optimale définie par l'équation :

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt} (\lambda_{opt}) \rho S v^3 \quad (\text{II } 15)$$

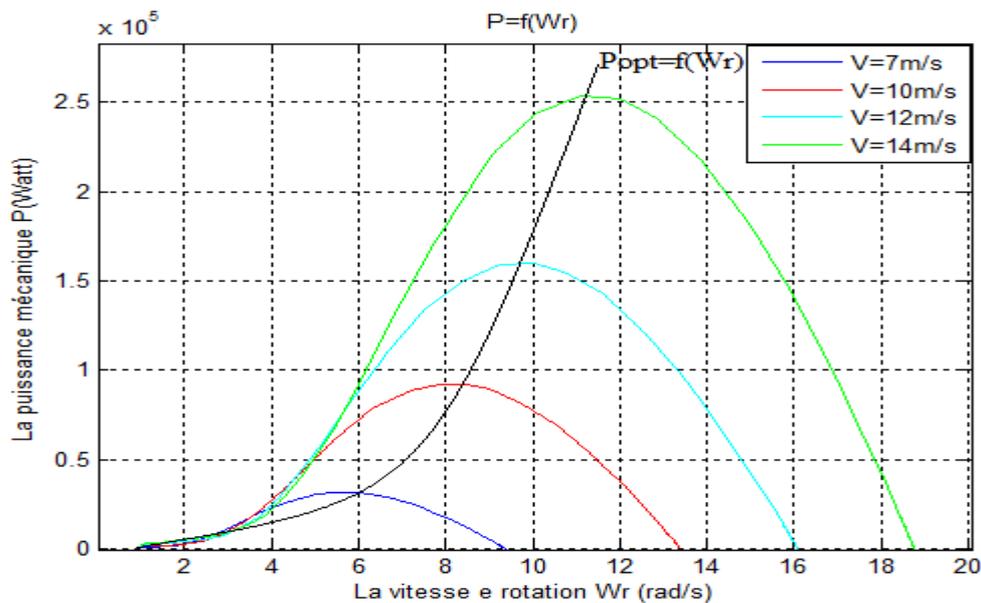


Figure II.4 Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.

II.3. Modélisation de la turbine éolienne

II.3.1. Hypothèse simplificatrice pour modélisation mécanique de la turbine

La partie mécanique de la turbine qui sera étudiée comprend trois pales orientables et de longueur R , elles sont fixées sur l'arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_t qui est relié à un multiplicateur de gain G . Ce multiplicateur entraîne une génératrice électrique (Figure II. 5). [ACH10] [SAL04].

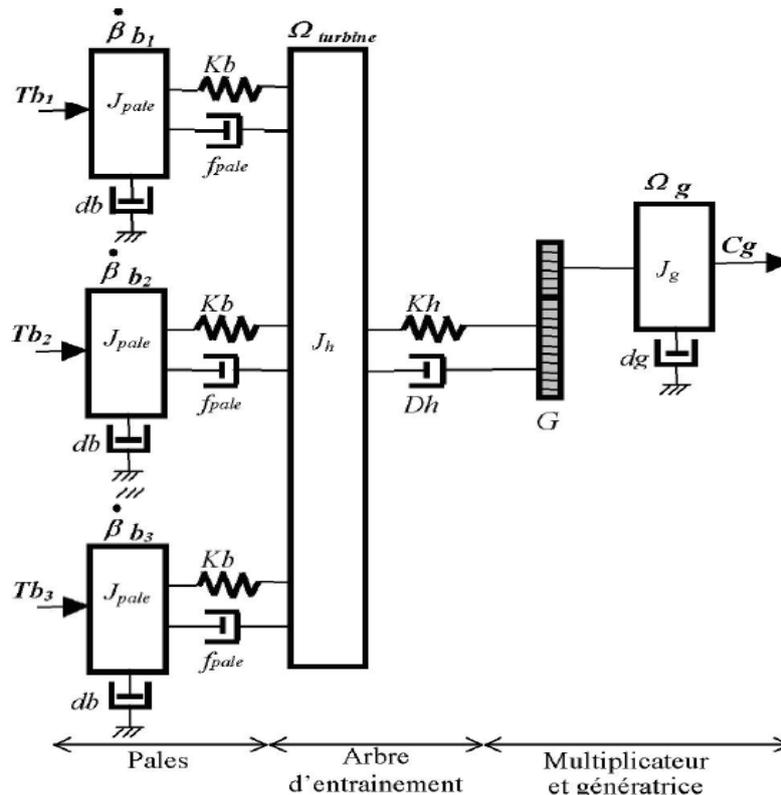


Figure II.5 Représentation du système éolien

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

- La même inertie J_{pale} .
- La même élasticité Kb .
- Le même coefficient de frottement par rapport à l'air db .

Le rotor de la génératrice possède :

- Une inertie J_k .
- Un coefficient de frottement par rapport à l'air dg .

Ce rotor transmet un couple C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse notée Ω_m .

Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($Tb_1 = Tb_2 = Tb_3$), Alors, on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique caractérisé par somme de toutes les caractéristiques mécanique.

De part, la conception aérodynamique des pales, leur coefficient de frottement par rapport à l'air (db) est très faible et peut être ignoré. De même la vitesse de la turbine étant très faible, les pertes par frottement sont négligeables par rapport aux pertes par frottement du côté de la génératrice. On aura alors un modèle mécanique comportant deux masses (Figure II.6) dont la validité (par rapport au modèle complet) a été déjà vérifiée [ACH10] [SAL04].

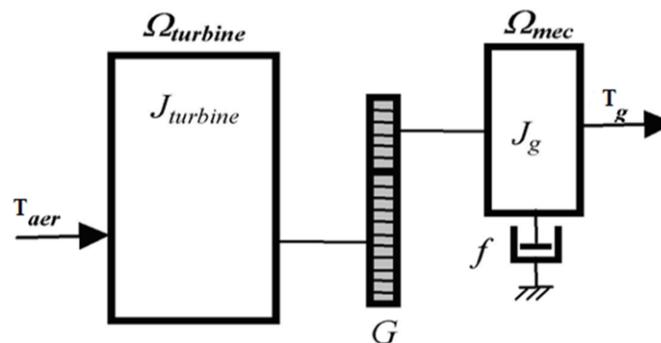


Figure II 6 Modèle simplifié de la turbine éolienne

II.3.1.1 Vitesse du vent continument variable

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend de cette configuration.

Le fonctionnement à vitesse fixe possède les caractéristiques suivantes :

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Peu de probabilité d'excitation des fréquences de résonance des éléments de l'éolienne.
- Pas besoin de système électronique de commande.
- Moins cher.

Et le fonctionnement à vitesse variable est caractérisé par :

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance d'une meilleure qualité.

Ainsi, il apparaît clairement l'importance du fonctionnement à vitesse variable et la nécessité du réglage continu de celle-ci afin de maintenir le coefficient de puissance C_p à sa valeur maximale [TOU10].

II.3.2. Modélisation de la turbine

Le dispositif étudié est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de vitesse de gain G (Figure II.7).

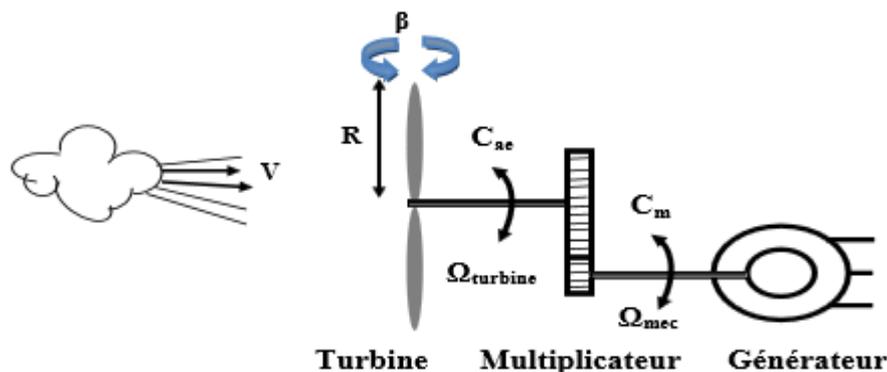


Figure II.7 Schéma de la turbine éolienne

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

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

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes. La puissance du vent ou puissance éolienne est définie dans ce qui suit [ACH10].

II.3.3. Modèle aérodynamique

La ressource en vent, du point de vue de sa distribution statique, est primordiale dans un projet éolien et constitue un facteur déterminant pour le calcul de la production de l'électricité et de la rentabilité. Les propriétés dynamique du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion de l'énergie car la puissance de la turbine (puissance aérodynamique), dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent est un vecteur tridimensionnel. Dans ce travail, la direction du vecteur de la vitesse du vent se limite à une dimension. il est modélisé par une valeur moyenne de 10m/s voir figure (II. 8).

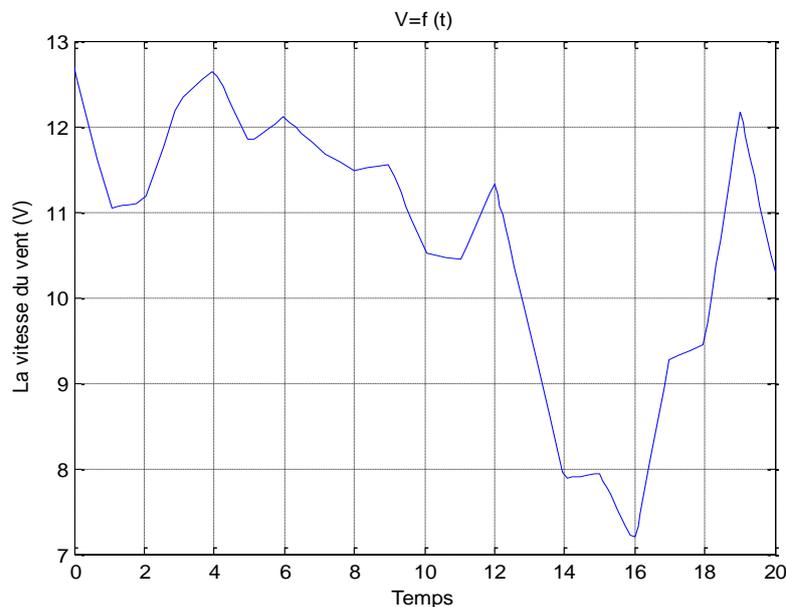


Figure II.8 Profil du vent utilisé

La puissance cinétique du vent peut être décrite par l'équation suivante :

$$P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 \quad (\text{II.16})$$

Où v est la vitesse du vent (m/s), ρ est la masse volumique de l'air (approximativement 1.225Kg/m^3 à la pression atmosphérique et à 15°C) et R la longueur des pales.

L'éolienne ne pouvant récupérer qu'une fraction de la puissance du vent et la puissance aérodynamique apparaissent au niveau du rotor de la turbine par l'équation suivante [BECH13].

$$P_t = \frac{1}{2} \rho C_p \pi R^2 v^3 \quad (\text{II.17})$$

II.3.3.1 Modèle analytique du coefficient de puissance

Le coefficient de puissance C_p dépend du nombre de pâles du rotor et de leurs formes géométrique et aérodynamique (longueur et profil des sections). Celles-ci sont conçues en fonction des caractéristiques du site, de la puissance nominale souhaitée, du type de régulation (en pitch par décrochage) et de type de fonctionnement (à vitesse fixe ou variable) [BECH13]. Des approximations numériques ont été développées dans la littérature pour modéliser le coefficient C_p et différentes expressions ont été proposées, nous présentant l'une de ces formes qui est la plus utilisée dans différents travaux scientifiques.

$$C_p = C_1 * \left(C_2 * \left(\frac{1}{\lambda + 0.08 * \beta} \right) - \left(\frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - C_3 * \beta - C_4 \right) * \exp \left(-C_5 * \left(\frac{1}{\lambda + 0.08 * \beta} \right) - \left(\frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \right) + C_6 * \lambda$$

Avec

$$C_1=0.52;$$

$$C_2=116;$$

$$C_3=0.4;$$

$$C_4=5;$$

$$C_5=21;$$

$$C_6=0.0068;$$

II.3.4. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice. Il est modélisé par les équations suivantes :

$$G = \frac{C_{aer}}{C_g} \quad (II.18)$$

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad (II.19)$$

II.3.5. Equation dynamique de l'arbre de transmission

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

$$J \frac{d\Omega_m}{dt} = C_g - C_{em} - C_f \quad (II.20)$$

Avec :

J : l'inertie totale ramenée sur l'arbre de la génératrice, comprenant : l'inertie de la turbine, de la génératrice, des deux arbres et du multiplicateur.

f : le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

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

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

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements.

$$C_f = f\Omega_m \quad (II\ 21)$$

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

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

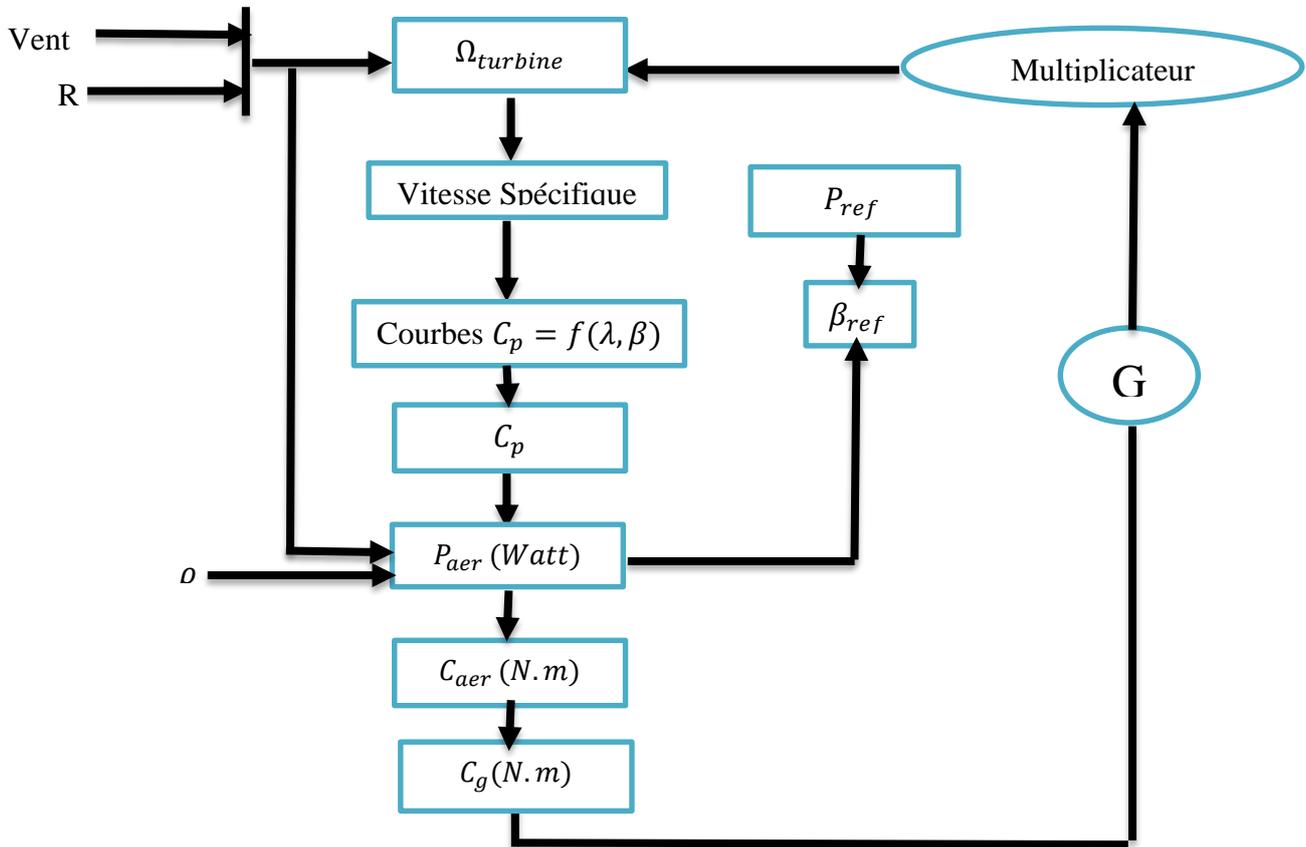


Figure II.9 Organigramme de simulation de la turbine éolienne.

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit aisément à partir de ces équations.

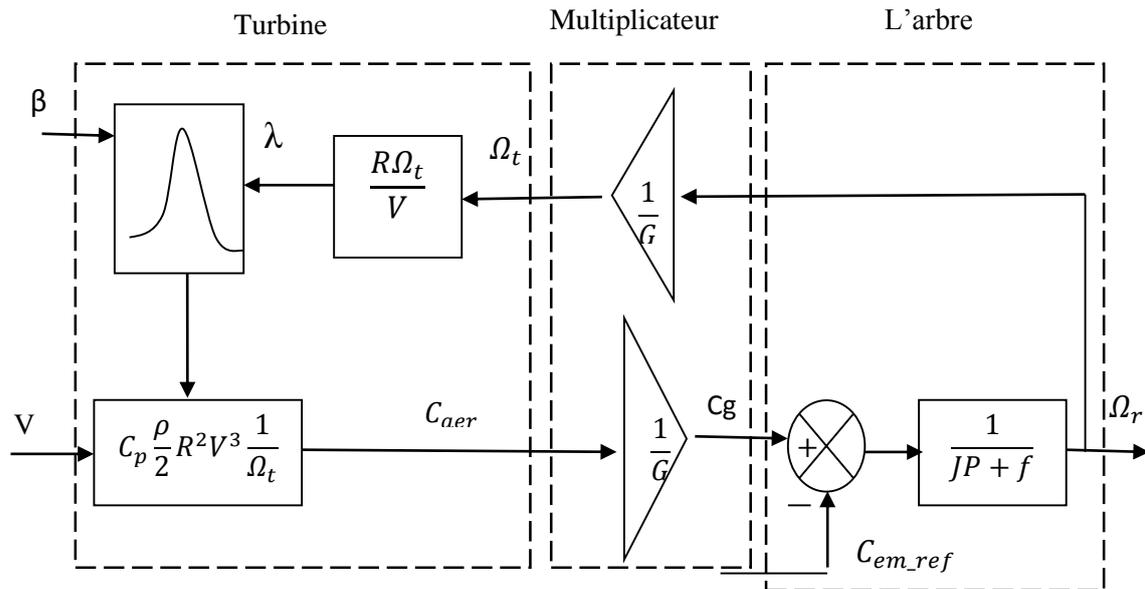


Figure II.10 Schéma bloc du modèle de la turbine

II.3.6. Différentes phases de fonctionnement de l'éolienne à vitesse variable

Quartres zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées :

- **Zone 1** : C'est la zone de démarrage de la machine. Elle commence lorsque la vitesse mécanique est supérieure à une certaine vitesse Ω_{cut-in} .
- **Zone 2** : Lorsque la vitesse de la génératrice atteint une valeur seuil, un algorithme de commande permettant l'extraction de la puissance maximale du vent appliqué. Pour extraire le maximum de la puissance, l'angle de la pale est maintenu à sa valeur minimale : $\beta = 0^\circ$.

Ce processus continue jusqu'à atteindre une certaine valeur de la vitesse mécanique.

- **Zone 3** : Au-delà, l'éolienne fonctionne à vitesse constante. Dans cette zone, la puissance de la génératrice atteint des valeurs plus importantes, jusqu'à 90% de la puissance nominale P_{nom} .
- **Zone 4** : Arrivée à la puissance nominale P_{nom} , une limitation de la puissance générée est effectuée à l'aide d'un système d'orientation des pales : pitch control.

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

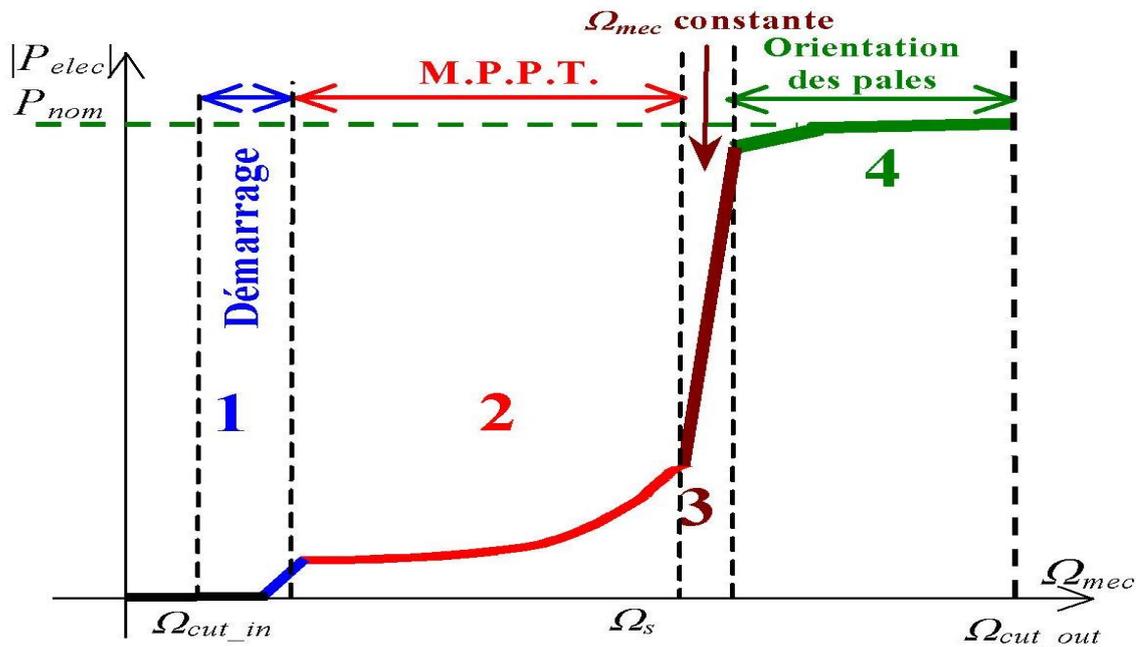


Figure II.11 Les quatre zones de fonctionnement de la turbine

II.3.7.Méthode de recherche du point maximum de puissance

II.3.7.1. Bilan des puissances

L'équation (II.2) quantifie la puissance capturée par la turbine éolienne. Cette puissance peut être essentiellement maximisée en ajustant le coefficient C_p . Ce coefficient étant dépendant de la vitesse de la génératrice (ou encore du ratio de vitesse), l'utilisation d'une éolienne à vitesse variable permet de maximiser cette puissance. Il est donc nécessaire de concevoir des stratégies de commande permettant de maximiser la puissance électrique générée (donc le couple) en ajustant la vitesse de rotation de la turbine à sa valeur de référence et ce quelle que soit la vitesse du vent, considérée comme grandeur perturbatrice. En régime permanent, la puissance aérodynamique P_m diminuée des pertes (représentées par les frottements visqueux) est convertie directement en puissance électrique (figure II. 12).

$$P_{ele} = P_m - pertes \tag{II 22}$$

La puissance mécanique stockée dans l'inertie totale J et apparaissant sur l'arbre de la génératrice, P_m , est exprimée comme étant le produit entre le couple mécanique, C_m , et la vitesse mécanique, Ω_r :

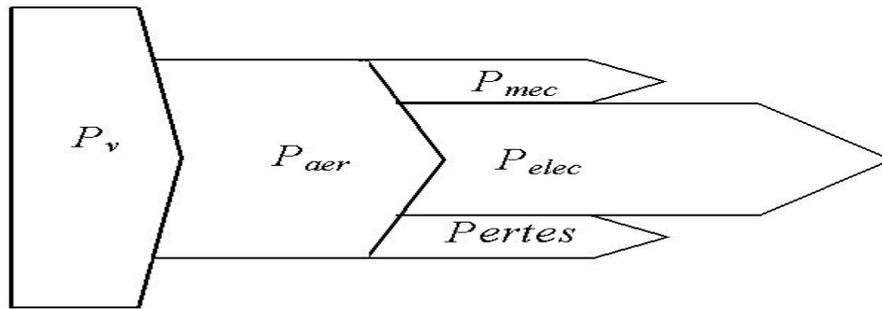


Figure II.12 Diagramme de conversion de puissance.

Dans cette partie, nous présenterons différentes stratégies pour contrôler le couple électromagnétique (et indirectement la puissance électromagnétique convertie) afin de régler la vitesse mécanique (figure II.13) de manière à maximiser la puissance électrique générée. Ce principe est connu sous la terminologie Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T.) et correspond à la zone 2 de la caractéristique de fonctionnement de l'éolienne. On distingue deux familles de structures de commande [ACH 10] [SAL04] :

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

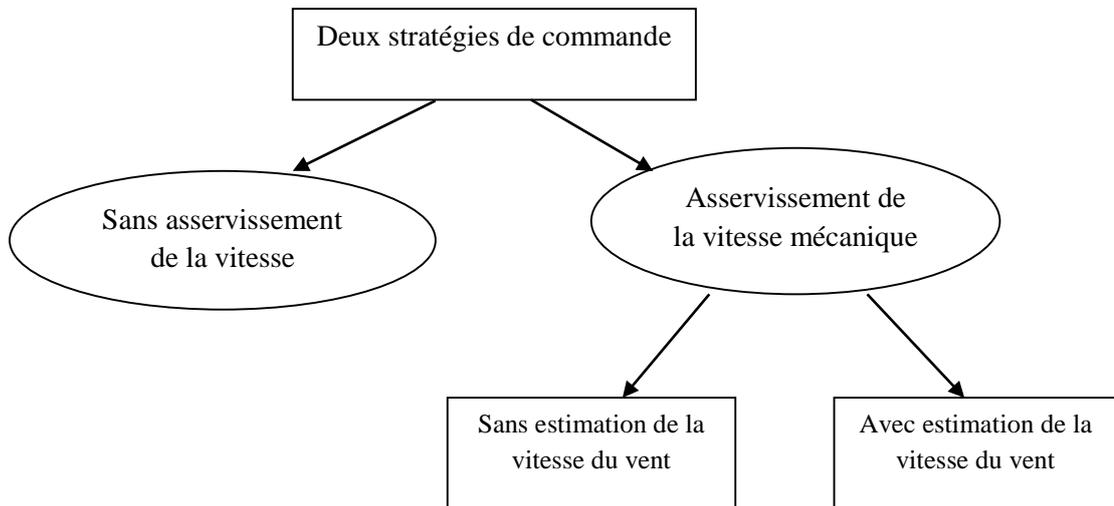


Figure II.13 Stratégies de commande de la turbine étudiée

Nous intéressons au contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique pour montrer l'intérêt de la commande MPPT en réalisant les deux asservissements qui sont respectivement avec ou sans estimation de la vitesse de rotation de la turbine.

II.3.7.2. 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, ceci peut rendre le réglage de la vitesse de rotation de la turbine relativement difficile et dégrade les puissances captées avec des mesures erronées de cette vitesse de vent. Le recours au control des éoliennes sans asservissement de vitesse est devenu une nécessité pour la plupart des constructeurs [SAL04].

Le couple aérodynamique de référence est déterminé par l'expression suivante :

$$C_{m_ref} = \frac{1}{2} C_p \rho S \frac{v^3}{\Omega_t} \quad (\text{II } 23)$$

La vitesse Ω_t est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_t = \frac{\Omega_r}{G} \quad (\text{II } 24)$$

La vitesse du vent peut être donnée par l'expression :

$$v = \frac{\Omega_t R}{\lambda} \quad (\text{II } 25)$$

En utilisant (II.22) et (II.24), on obtient une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$C_{m_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_p}{\lambda^3} \rho \pi R^5 \frac{\Omega_m^2}{G^3} \quad (\text{II } 26)$$

Pour que la puissance extraite soit maximale, on associe à la grandeur λ sa valeur optimale λ_{opt} correspond au maximum du coefficient de puissance C_{pmax} . La valeur du couple électromagnétique de référence est alors réglée à la valeur maximale suivante :

$$C_{m_ref} = \frac{1}{2} \frac{C_{pmax}}{\lambda_{opt}^3} \rho \pi R^5 \frac{\Omega_m^2}{G^3} \quad (\text{II } 27)$$

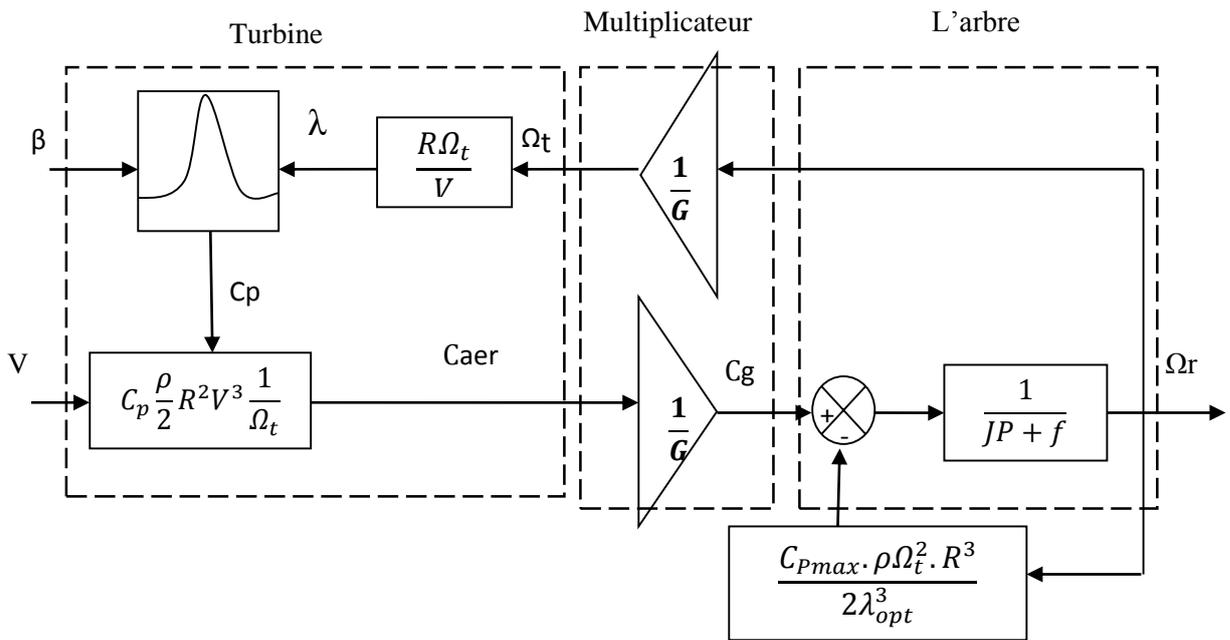


Figure II.14 MPPT sans asservissement de la vitesse.

II.3.7.3. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse sans estimation de la vitesse du vent

La nature fluctuante du vent engendre des perturbations dans le système de conversion éolien et crée des variations continues de puissance. De cet effet, on suppose que le couple électromagnétique développé par la machine est égal à sa valeur de référence, quelque soit la puissance générée [SAL04] :

$$C_m = C_{m-ref} \quad (II.28)$$

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

$$C_{m-ref} = PI(\Omega_{ref} - \Omega_r) \quad (II.29)$$

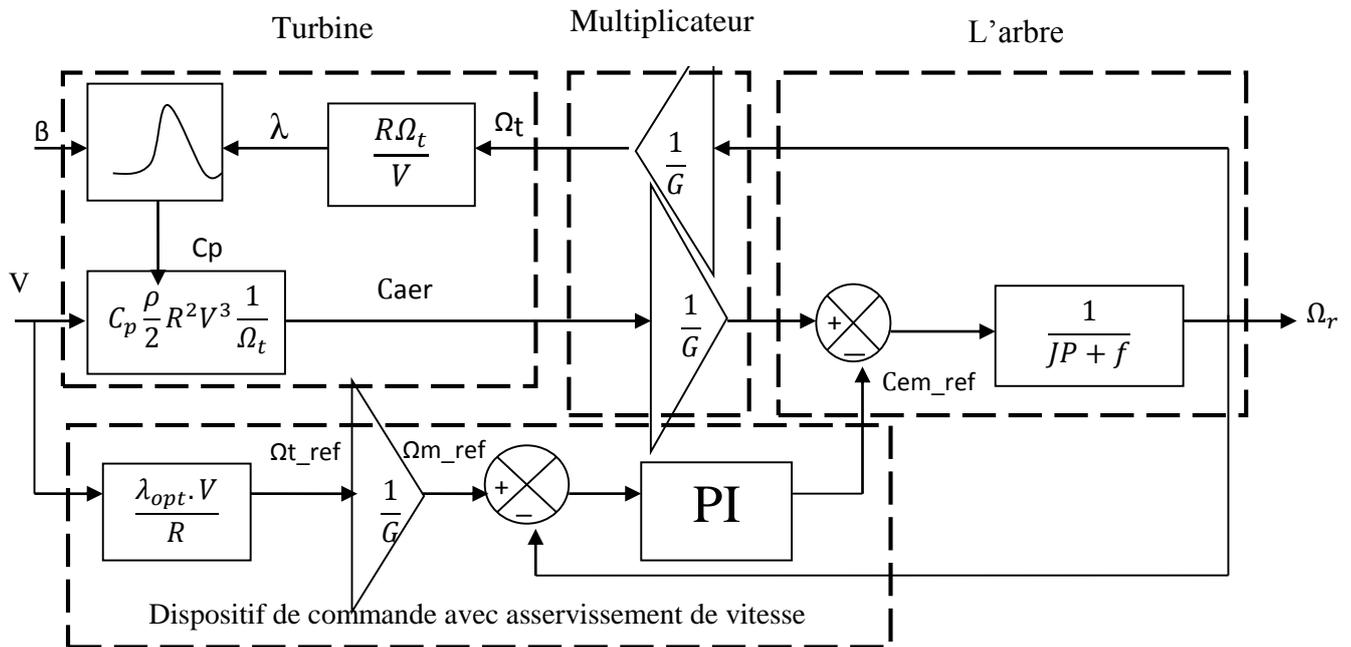


Figure II.15: Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

II.3.7.4. Maximisation de la puissance avec estimation de la vitesse du vent :

II.3.7.4.1. Estimation par filtrage de Kalman

On trouve, dans la littérature, plusieurs types d'observateurs pour l'estimation du couple aérodynamique C_{aer} ces observateurs se basent sur un modèle simple du couplage mécanique. Certains fonctionnent en boucle ouverte. D'autres fonctionnent en boucle fermée [CAM03], [BOU06]. Les solutions conduisent à de bons résultats en l'absence du bruit de mesure sur Ω_r . En revanche, si la mesure de la vitesse de la génératrice est bruitée, l'estimée du couple aérodynamique devient erronée.

Pour l'estimation de ce couple aérodynamique subi par l'éolienne, nous allons utiliser *le filtre de Kalman*. Ce couple dépend d'une façon non linéaire des variables d'état et de la vitesse du vent. Le couple, C_{aer} , est tout d'abord inséré dans les équations d'état du système en le considérant comme l'état d'un modèle intégrateur dont l'entrée est un bruit blanc.

A partir des équations du modèle à une masse de l'éolienne en boucle ouverte, on parvient à la représentation d'état suivante :

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{\Omega}_t \\ C_{aer} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-k_t}{J_t} & \frac{1}{J_t} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \Omega_t + \begin{bmatrix} -1 \\ 0 \end{bmatrix} C_g + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} \xi \\ y = \Omega_t + v \end{cases} \quad (\text{II 30})$$

ξ est le bruit d'état et v le bruit de mesure.

Généralement, les bruits d'état et de mesure sont supposés stationnaires. La matrice de gain du filtre de Kalman peut donc être calculée hors-ligne. Le filtre de Kalman considéré dans cette étude est invariant.

L'équation (II.22) a une représentation d'état générale suivante :

$$\begin{cases} \dot{X}_{kal} = A_{kal}X_{kal} + B_{kal}C_g + \xi_{kal} \\ y = C_{kal}X_{kal} + v \end{cases} \quad (\text{II 31})$$

Alors, on a l'observateur invariant suivant :

$$\dot{\hat{X}}_{kal} = A_{kal}\hat{X}_{kal} + B_{kal}C_g + K_{kal}(y - C_{kal}X_{kal}) \quad (\text{II 32})$$

Avec $K_{kal} = P.C_{Kal}^T W_v^{-1}$ est asymptotiquement stable.

P : matrice constante définie positive qui représente la covariance de l'erreur d'estimation en régime permanent, est la solution positive de l'équation algébrique de Riccati.

Comme indiqué sur la figure II.16, l'estimateur est constitué de deux blocs:

- un premier bloc qui permet d'estimer, à partir de la mesure de la vitesse de la génératrice Ω_r et du couple de commande C_{em} (entrées de l'estimateur), les estimées du couple aérodynamique \hat{C}_{aer} , et de la génératrice $\hat{\Omega}_r$.

- un deuxième bloc ayant pour entrées les estimées \hat{C}_{aer} et $\hat{\Omega}_r$ du couple et de la vitesse de rotation. La sortie est l'estimation de la vitesse du vent fictif v .

Le schéma de l'estimateur de Kalman est illustré dans la figure II. 16 :

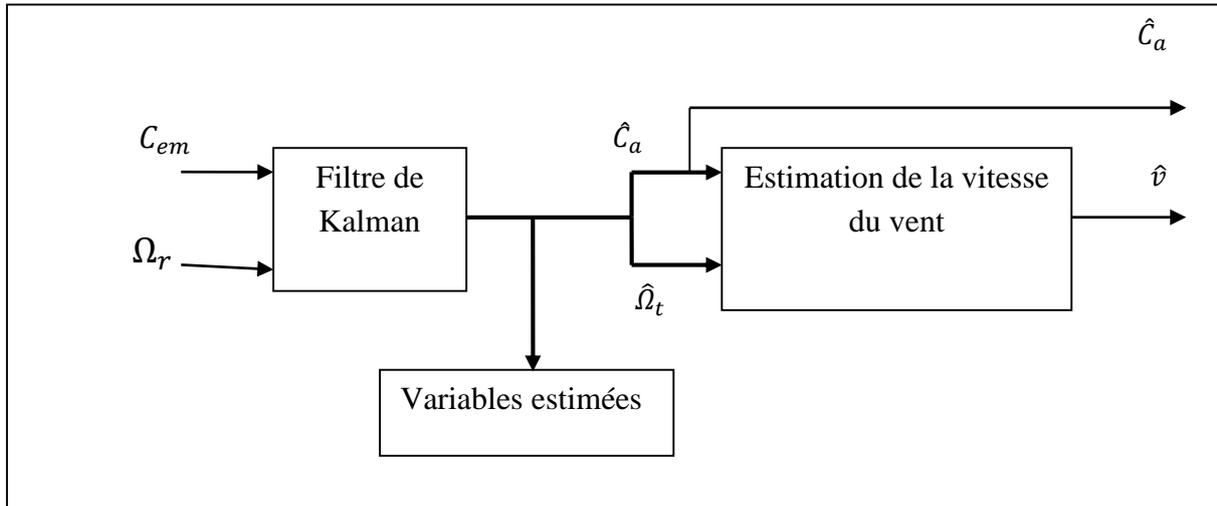


Figure II .16 Estimateur du couple aérodynamique et de la vitesse du vent

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons déduit les caractéristiques principales de la turbine éolienne après une étude aérodynamique. Nous avons expliqué les zones de fonctionnement et les différentes stratégies de contrôle de la puissance. Trois modèles d'optimisation de puissance ont été illustrés. Dans le premier, nous avons utilisé un correcteur dans la boucle de régulation de vitesse. Le deuxième est basé sur les conditions d'optimalité (C_{pmax} , λ_{opt}). Le dernier est basé sur l'estimation de la vitesse de vent à l'aide d'un filtre qui est le filtre de Kalman. Les résultats de la simulation seront justifiés dans le chapitre V.

CHAPITRE III

Logique floue

III.1 Introduction

Les systèmes flous peuvent être considérés comme des systèmes logiques qui utilisent des règles linguistiques pour établir des relations entre leurs variables d'entrée et de sortie. Ils sont apparus pour la première fois dans les années soixante-dix avec des applications dans le domaine du contrôle des processus (Mamdani et Assilian, 1975).

Aujourd'hui, les applications des systèmes flous sont très nombreuses outre la commande, ils sont largement utilisés pour la modélisation [Kim97], [Wan96], le diagnostic et la reconnaissance de formes.

Pour une meilleure compréhension de leur fonctionnement dans ce chapitre on donnera un aperçu bref sur la logique floue avec ses différentes étapes (fuzzification, inférence et defuzzification), par la suite on présente le modèle d'observateur flou utiliser pour objet de notre travail qui est l'estimation de la vitesse du rotor Ω_g ainsi d'avoir une estimation du vent de la turbine éolienne à attaque direct, tout le système sera implémenté sous MATLAB-Simulink et validé par des essais en simulation

III.2 Bases générales de la logique floue

La logique floue traduit le raisonnement humain basé sur des données imprécises ou incomplètes ; c'est une logique qui substitue à la logique binaire une logique fondée sur des variables pouvant prendre, outre les valeurs « vrai » ou « faux », les valeur intermédiaires « vrai » ou « faux » avec certains degrés. La formulation mathématique de la logique floue donne naissance à une théorie dite théorie des ensembles flous. Cette théorie n'est qu'une extension de la théorie classique des ensembles, sauf que la logique floue est caractérisée par la notion des valeurs intermédiaires [GUE09].

La logique floue permet de traiter des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou expressions du langage naturel. Dans ce but, on va définir qu'est-ce qu'un ensemble flou, une fonction d'appartenance, un univers de discours ou de référence, une variable linguistique, une valeur linguistique et finalement les opérations en logique floue.

III.2.1 Ensembles flous

La notion d'ensemble flou a été proposée par Zadeh (Zadeh, 1965) en introduisant un caractère graduel de l'appartenance d'un élément à un ensemble donné. Cela permet une meilleure représentation des termes et des connaissances vagues que nous, les humains, manipulons au quotidien. Mathématiquement, un ensemble flou A d'un univers de discours U, est caractérisé par une fonction d'appartenance, notée μ_A , à valeur dans l'intervalle [0,1] et qui associe à chaque élément x de U un degré d'appartenance $\mu_A(x)$ indiquant le niveau d'appartenance de x à A. $\mu_A(x) = 1$ et $\mu_A(x) = 0$ correspondent respectivement à l'appartenance et la non-appartenance [GUE09].

De plus, on peut introduire une fonction caractéristique pour A, notée comme suit :

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{si } x \in U \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (III.1)$$

Exemple: Evaluation de la température d'un corps (Figure. III.1):

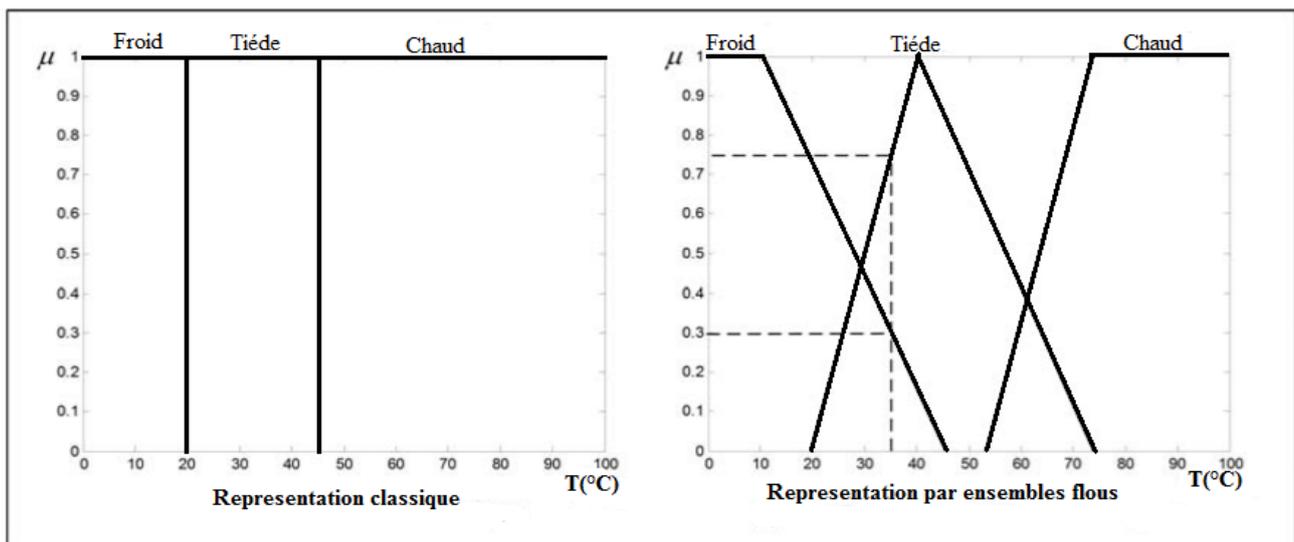


Figure III 1 Représentation de la température d'un corps par les ensembles classiques et flous

Dans un ensemble flou « l'appartenance à l'ensemble » d'un élément x est graduelle, laquelle est caractérisée par une fonction d'appartenance $\mu_A(x)$. Cette dernière définit mathématiquement l'ensemble flou sur l'univers de référence U. $\mu_A(x)$ mesure le degré d'appartenance d'un élément x à A. Donc un ensemble flou peut être représenté comme l'ensemble de paires ordonnées (x, $\mu_A(x)$).

D'où:

$$A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\} \quad (III.2)$$

Si l'ensemble U de référence est discret alors : $A = \sum \mu(x_i) / x_i \quad (III.3)$

Si l'ensemble U de référence est continu alors : $A = \int \mu(x) / x \quad (III.4)$

Les ensembles flous sont un moyen de réaliser l'interface entre l'information numérique (quantitative) et l'information symbolique (linguistique).

III.2.2 Variable et valeurs de variable linguistique

La variable linguistique représente un phénomène ou une grandeur ; la description de la variation de ces variables en utilisant les termes linguistiques : « quelque, beaucoup, souvent », « grand, moyen, petit » ce sont les valeurs linguistiques.

Afin de permettre un traitement numérique, on définit les sous-ensembles (A_1, A_2, \dots) par leurs fonctions d'appartenances (μ_1, μ_2, \dots).

La Figure III 2 illustre un exemple de la variable linguistique 'vitesse' avec trois termes linguistiques: petite, moyenne et grande.

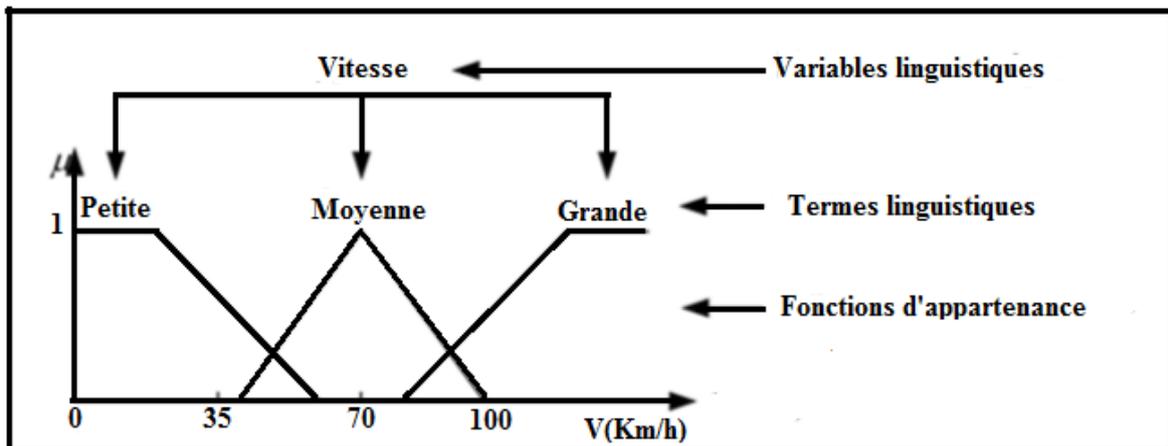


Figure III 2 Variable linguistique

Il est généralement imposé que les ensembles flous A_i doivent satisfaire la condition suivante:

$$\forall x, \exists i, \mu_{A_i}(x) \neq 0 \quad (III.5)$$

Cette condition qu'on appelle dans la littérature, propriété d'assurance (coverage property) (Pedrycz et Zadeh, 1995), exige que chaque élément soit affecté à au moins à un ensemble flou avec un degré d'appartenance non nul.

A cette condition, on ajoute souvent une propriété supplémentaire qui est le respect de la sémantique: les sous-ensembles doivent interpréter réellement les termes linguistiques qui leur sont associés.

Dans la partie inférieure de la figure III.3, le recouvrement entre les ensembles flous est tel qu'ils peuvent être ordonnés, et donc interprétés en termes linguistiques, par exemple de la très lente jusqu'à la très rapide.

La partie supérieure de la même figure montre un bel exemple d'une partition ininterprétable: il est impossible d'étiqueter les trois sous-ensembles flous centraux avec des termes linguistiques.

Le respect de ces deux propriétés confère aux variables linguistiques une meilleure modélisation des connaissances imprécises en réalisant une répartition de l'espace de connaissance. Cette granulation est définie comme une décomposition d'un ensemble de référence, comprenant des informations vagues ou imprécises, en plusieurs sous-ensembles flous pour former des répartition de connaissance [GUE09].

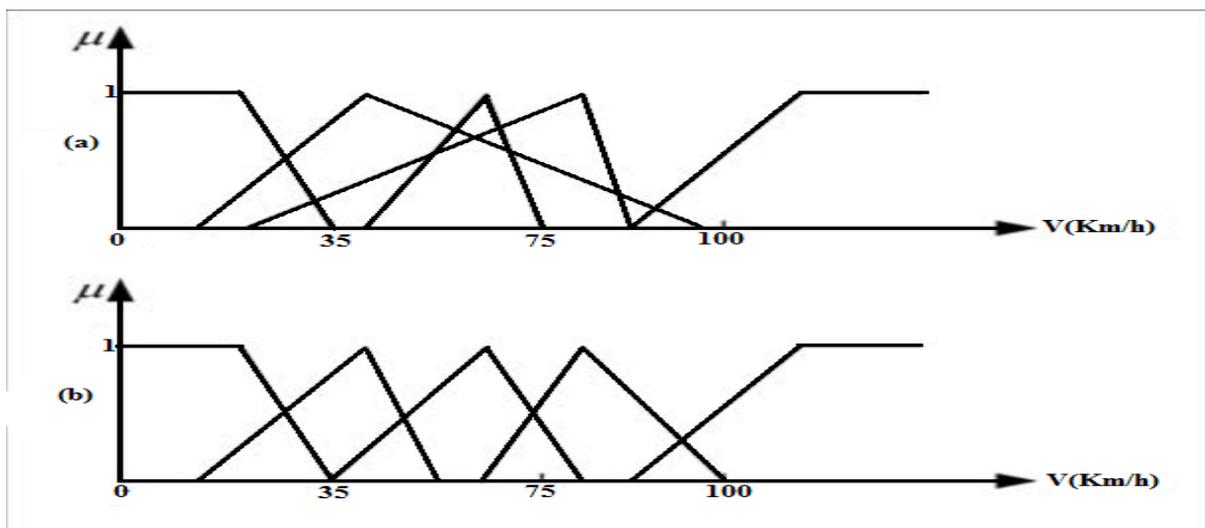


Figure III.3 La partition supérieure ne peut s'interpréter en termes linguistiques

III.2.3 Fonction d'appartenance

On représente les variables linguistiques par leurs fonctions d'appartenance. Donc à chaque sous-ensemble flou A_i est associée une fonction d'appartenance $\mu_{A_i}(x)$ où x est la variable linguistique. Tel que, à chaque point x est associé une valeur précise de $\mu_{A_i}(x)$, qui désigne, le degré d'appartenance de x à A_i . La fonction d'appartenance peut être représenté par plusieurs formes : Triangulaire, trapézoïdale, gaussienne ; On peut définir d'autres formes de fonctions d'appartenance, mais dans le réglage par logique floue, les formes déjà citées sont largement suffisantes pour délimiter les ensembles flous.

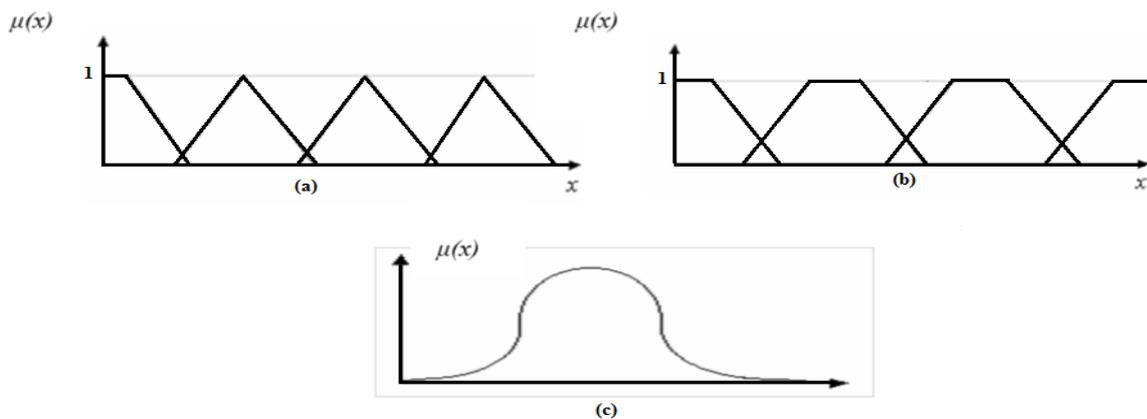


Figure.III.4 a/ Forme triangulaire, b/ Forme trapézoïdale, c/ Forme gaussienne

III.2.4. Règles et opérateurs flous

On appelle proposition floue élémentaire, une proposition de type X est A où (X, U, Tx) est une variable linguistique et A un sous ensemble de Tx . Une telle proposition possède un degré de vérité égal à $\mu_A(x)$ où x est une valeur réelle de X . D'une manière générale, on peut combiner ces propositions élémentaires à l'aide des opérateurs logiques de conjonction et de disjonction ('et' et 'ou') mis en œuvre respectivement par des T-normes et T-conormes (Klir et Yuan, 1994). Le degré de vérité des nouvelles propositions obtenues peut être calculé entre autre par les équations suivantes:

Conjonction: (X est A) ET (Y est B)

- minimum $(\mu_A(x), \mu_B(y))$
- produit $\mu_A(x) \times \mu_B(y)$

Disjonction: (X est A) OU (Y est B)

- maximum ($\mu A(x), \mu B(y)$)
- somme $\mu A(x) + \mu B(y) - \mu A(x) \times \mu B(y)$

L'opérateur d'implication permet d'introduire la notion de règle floue qui caractérise les relations de dépendance entre plusieurs propositions flous:

$$(X1 \text{ est } A1) \text{ ET } (X2 \text{ est } A2) \implies (Y \text{ est } B) \quad (\text{III.6})$$

Où X1, X2 et Y sont des variables linguistiques et A1 et A2 et B sont des sous-ensembles flous. Une telle règle se trouve habituellement dans les systèmes flous avec une formulation légèrement différente:

$$\text{Si } (X1 \text{ est } A1) \text{ ET } (X2 \text{ est } A2) \text{ Alors } (Y \text{ est } B) \quad (\text{III.7})$$

Dans cette dernière formulation la partie (X1 est A1) ET (X2 est A2) est appelée prémisse de la règle et la partie (Y est B) est appelée conclusion (conséquent).

III.3. Structure interne d'un système flou

De manière classique, le fonctionnement interne d'un système flou repose sur la structure présentée par la figure III 5 qui inclut quatre blocs:

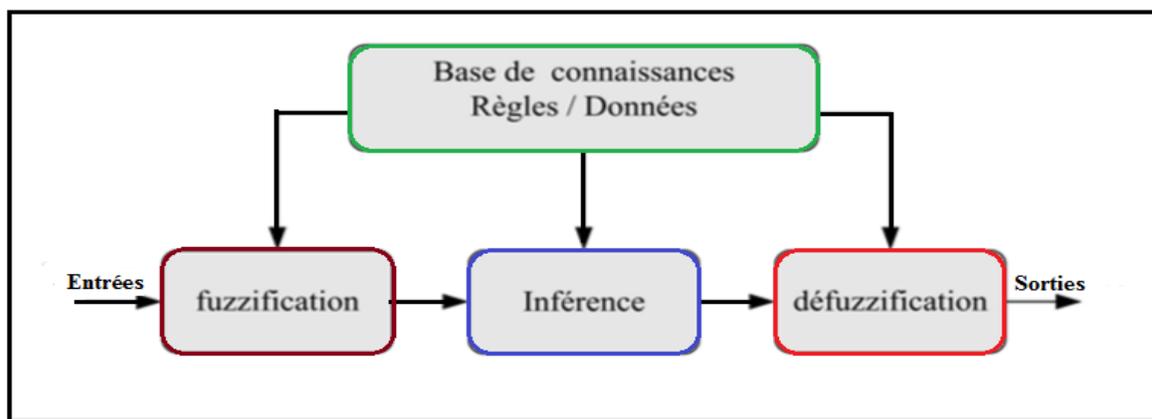


Figure III 5 Structure interne d'un système flou

- La base de connaissances.
- La fuzzification des variables d'entrée, avec éventuellement un prétraitement de l'information.
- L'inférence à partir d'une base de connaissance.

- La défuzzification, avec éventuellement un post-traitement de l'information.

III.3.1. Interface de fuzzification

L'objectif de la fuzzification est de convertir les variables déterministes d'entrées, qui sont des grandeurs physiques, en variables floues, c'est-à-dire en variables linguistiques, en définissant des fonctions d'appartenances [MAD07].

Les grandeurs physiques d'entrée E sont réduites à des grandeurs normalisées x dans une plage de variation, souvent $[1, -1]$, appelée univers de discours. Le nombre de valeurs linguistiques représenté par des fonctions d'appartenance pour une variable x peut varier, par exemple trois, cinq ou sept. Le nombre d'ensembles dépend de la résolution et l'intervention du réglage désiré. Les différents ensembles sont désignés par des désignations standards : NG (négatif grand, NM (négatif moyen), NP (négatif petit), EZ (environ zéro), PP (positif petit), PM (positif moyen), PG (positif grand). Dans un cas concret, on peut désigner les ensembles de façon spécifique.

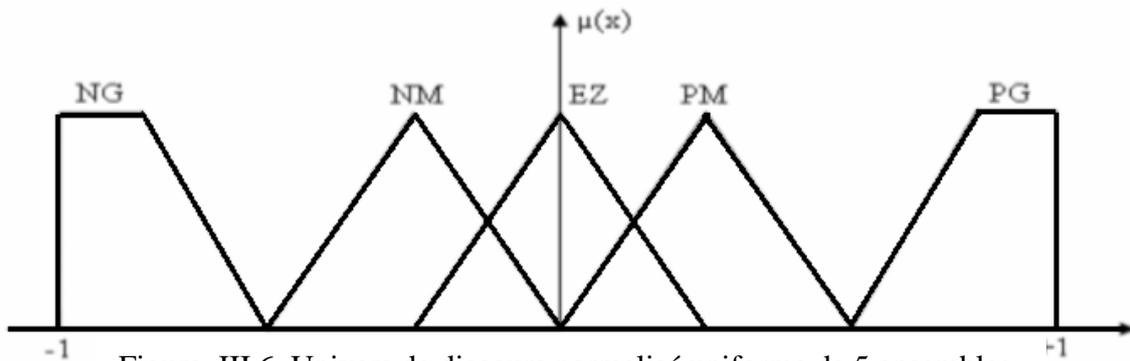


Figure. III 6 Univers de discours normalisé uniforme de 5 ensembles

III.3.2 Inférences avec la base des règles

La stratégie de réglage dépend essentiellement des inférences adoptées. Elles expriment la relation qu'il existe entre les variables d'entrée x , exprimées comme variables linguistiques, et la variable de sortie x_r , également exprimée comme variable linguistique. On peut décrire l'inférence de manière explicite par la description linguistique à l'aide d'un certain nombre de règles.

Chaque règle possède une **CONDITION**, précédée du symbole **Si**, et une conclusion, action ou opération, précédée de symbole **Alors**.

Il existe deux type d'inférence ; inférence avec une seul règle et inférence avec plusieurs règles.

Dans le cas de réglage et de commande, en utilise essentiellement l'inférence avec plusieurs règles. Les règles peuvent être exprimées sous la forme suivante :

Si Condition 1 , Alors Opération 1 , OU

Si Condition 2 , Alors Opération 2 , OU

Si Condition m , Alors Opération m.

Les conditions peuvent dépendre d'une ou plusieurs variables. Les variables sont liées entre elle par des opérateurs de la logique floue de forme ET et OU; le ET intervient généralement à l'intérieur d'une règle, tandis que le OU lie les différentes règles.

- **a/ Description par matrice d'inférence**

Afin d'avoir une description simple, on reformule le système de règles, décrit initialement par des descriptions linguistiques, tel que PG, EZ, NG, par la matrice suivante :

x1	NG	EZ	PG
x2			
NG	N	N	EZ
EZ	N	EZ	P
PG	EZ	P	P

Figure. III 7: Matrice de Macvicar et Whelan à neuf règles

Avec :

x1: variable 1, x2: variable 2

EZ : environ zéro, PG : positive grand, NG : négative grand,

- **b) Méthode d'inférence**

Il existe plusieurs méthodes d'inférences, on peut citer :

- la méthode Max-Min,
- la méthode Max- Produit,

- méthode somme-produit,

Ainsi que d'autres méthodes. On se limite dans cette étude à la méthode Max-min ou la méthode de Mamdani [MAD07].

III.3.3. Méthode Max-min

Au niveau de la condition : **ET** est traduit par la fonction **Min**, **OU** est traduit par la fonction **Max**.

Au niveau de la conclusion : **OU** est traduit par la fonction **Max**, Alors est traduit par la fonction **Min**.

La figure (III 8) illustre l'exemple d'inférence de Mamdani avec deux variables d'entrées et une variable de sortie, représenté par le tableau III 7.

Règles : Si x_1 est PG ET x_2 est EZ Alors x_r est EZ, OU

Si x_1 est EZ OU x_2 est NG Alors x_r est NG.

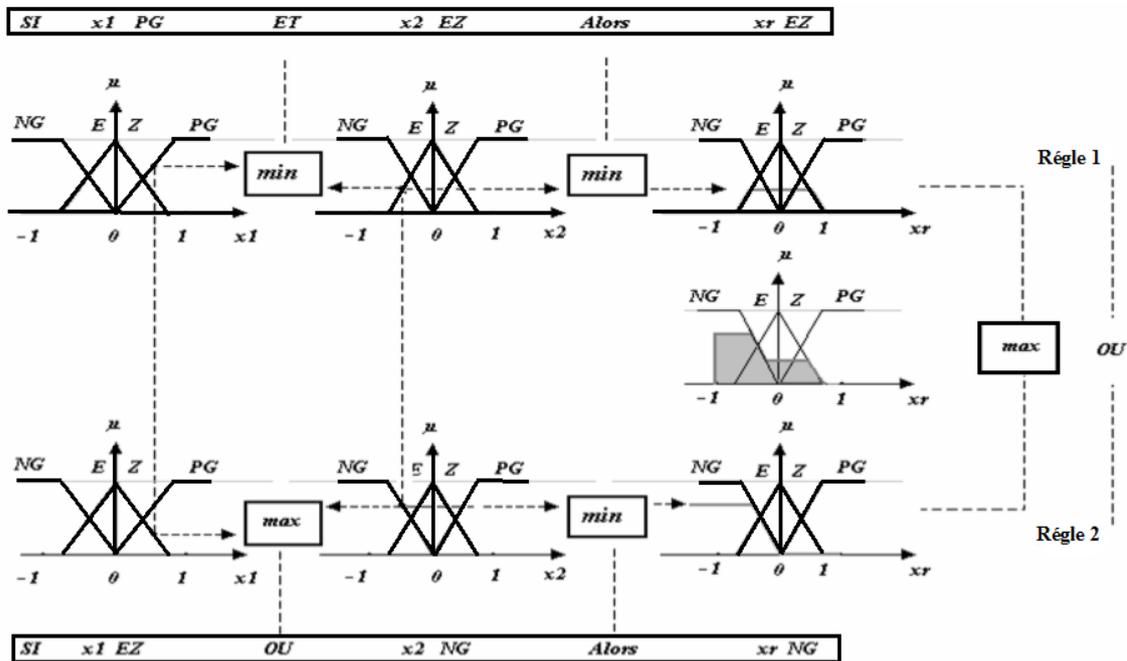


Figure III 8 Méthode d'inférence Max-Min

Pour chaque règle, on obtient la fonction d'appartenance partielle et la fonction d'appartenance résultante sera, donc, traitée par l'interface de défuzzification.

III.3.4. Défuzzification (Passage du symbolique vers le numérique)

C'est la phase de défuzzification proprement dite qui permet de générer une valeur numérique à partir de l'ensemble obtenu par composition des règles. Il existe plusieurs méthodes de défuzzification (au moins une dizaine); les plus communément employées sont [GUEN09]:

III.3.4.1. La méthode de centre de gravité COG

La défuzzification par centre de gravité consiste à calculer l'abscisse du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante μ_r de la phase de composition selon:

$$y^* = \int y \cdot \mu_r(y) dy / \int \mu_r(y) dy \quad (\text{III.8})$$

En pratique, on estime le centre de gravité, en calculant la moyenne d'un certain nombre de points échantillonnés sur la fonction:

$$y^* = \sum y_i \cdot \mu_r(y_i) / \sum \mu_r(y_i) \quad (\text{III.9})$$

III.3.4.2. La méthode de maximum

Cette méthode, s'applique uniquement dans le cas où la fonction d'appartenance associée à l'ensemble de sortie n'admet qu'un seul maximum. On choisit comme sortie l'abscisse y^* correspondant à ce maximum.

III.3.4.3. La méthode de la moyenne des maxima

Dans cette méthode, la valeur de sortie est estimée par l'abscisse du point correspondant au centre de l'intervalle M pour lequel la fonction d'appartenance est maximale. Cette valeur est fournie par l'expression:

$$y^* = (\inf(M) + \sup(M))/2 \quad (\text{III.10})$$

Où $\inf(M)$ et $\sup(M)$ sont respectivement les bornes inférieure et supérieure de l'intervalle M .

III.4. Structure du contrôleur flou

L'observation du processus montre que les grandeurs significative pour le contrôle sont la puissance et la vitesse de rotation, on adoptera, donc pour les entrées du contrôleur

flou ces deux grandeurs caractéristique notées Ω_g et P . quant à la sortie elle représente l'incrément du signal de commande à appliquer au processus à commander, celui-ci correspond à la valeur du couple de référence C_{em_ref} .

Le schéma bloc du contrôleur flou est illustré par la Figure III 9 :



Figure III 9 Contrôleur flou

III.5. Estimation par le contrôleur flou

A partir de l'existence des règles linguistiques, l'utilisation d'un contrôleur flou est mise en place afin d'assurer une bonne estimation de la vitesse du vent qui conduit à une valeur juste est précise de la vitesse de référence à imposer au générateur et donc une puissance maximale extraite.

Des règles de comportement à tenir afin de converger vers le point optimal sont relativement simples à établir. Ces règles dépendent des variations de puissance ΔP et de la variation de vitesse $\Delta \Omega_r$.

Les fonctions d'appartenance peuvent prendre n'importe quelle forme, dans notre cas elles sont triangulaires, principalement pour des raisons de simplification des calculs.

III.6. Configuration du contrôleur flou

III.6.1. Fuzzification et défuzzification

L'entrée de l'estimation reçoit deux entrées, la variation Δp et la variation $\Delta \Omega_g$, et engendre à la sortie une nouvelle vitesse de référence $n\Delta \Omega_r^*$, après l'ajout de la vitesse précédente a cette dernière, on aura la forme de la vitesse estimée Ω_r^* . Lorsqu'il s'agit d'une fuzzification, ces signaux sont transformés, après adaptation, à des variables linguistiques, dans ce cas les fonctions d'appartenance sont à sept ensembles flous chacun. Lorsqu'il s'agit d'une défuzzification le signale de sortie est obtenu après une transformation de la valeur

floue calculée par la méthode du centre de gravité, à une valeur déterministe de commande. Dans ce cas aussi, les fonctions d'appartenance sont à sept ensembles. Les ensembles flous ont des formes triangulaires à l'intérieur de l'univers de discours.

Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour les variable (Ω_r), (P) et la sortie (Ω_r^* estimée) respectivement les formes triangulaires comme le montre les figures (III.10, 11,12) suivantes :

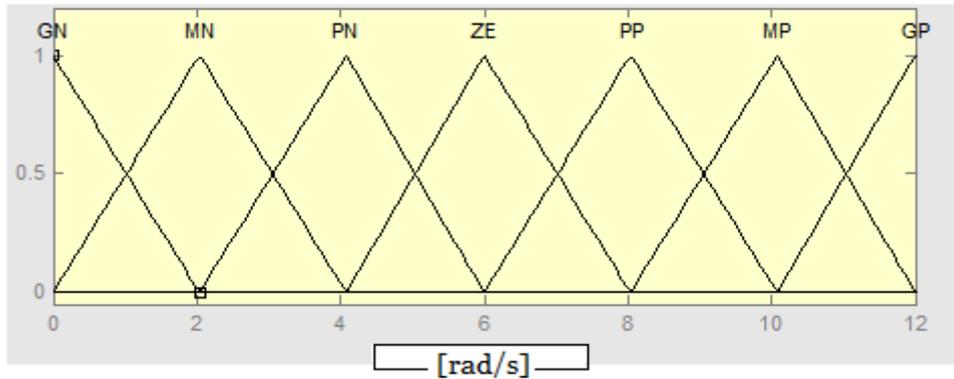


Figure III.10 fonction d'appartenance de la vitesse de rotation Ω_r

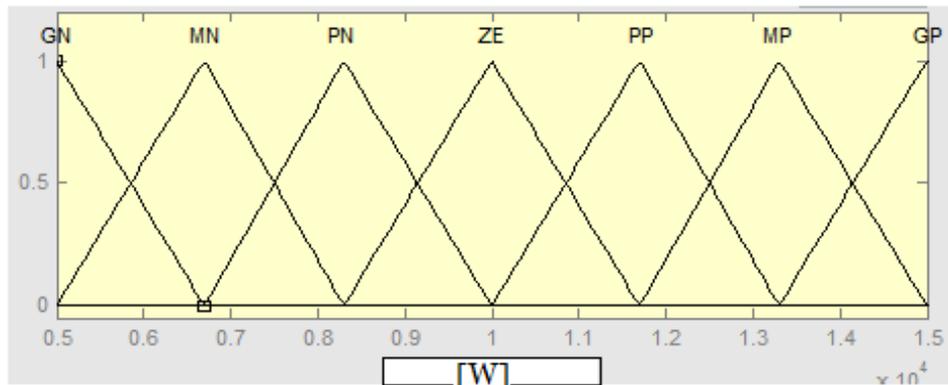


Figure III.11 fonction d'appartenance de la puissance P_m

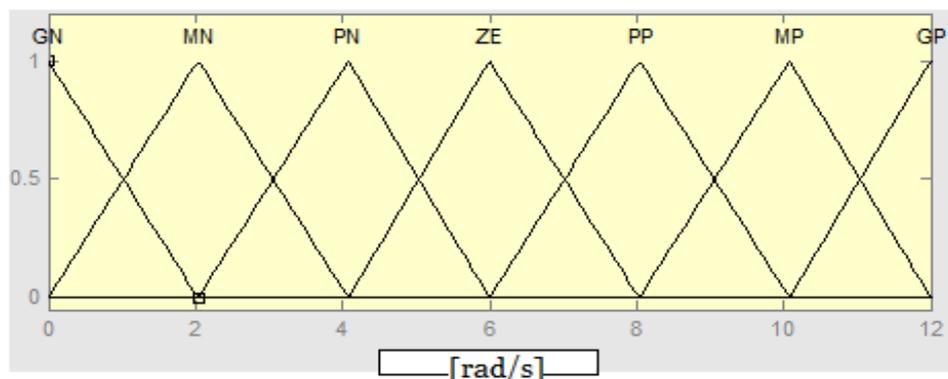


Figure III.12 fonction d'appartenance de la vitesse estimée Ω_r^* (sortie)

III.6.2. Variables linguistiques

Les variables linguistiques choisi pour la variable P et sont Ω_r et la sortie Ω_r^* estimée sont :

- GN : Grand Négatif
- MN : Moyen Négatif
- PN : Petit Négatif
- ZE : Zéro
- GP : Grand Positif
- MP : Moyen Positif
- PP : Petit Positif

III.6.3. Base des règles

Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou Possède sept ensembles flous ce qui donne un ensemble de quarante-neuf règles celle-ci peuvent être représentées par la matrice d'inférence suivante.

ΔP $\Delta \Omega$	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
GN	GP	GP	MP	ZE	MN	GN	GN
MN	GP	MP	PP	ZE	PN	MN	GN
PN	MP	PP	PP	ZE	PN	PN	MN
ZE	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
PP	MN	PN	PN	ZE	PP	PP	MP
MP	GN	MN	PN	ZE	PP	MP	GP
GP	GN	GN	MN	ZE	MP	GP	GP

Figure.III.13 Matrice d'inférence du régulateur flou

Cette matrice d'inférence est établie par une logique qui tient compte de la physique du système, donc une parfaite connaissance du comportement du système à régler nous permet d'établir un ensemble de règles flous, contrairement aux méthodes classiques où il nous faut un modèle mathématique.

Le tableau d'inférence (Table.III.13) est composé de règles floues, utilisées en parallèles, qui sont toutes du type :

Si « condition1 » **ET** « condition2 » **ALORS** « conclusion3 »

Les conditions étant liées entre elles par un opérateur logique ET, le degré d'appartenance de la fonction d'appartenance qui est la conclusion sera alors égal au minimum des deux degrés d'appartenance des conditions :

$$\mu_{conclusion1} = \min(\mu_{condition1}, \mu_{condition2})$$

Après on se basant sur la méthode d'inférence « min-produit » la sortie floue du contrôleur résultante des 49 règles de la matrice d'inférence est déterminée par la relation suivante :

$$\mu_{res}(x_r) = \text{Max}[\mu_{R1}(x_r), \mu_{R2}(x_r), \mu_{R3}(x_r) \dots \dots \mu_{Rm}(x_r)] \quad (\text{III.11})$$

Tels que :

$\mu_{Ri}(x_r)$: est la fonction d'appartenance partielle.

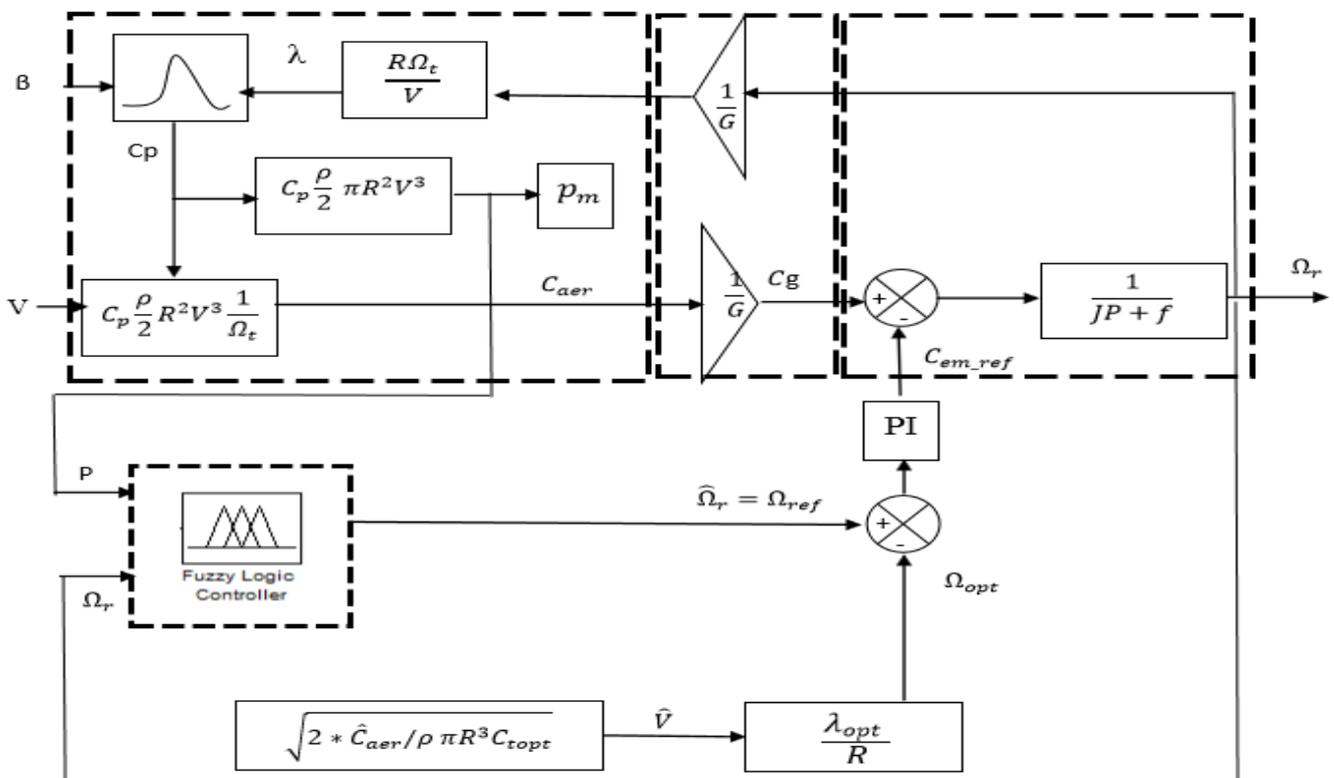


Figure III.14. Schéma bloc du modèle de la turbine avec le contrôleur flou

III.7. conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les concepts de base de la logique floue, puis nous avons introduit le concept d'un observateur flou pour l'estimation de la vitesse du vent de la turbine éolienne.

Le système est implémenté sous MATLAB-Simulink dont, les résultats obtenus vont montrer les performances de cet observateur et ils seront donnés dans le chapitre V.

CHAPITRE IV

Les Réseaux de neurones

IV. INTRODUCTION

Les techniques avancées de l'automatique issues de l'intelligence artificielle deviennent de plus en plus familières dans divers domaines d'application ces dernières années. L'intelligence artificielle est une discipline scientifique relative au traitement des connaissances et au raisonnement, dans le but de permettre à une machine d'exécuter des fonctions normalement associées à l'intelligence humaine telles que la compréhension, le raisonnement, le dialogue, l'adaptation, l'apprentissage, etc.

Le concept qui nous intéresse plus particulièrement dans la notion de l'intelligence artificielle est celui des réseaux de neurones artificiels (RNAs). L'idée forte de ce concept est la suivante : plutôt que de donner des connaissances sophistiquées à un système, on le dote de capacités à en acquérir et/ou à améliorer des connaissances simples.

Les RNAs 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 électriques 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.

Ce chapitre décrit une technique intelligente nouvellement introduite dans le monde, il s'agit principalement des réseaux de neurones artificiels ainsi nous abordons par la suite l'estimation de la vitesse du vent de l'éolienne par cette dernière.

A la fin de ce chapitre nous présentons la construction de l'estimateur de la turbine éolienne tout le système sera implémenté sous MATLAB-Simulink et validé par des essais en simulation,

IV.1 Réseaux de neurones

IV.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.

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.

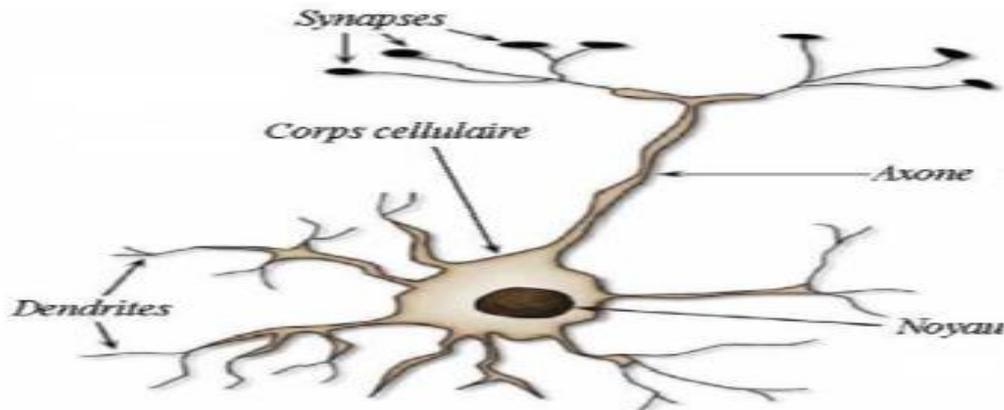


Figure IV.1 Un modèle biologique

IV.1.2 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 McCulloch 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 figure IV.2.

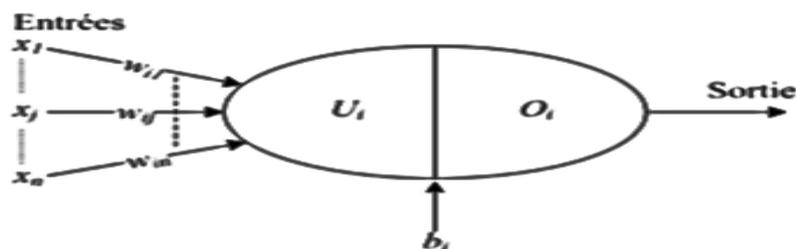


Figure. IV.2 Modèle de base d'un neurone formel

- U_i : représente la somme pondérée des entrées du neurone. Elle est donnée par:

$$U_i = \sum_j w_{ij} \times x_j + b_i \quad (\text{IV.1})$$

Où: x_j : représente l'entrée j connectée au neurone i .

b_i : Le seuil interne du neurone.

w_{ij} : désigne le poids de la connexion reliant l'entrée j au neurone.

- $O_i = g(U_i)$ est la sortie du neurone et g sa fonction d'activation.

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

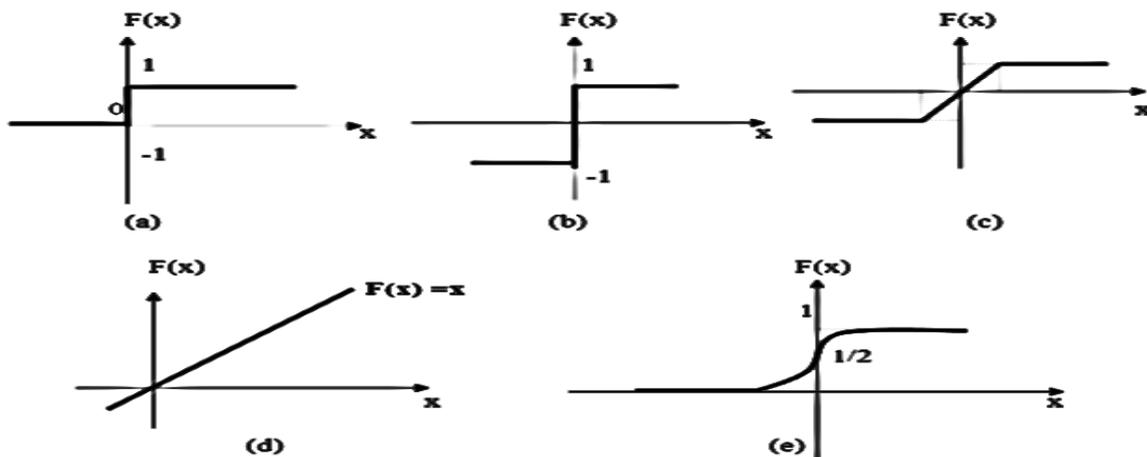


Figure. IV.3 Les différentes fonctions d'activation pour les neurones

Avec :

- La fonction Heaviside (Fig.3.a).
- La fonction signe (Fig. 3.b).
- La fonction linéaire à seuil (Fig.3.c).
- La fonction linéaire (Fig. 3.d).
- La Fonction sigmoïde (Fig.3.e). [Bel04]

Un neurone est caractérisé par sa fonction d'activation. Conformément au neurone biologique, les fonctions d'activation sont généralement croissantes. Les fonctions les plus utilisées sont la fonction linéaire et la fonction sigmoïde. Leur choix revêt une importance capitale et dépend souvent du type de l'application et du domaine de variation des variables d'entrée/sortie.

Un réseau de neurones (RN) est un système informatique qui a des caractéristiques semblables aux réseaux de neurones biologiques. Il est constitué de plusieurs unités (neurones)

organisées sous forme de niveaux différents appelés couches du réseau. Les neurones appartenant à la même couche possèdent les mêmes caractéristiques et utilisent le même type de fonction d'activation. Entre deux couches voisines les connexions se font par l'intermédiaire de poids qui jouent le rôle des synapses. L'information est portée par la valeur de ses poids, tandis que la structure du réseau de neurones ne sert qu'à traiter l'information et l'acheminer vers la sortie. La structure ou la topologie d'un réseau de neurones est la manière dont les neurones sont connectés. Les structures résultantes peuvent être très variées mais elles sont souvent réparties en deux grandes familles à savoir: les réseaux de neurones non bouclés et les réseaux de neurones bouclés [GUE09] [BUR01].

IV.1.3 Réseaux non bouclés

Dans ce type de structure dite (feedforward), la propagation de l'information se fait uniquement de l'entrée vers la sortie. Les neurones de la même couche peuvent se connecter uniquement avec les neurones de la couche suivante. L'architecture la plus utilisée est le Perceptron multicouches. Les neurones composant ce réseau s'organisent en N couches successives ($N \geq 3$). Dans l'exemple suivant (figure IV.4), nous présentons un perceptron à trois couches. Les neurones de la première couche, nommée couche d'entrée, voient leur activation forcée à la valeur d'entrée. La dernière couche est appelée couche de sortie. Elle regroupe les neurones dont les fonctions d'activation sont généralement de type linéaire. Les couches intermédiaires sont appelées couches cachées. Elles constituent le cœur du réseau. Les fonctions d'activation utilisées sont de type sigmoïde.

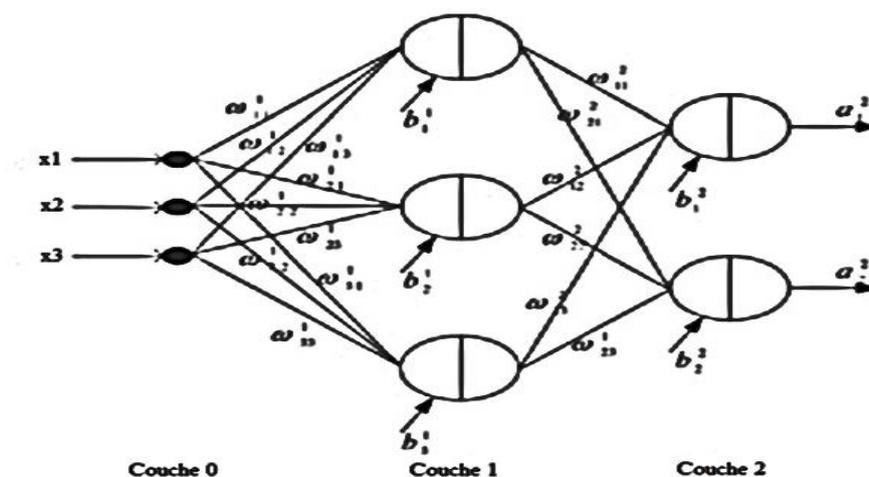


Figure IV.4 Perceptron à une couche cachée

Sur la figure IV.3, les termes b_i^l et w_{ij}^l désignent respectivement le biais du neurone i de la couche l et le poids de connexion entre le neurone j de la couche $l - 1$ et le neurone i de la couche l .

Tenant compte de ces notations, la sortie du neurone i dans la couche l est peut être donnée

par :

$$U_i^l = \sum_j^{N^{l-1}} w_{ij}^l \times O_j^{l-1} + b_i^l \quad (IV.2)$$

$$O_i^l = g^l(U_i^l) \quad (IV.3)$$

Avec $l = 1, 2$

Où $g^l(\cdot)$ est la fonction d'activation des neurones de la couche l .

On peut réécrire les équations ci-dessus sous forme matricielle comme suit:

$$U^l = W^l \times O^{l-1} + b^l \quad (IV.4)$$

$$O^l = g^l(U^l) \quad (IV.5)$$

Avec : $U^l = (U_1^l, U_2^l, \dots, \dots, U_{N^l}^l)^T, O^l = (O_1^l, O_2^l, \dots, \dots, O_{N^l}^l)^T, b^l = (b_1^l, b_2^l, \dots, \dots, b_{N^l}^l)^T$

$$W^l = \begin{pmatrix} w_{11}^l & w_{12}^l & \dots & w_{1N^{l-1}}^l \\ w_{21}^l & w_{22}^l & \dots & w_{2N^{l-1}}^l \\ \vdots & \vdots & \ddots & \dots \\ w_{N^l 1}^l & w_{N^l 2}^l & \dots & w_{N^l N^{l-1}}^l \end{pmatrix}$$

Le perceptron multicouche présente une alternative prometteuse pour la modélisation des systèmes complexes. Avec une seule couche cachée, il constitue une approximation universelle. Les études menées dans (Hornik et al, 1989; Cybenko, 1989) montrent qu'il peut être entraîné de manière à approximer n'importe quelle fonction sous réserve de mettre suffisamment de neurones dans la couche cachée et d'utiliser des sigmoïdes comme fonctions d'activation.

IV.1.4 Réseaux bouclés

Un réseau dynamique ou récurrent possède la même structure qu'un réseau multicouche muni de rétroactions. Les connexions rétroactives peuvent exister entre tous les neurones du réseau sans distinction, ou seulement entre certains neurones (les neurones de la couche de sortie et les neurones de la couche d'entrée ou les neurones de la même couche par exemple). Figure IV.5 montre deux exemples de réseaux récurrents. Le premier est un simple multicouche qui utilise un vecteur d'entrée qui contient les copies des activations de la couche

de sortie du réseau et le deuxième est un réseau à mémoire se distingue du premier par la présence des unités mémoires [Sas94].

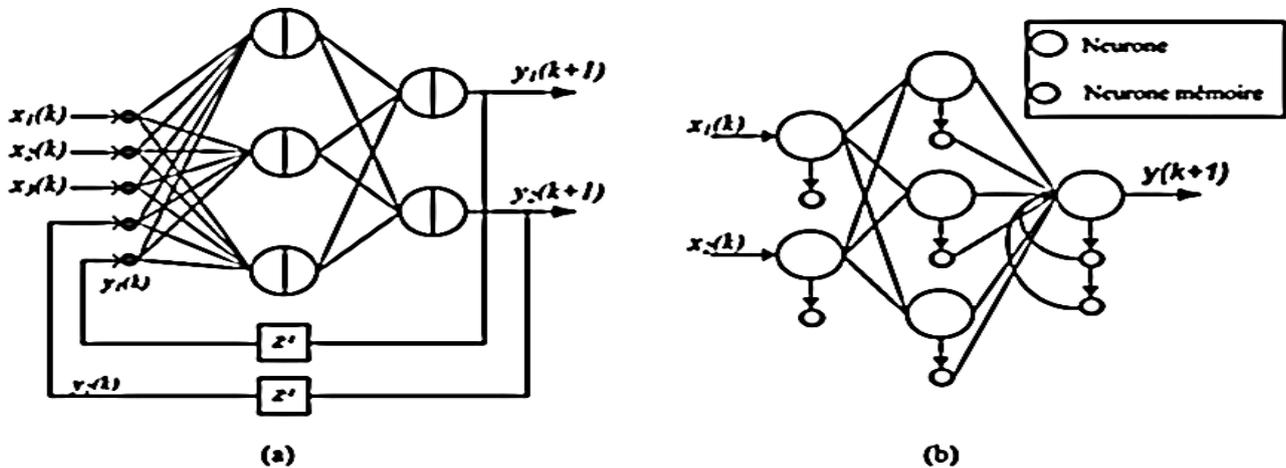


Figure IV.5 Réseaux de neurones récurrents

IV.1.5. Apprentissage dans les réseaux de neurones

L'apprentissage dans le contexte des réseaux de neurones, est le processus de modification des poids de connexions (y compris les biais) ou plus rarement du nombre de couches et de neurones [Man97], afin d'adapter le traitement effectué par le réseau à une tâche particulière.

On distingue trois familles d'apprentissage:

IV.1.5.1. Apprentissage supervisé: dans ce cas, un superviseur (ou expert humain) fournit une valeur ou un vecteur de sortie (appelé cible ou sortie désirée), que le réseau de neurones doit associer à un vecteur d'entrée. L'apprentissage consiste dans ce cas à ajuster les paramètres du réseau afin de minimiser l'erreur entre la sortie désirée et la sortie réelle du réseau.

IV.1.5.2. Apprentissage semi-supervisé : ou apprentissage par renforcement: Ce mode d'apprentissage, suppose qu'un comportement de référence n'est pas possible, mais en revanche, il est possible d'obtenir des indications qualitatives (vrai, faux, ...) sur les performances du réseau.

IV.1.5.3. Apprentissage non supervisé: Dans cet apprentissage, les données ne contiennent pas d'information sur la sortie désirée. Il n'y a pas de superviseur. La tâche du réseau consiste,

par exemple dans ce cas, à créer des regroupements de données selon des propriétés communes (classification).

IV.1.6. Algorithme de rétro-propagation du gradient

Dans les systèmes experts, les connaissances de l'expert ont une forme énumérée: elles sont exprimées sous forme de règles. Dans le cas des réseaux de neurones, les connaissances ont une forme distribuée: elles sont codées dans les poids des connexions, la topologie du réseau, les fonctions de transfert de chaque neurone, le seuil de ces fonctions, la méthode d'apprentissage utilisée. Il existe un certain nombre de méthodes d'apprentissage [BEN.M. 07] :

IV.1.6.1. Règle de Hebb

C'est la méthode d'apprentissage la plus ancienne(1949), elle est inspirée de la biologie. Elle traduit le renforcement des connexions liant deux neurones activés. Si un des deux neurones au moins n'est pas activé, le poids de la connexion n'est pas modifié.

IV.1.6.2. Rétro-propagation du gradient de l'erreur

Cet algorithme est utilisé dans les réseaux de type feedforward, ce sont des réseaux de neurones à couche, ayant une couche d'entrée, une couche de sortie, et au moins une couche cachée. Il n'y a pas de récursivité dans les connexions, et pas de connexions entre neurones de la même couche. Le principe de la rétro-propagation consiste à présenter au réseau un vecteur d'entrées, de procéder au calcul de la sortie par propagation à travers les couches, de la couche d'entrées vers la couche de sortie passant par les couches. Cette sortie obtenue est comparée à la sortie désirée, une erreur est alors obtenue. A partir de cette erreur, est calculé le gradient de l'erreur qui est à son tour propagé de la couche de sortie vers la couche d'entrée, d'où le terme de rétro-propagation. Cela permet la modification des poids du réseau et donc l'apprentissage. L'opération est réitérée pour chaque vecteur d'entrée et cela jusqu'à ce que le critère d'arrêt soit vérifié [CHEK09].

IV.2. Type d'Application du Réseau

Les réseaux de neurone peuvent être appliqués à plusieurs types de tâches, telles que : la reconnaissance de formes (reconnaissance de visages), la classification, estimation la transformation de données (compression), la prédiction (prédiction de séries temporelles), le contrôle de processus et l'approximation de fonctions. Toutes ces tâches peuvent être

regroupées en deux groupes principaux et cela selon le type des sorties fournies par le réseau et le comportement qui est recherché :

IV.2.1. Réseaux pour l'Approximation de Fonctions

Ce type de réseau doit avoir une sortie continue et est généralement employé pour l'approximation exacte (interpolation) ou pour l'approximation approchée d'une fonction représentée par les données d'apprentissage. Cette fonction acquise par le réseau permet de prédire les sorties étant données les entrées. On appelle ce type de problème, un problème de régression. En général, les fonctions représentées sont des fonctions avec des variables d'entrée et de sortie continues.

IV.2.2. Réseaux pour la Classification

Ce type de réseau doit attribuer des classes (valeur de sortie non continue) aux exemples qui lui sont fournis. La classification est un cas particulier de l'approximation de fonctions où la valeur de sortie est discrète et appartient à un ensemble limité de classes. Cet ensemble de classes peut être connu d'avance dans le cas de l'apprentissage supervisé.

Remarque :

Il existe donc de très nombreuses sortes de réseaux de neurones, nous nous intéressons à l'étude du réseau perceptron monocouche à deux entrées objet de notre travail.

IV.3. Le perceptron monocouche à deux entrées

Il est à l'origine de plusieurs autres réseaux de neurones avec apprentissage supervisé par correction d'erreur. Le modèle du Perceptron monocouche est devenu très connu, tout en étant associé à la règle d'apprentissage de la Rétro-Propagation.

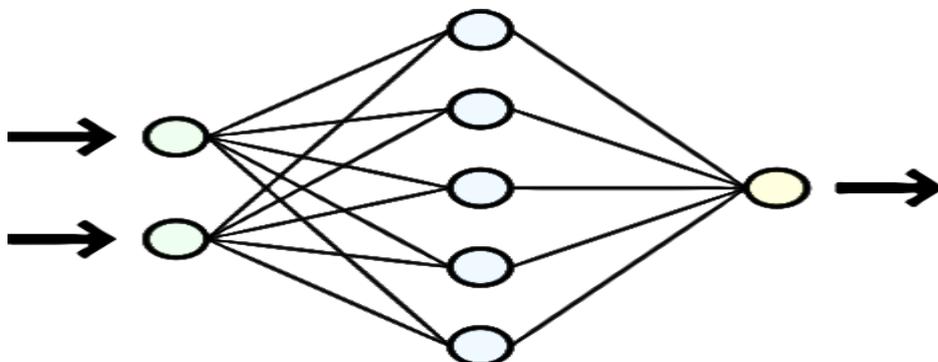


Figure IV.6. Modèle du Perceptron monocouche à deux entrées

Avec une seule couche cachée, on peut approcher n'importe quelle fonction continue définie sur un compact, à condition de mettre assez d'unités sur la couche cachée.

IV.4. Estimation de la vitesse du vent par un RNA

L'utilisation d'un unique anémomètre sur l'éolienne conduit à utiliser une mesure locale de la vitesse du vent qui n'est pas représentative de la valeur moyenne de la vitesse du vent apparaissant sur les pales. Une mesure erronée de la vitesse du vent conduit à une valeur erronée de la vitesse de référence à imposer au générateur et donc une dégradation de la puissance extraite. Pour cette raison, nous proposons ici un algorithme basé sur un RNA qui permet d'estimer la vitesse du vent à partir de la puissance mécanique et de la vitesse de rotation de la turbine éolienne comme la figure (Figure IV.7) suivante le montre.

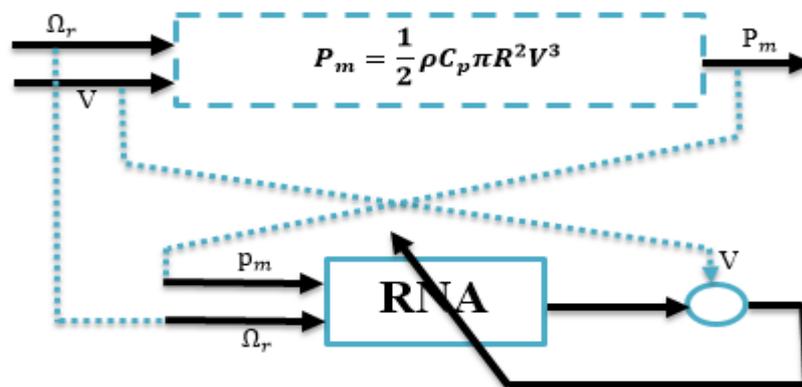


Figure IV.7. schéma bloc de l'estimation de la vitesse du vent de la turbine

Un RNA à une couche cachée et apprentissage supervisé est utilisé pour construire un estimateur de la vitesse du vent à grande précision. L'architecture de l'estimateur RNA est présentée sur la figure IV.8 suivante :

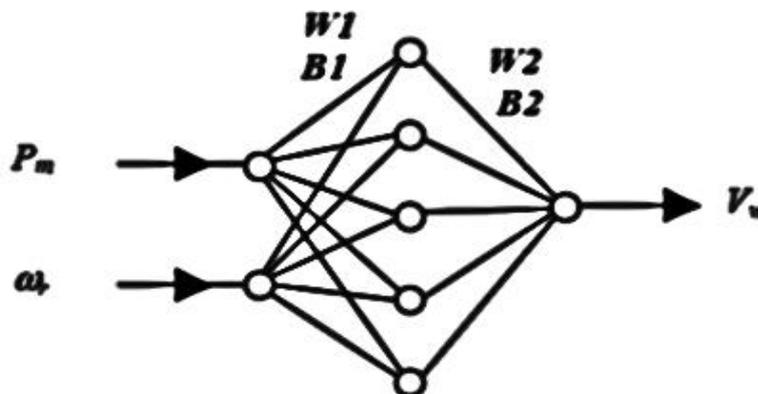


Figure IV.8 Structure du l'estimateur RNA avec cinq neurones caché avec tan-sigmoïde et un neurone linéaire en sortie

Exemple de La procédure d'entraînement du réseau de neurone multicouche présenté par l'algorithme de la figure IV.9 on applique les mêmes étapes dans notre réseau monocouche :

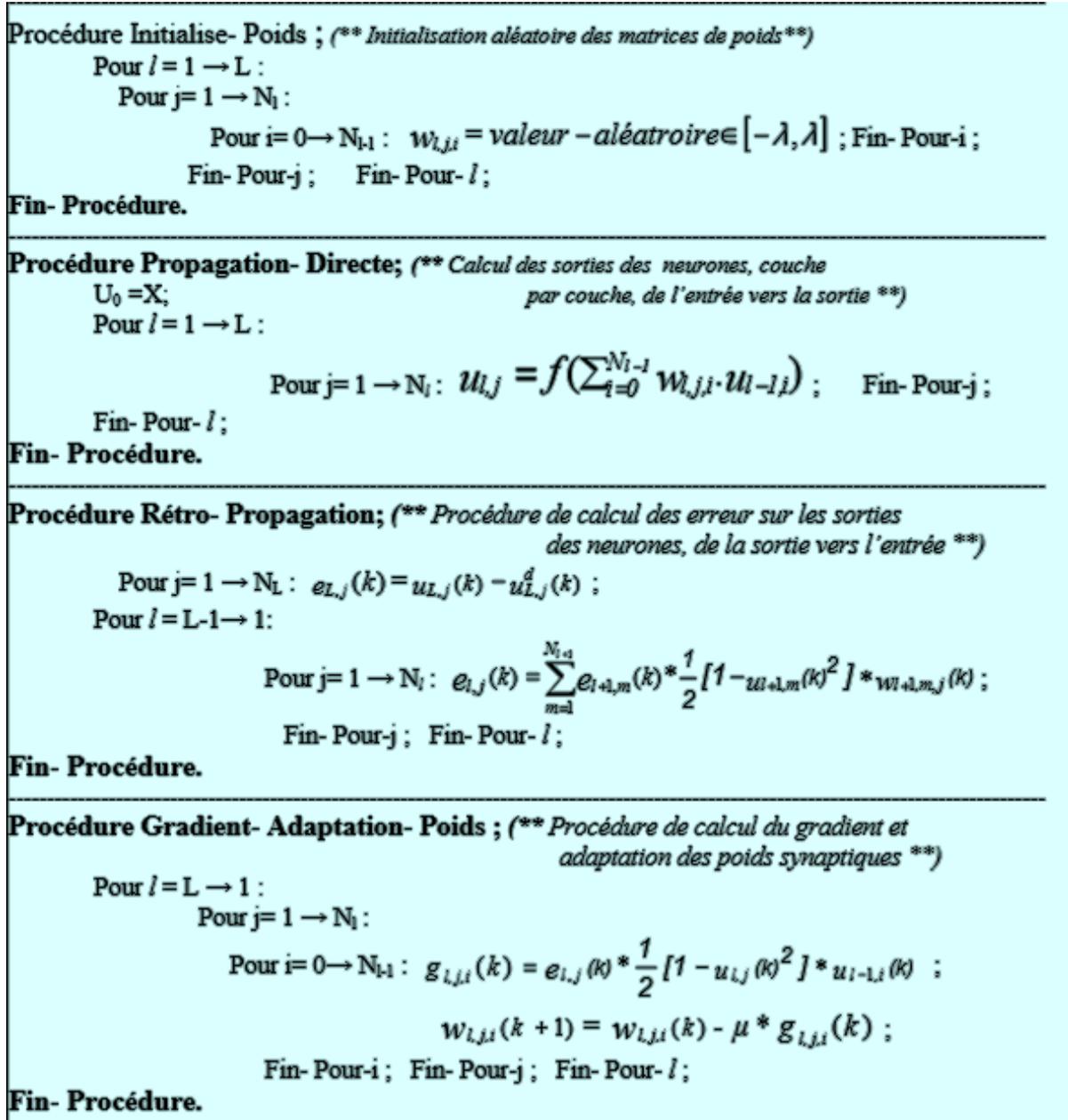


Figure IV.9. Algorithme d'entraînement d'un réseau multicouche par la rétro-propagation.

Un essai en simulation a été réalisé au préalable. La vitesse du générateur et la puissance ont été utilisées comme une matrice d'entrée du RNA. D'autre part, on a utilisé la vitesse du vent comme une sortie désirée du RNA comme montré à la figure (IV.6), avec deux neurones linéaires dans la couche d'entrée, cinq neurones à fonction d'activation sigmoïdal à la couche cachée, et un neurone linéaire à la couche de sortie.

IV.4.2. Stratégie de contrôle avec compensation de coefficient de puissance

La notion de contrôle de l'extraction de la puissance maximale avec la courbe de coefficient de puissance est clairement illustrée dans la figure IV.8 et mis en œuvre ici. Avec la vitesse du vent estimée par l'RNA, la référence de vitesse du rotor sera générée à partir un gain $K = \lambda_{opt}/R$. Le schéma de principe du module de contrôle basé sur RNA est montré.

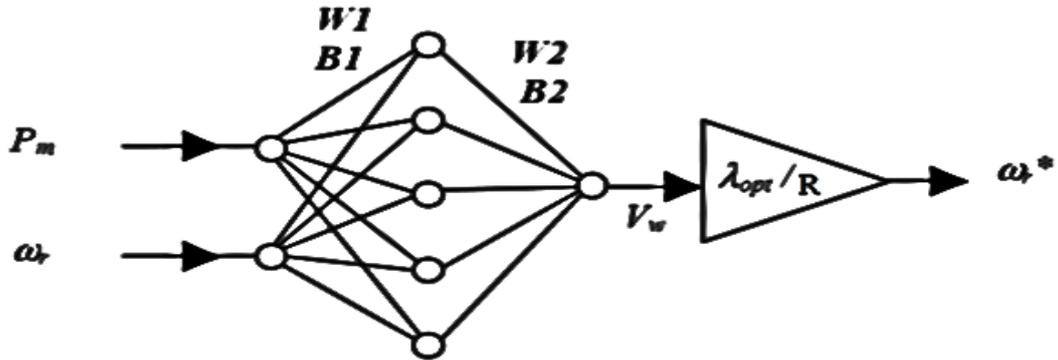


Figure IV.10. Module de commande à base RNA de la vitesse du rotor de la turbine

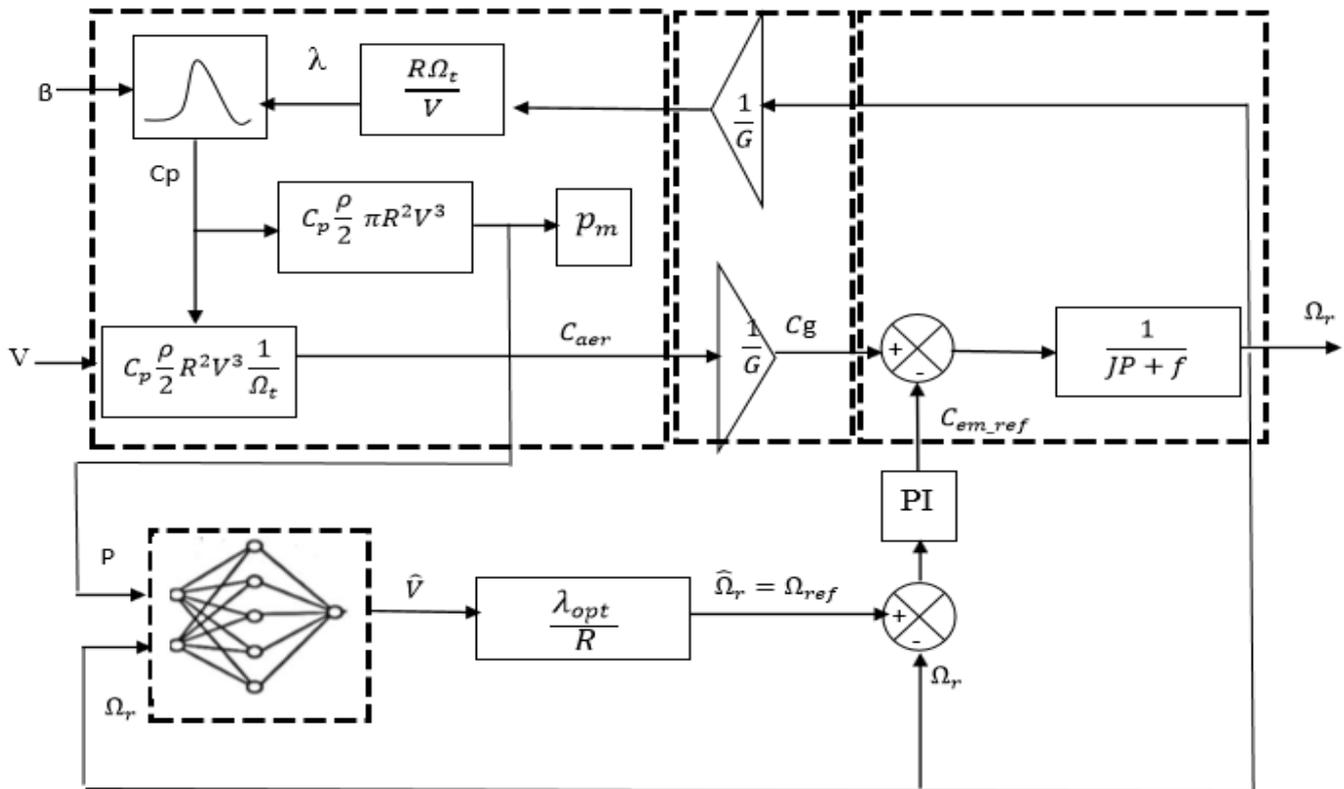


Figure IV.11. Schéma bloc du modèle de la turbine avec le contrôleur neuronal

IV.5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les concepts de base des réseaux de neurone, puis nous avons introduit le concept d'un observateur neuronal pour l'estimation de la vitesse du vent de la turbine éolienne puis ensuite avons abordé le processus d'apprentissage des RNAs dont, on a détaillé l'algorithme d'apprentissage de retro-propagation.

Le système est implémenté sous MATLAB-Simulink dont, les résultats obtenus vont montrer les performances de l'observateur à reproduire avec exactitude le comportement de la turbine éolienne. Les résultats de simulation seront donnés dans le chapitre V.

CHAPITRE V

Résultats de simulation et discussions

V.1 profil du vent

Afin de pouvoir simuler notre système, on a utilisé un tableau contenant des valeurs du vent prélevées au tour d'une valeur moyenne 10m/sec. Prenant en compte l'hypothèse que la vitesse du vent change chaque une dizaine de minute, les valeurs du vent utilisées sont alors mesurées chaque dix minute. Le profil du vent obtenu après simulation est illustré dans la figure V.1.

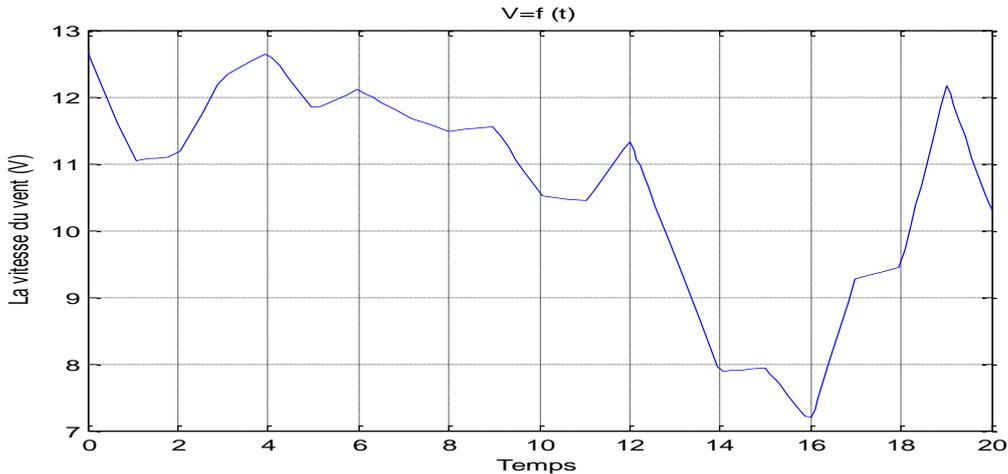


Figure V.1 Profil du vent

V.2 MPPT avec asservissement de la vitesse

On remarque que les courbes de C_p en fonction de la vitesse mécanique du rotor sont maintenues toujours à une valeur maximale $C_{pmax} = 0.48$ pour les différentes vitesses du vent, pour un angle de calage $\beta = 0$ fixe, comme la montre la figure ci-dessous.

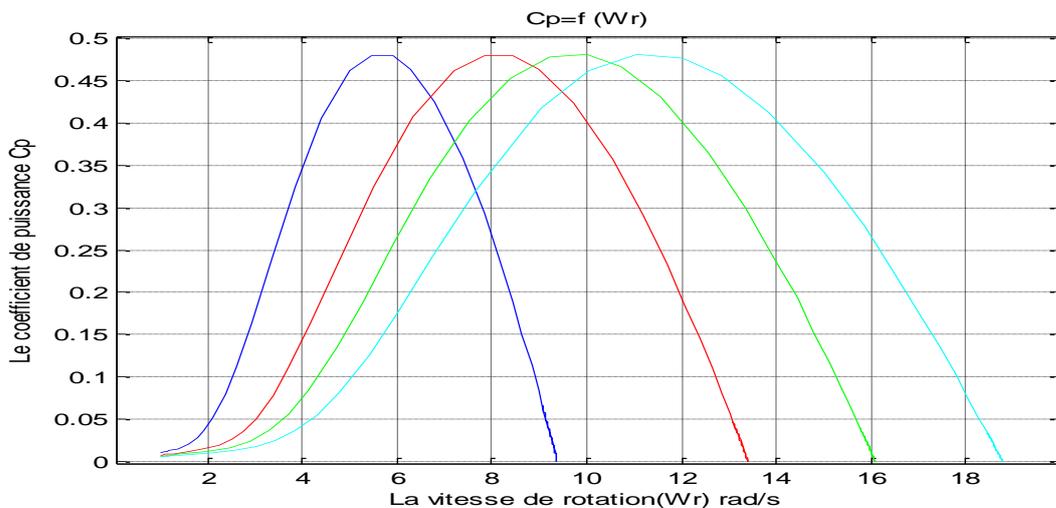


Figure V.2 $C_p = f (W_r)$

On remarque que l'augmentation de la valeur d'angle de calage β provoque une diminution de la valeur du coefficient de puissance C_{pmax} , de ce fait une dégradation de la vitesse de rotation de la turbine comme la figure V.3 le montre.

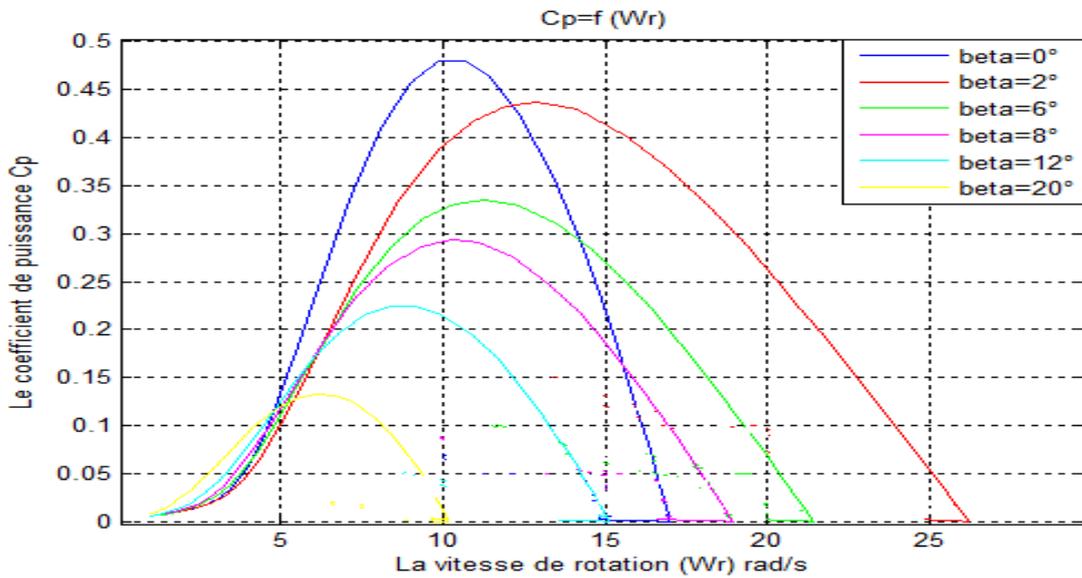


Figure V.3 $C_p=f(Wr)$

La figure V.4 représente le coefficient de puissance C_p (calculer à partir de l'équation $C_p(\lambda, \beta)$) en fonction du ratio de la vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β . On remarque que lorsque l'angle de calage augmente le C_p diminue et λ optimale varie aussi.

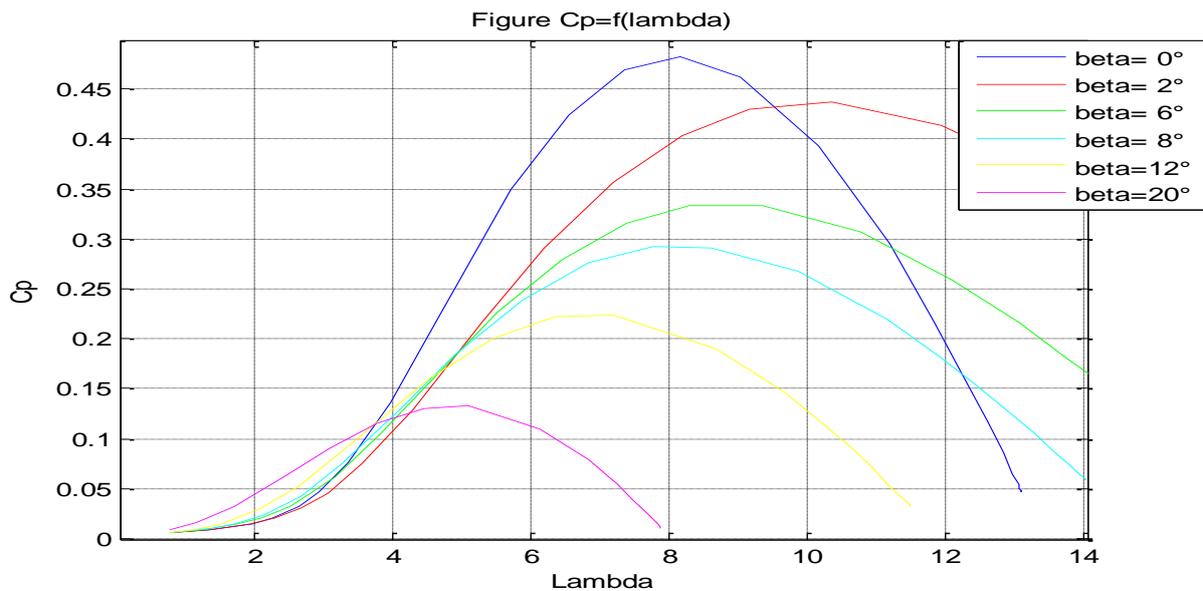


Figure V.4 $C_p=f(\lambda)$

On constate dans la figure V.5 que la puissance mécanique extraite est maximale pour une vitesse du vent moyenne égale à 14m/s, et elle diminue au fur et à mesure en diminuant la vitesse du vent et lambda optimale ($\lambda_{opt} = 8$). sachant que la valeur de β est fixer égale à 0.

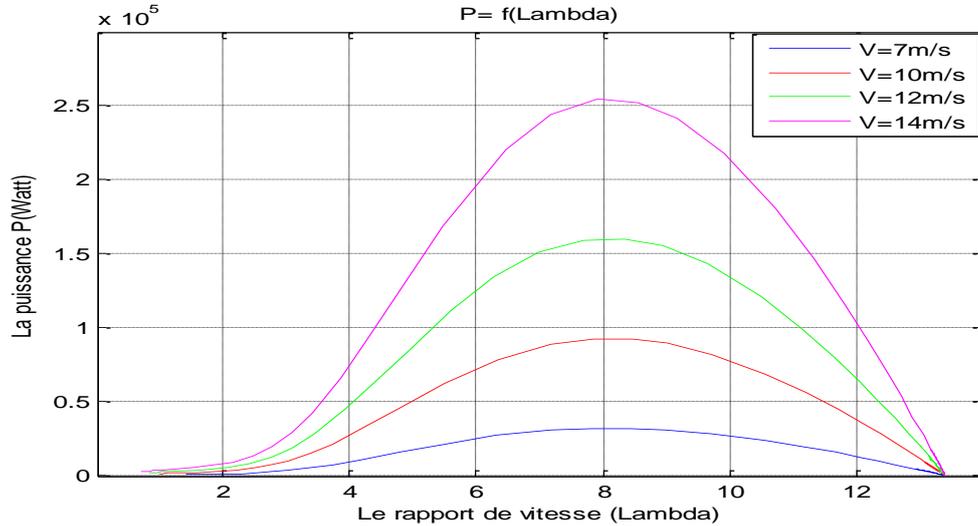


Figure V.5 P=f (Lambda)

La figure V.6 représente le tracé de la puissance mécanique en fonction de la vitesse du rotor de la turbine, pour différente valeur de la vitesse du vent.

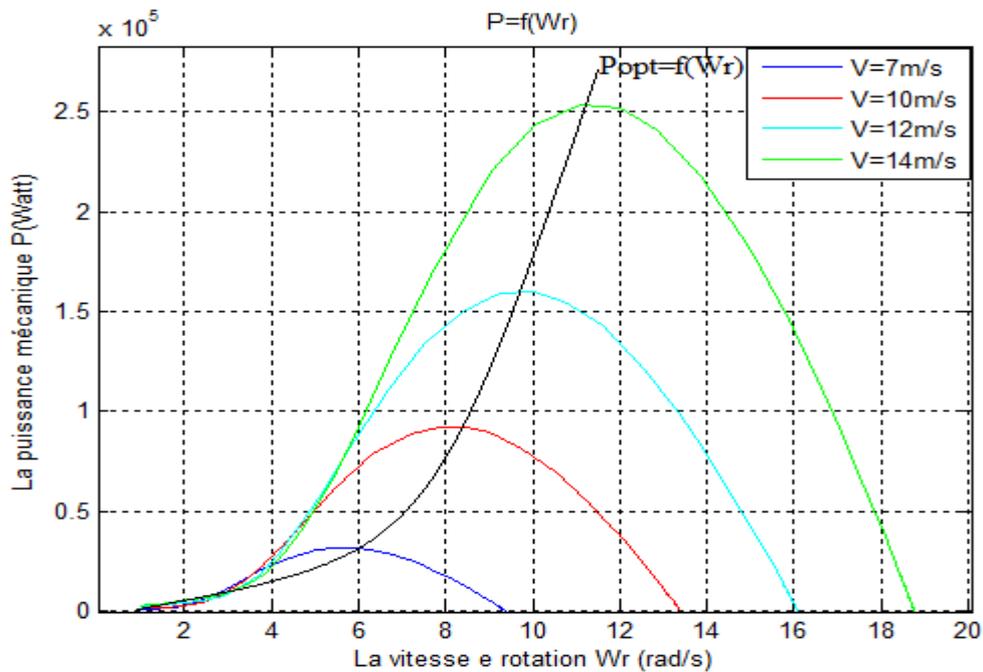


Figure V.6. Caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation.

Chapitre V « Résultats simulation et discussions »

Les caractéristiques de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation du rotor présentent une valeur optimale pour chacune valeur de la vitesse du vent

La figure V.7 représente le tracé de la puissance mécanique en fonction du ratio de vitesse Lambda pour différentes valeur de beta (β). On remarque que le maximum de puissance diminue en augmentant l'angle de calage beta.

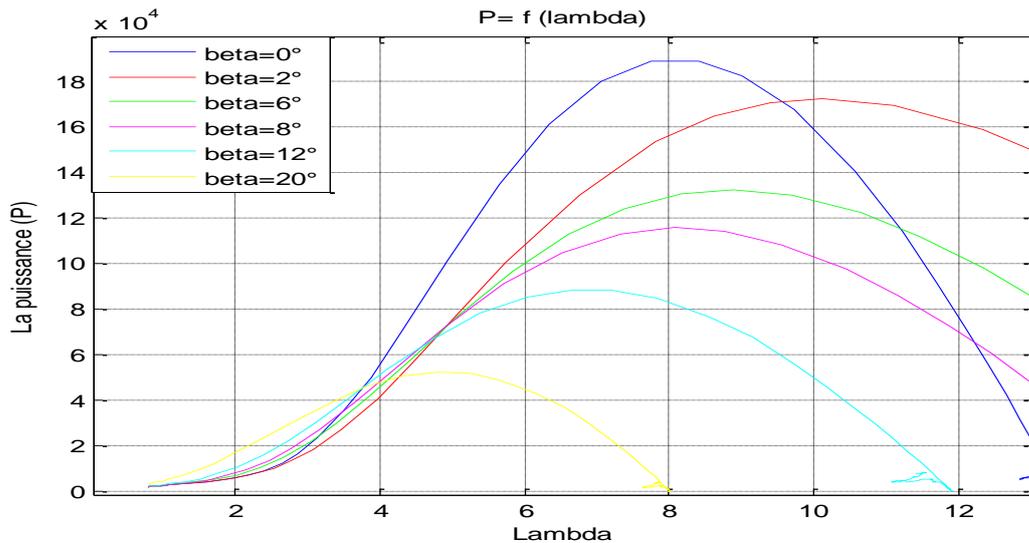


Figure V.7 P=f (Lambda)

La figure V.8 illustre la variation de la puissance mécanique en fonction de vitesse de rotation pour différentes valeur de beta (β). On remarque l'augmentation de beta provoque la diminution de la puissance mécanique.

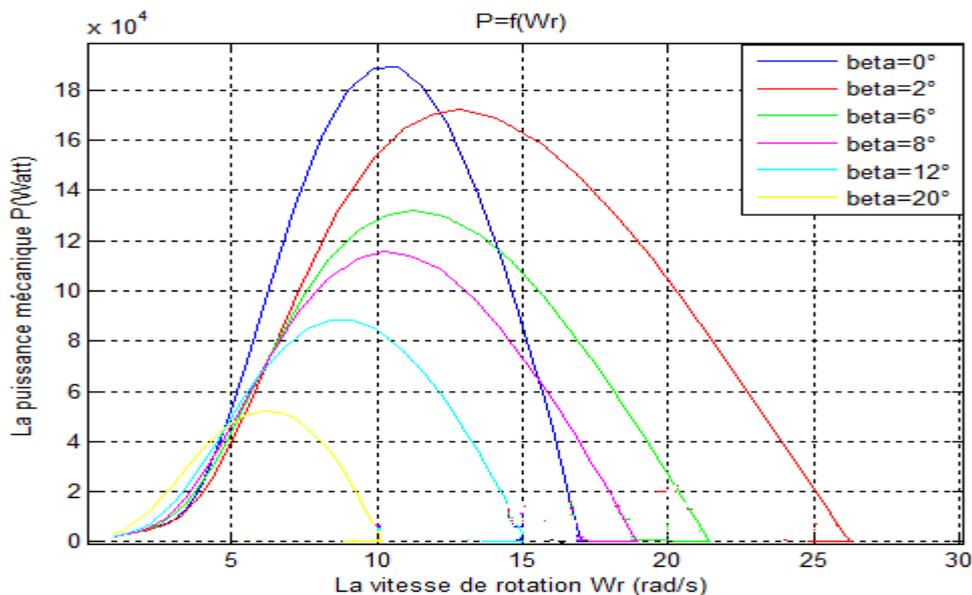


Figure V.8 P=f (Wr)

V.2.1 la vitesse de rotation (Ω_r)

Pour un profil du vent variable on a pu avoir une vitesse de rotation Ω_r pour une moyenne égale 13.46 rad/s comme le montre La figure V.9 ci-dessous.

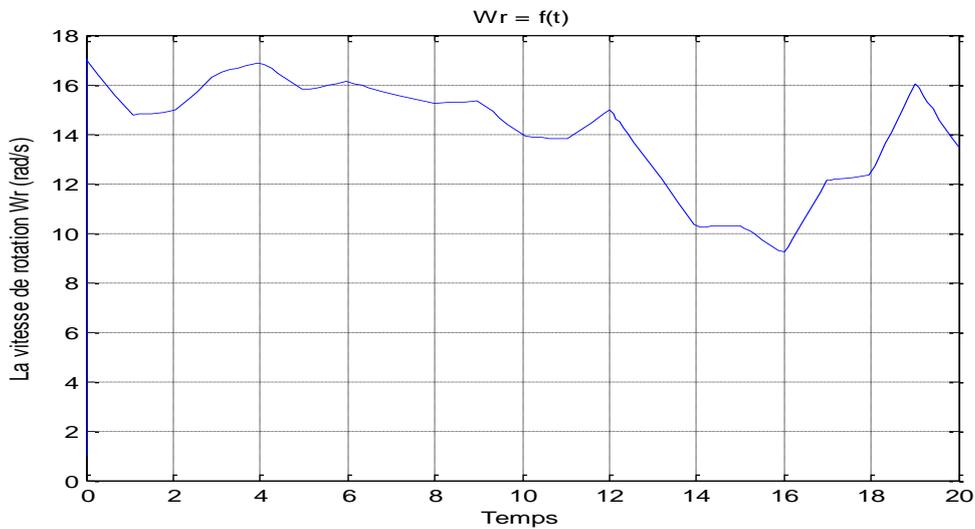


Figure V.9 $\Omega_r=f(t)$

V.2.2 la puissance mécanique (P)

La figure V.10 représente puissance mécanique de la turbine

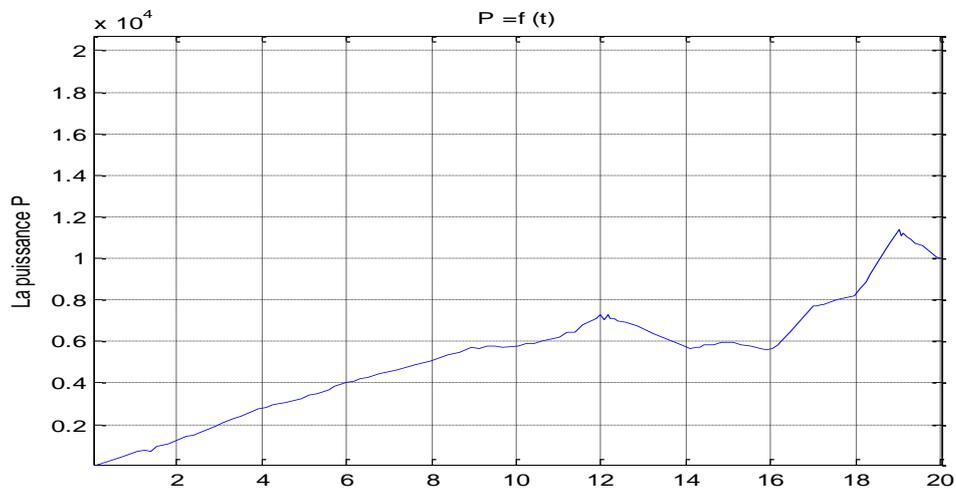


Figure V.10 $P=f(t)$

D'après ces résultats nous constatons que la stratégie de commande MPPT avec asservissement de la vitesse présente de très bonne performances En effet, la vitesse relative à la turbine est maintenue égale à sa valeur optimale $\Omega_{optimale} = 13.46 \text{ rad/s}$ pour un coefficient de puissance est maintenu à sa valeur maximale $C_{pmax} = 0.48$.

V.3. MPPT avec estimateur de Kalman

Nous avons utilisé le filtre de Kalman pour estimer le couple aérodynamique. A partir de l'estimé de ce dernier et de celle de la vitesse de rotation, nous avons obtenu l'estimé de la vitesse du vent (figure V. 12).

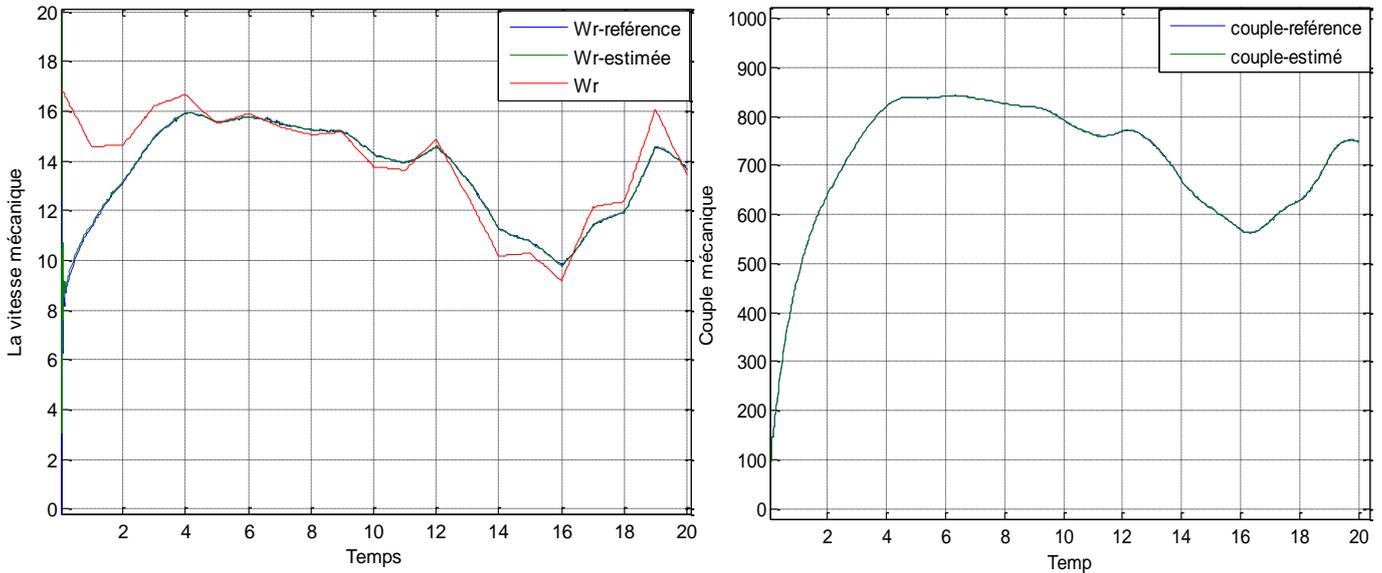


Figure V.11 Vitesse de rotation et le couple mécanique

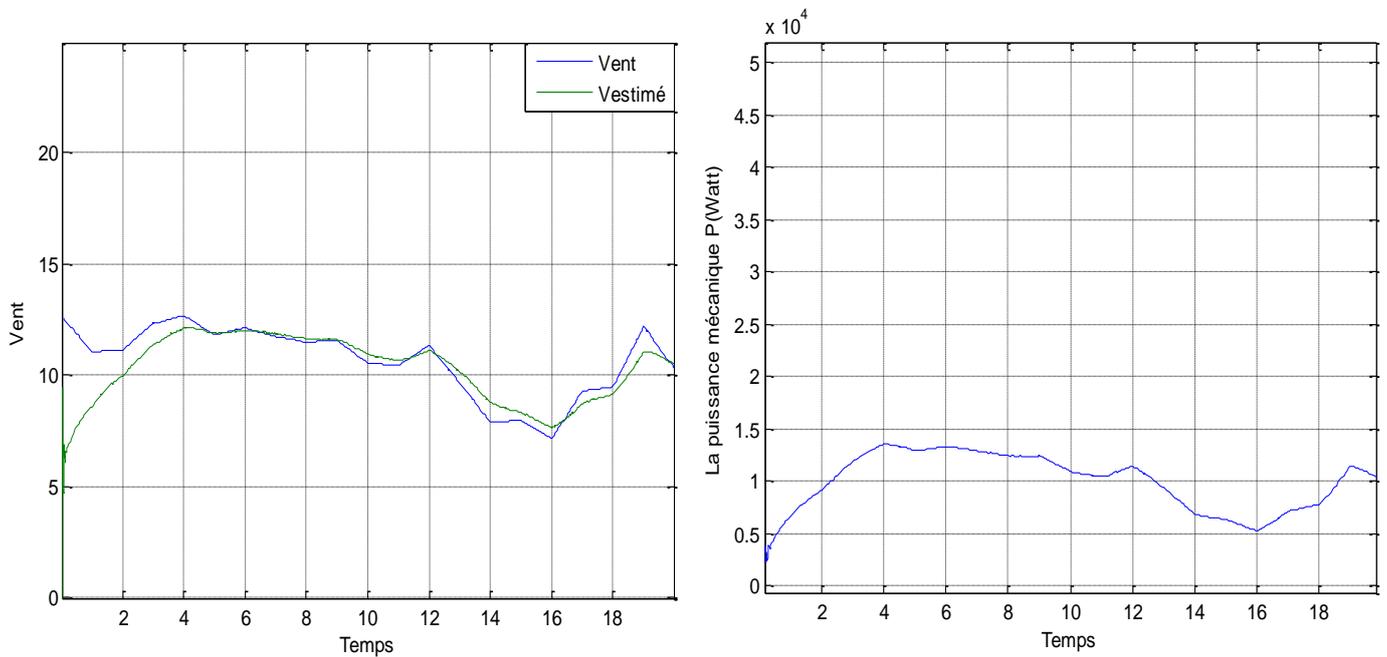


Figure V.12 Vitesse du Vent estimée par Kalman

Figure V.13 Résultats de simulation puissance mécanique

Chapitre V « Résultats simulation et discussions »

La vitesse du rotor estimée sur la figure (II.11) suit convenablement la tendance moyenne de la vitesse mécanique. Donc la présence de la perturbation n'a quasiment pas d'influence sur le bon suivi de la vitesse de référence. Tout ceci est réalisé par un choix judicieux du gain du filtre de Kalman qui permet d'atteindre une meilleure convergence de l'erreur (figure II.14) de vitesse estimée et la vitesse mécanique.

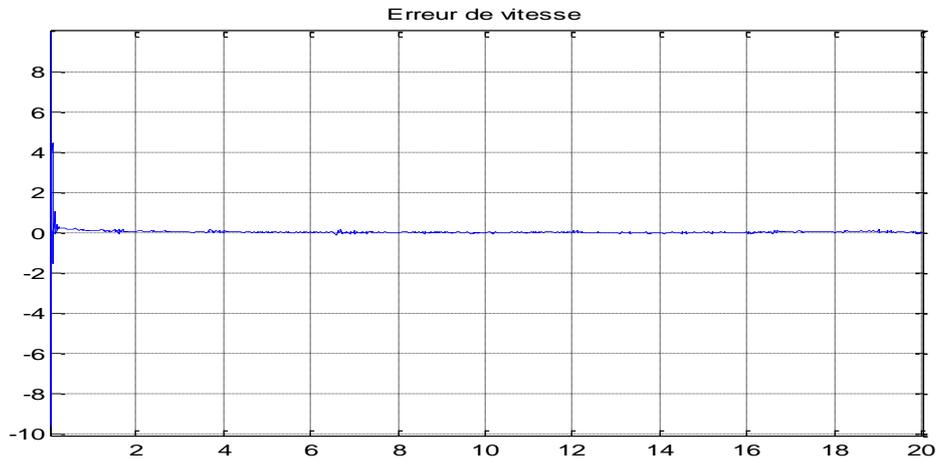


Figure V.14 Erreur de vitesse

V.4. MPPT avec estimateur flou

Nous avons utilisé le contrôleur flou pour estimer la vitesse du rotor. A partir de l'estimé de ce dernier, nous avons obtenu l'estimé de la vitesse du vent comme le montre les figures V.15, V.16 respectivement.

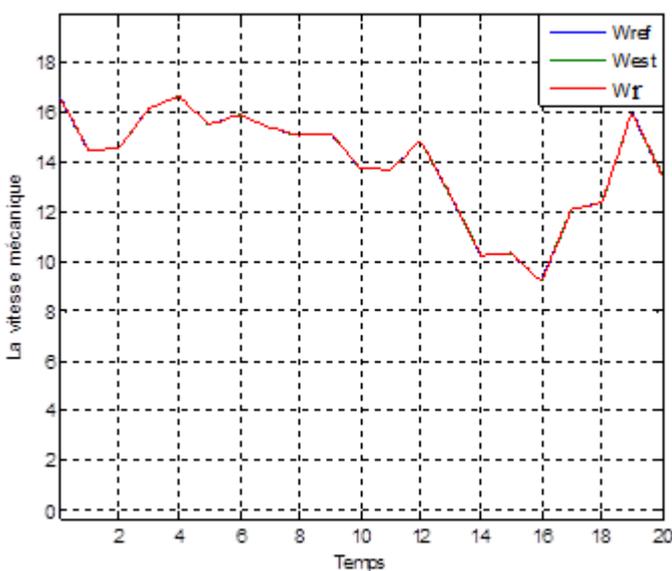


Figure V.15 Vitesse de rotation

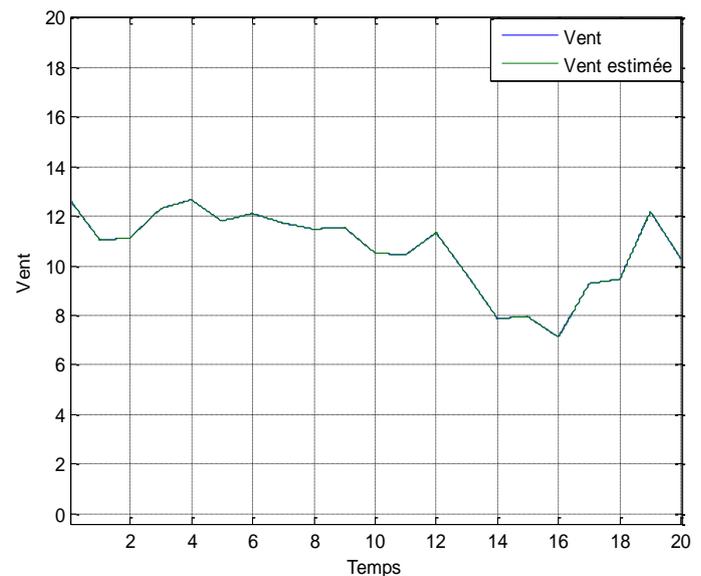


Figure V.16 Vitesse du vent

La vitesse du rotor estimée sur la figure (V.15) suit conformément la tendance de la vitesse de référence. Ainsi l'erreur de de vitesse converge vers 0 comme la figure(V.17) le montre :

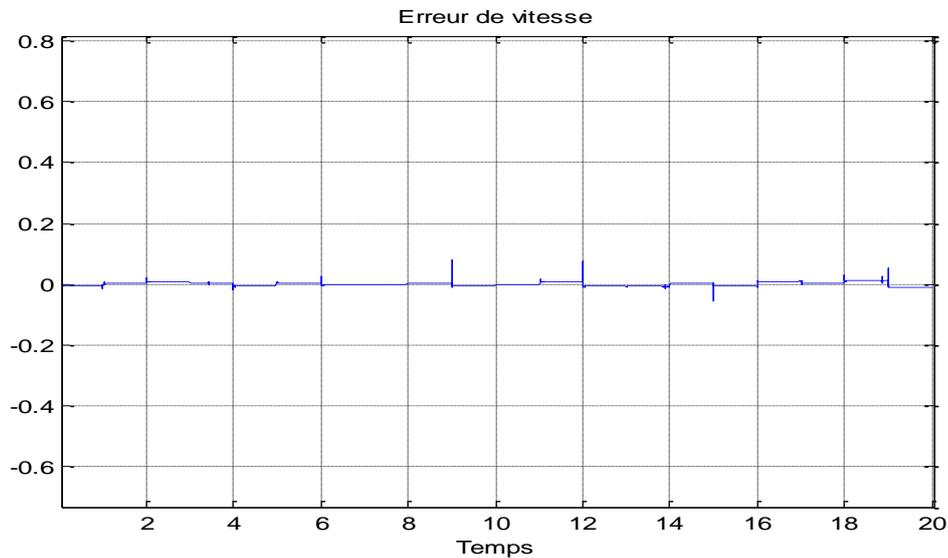


Figure V.17 Erreur de Vitesse

Les résultats obtenus ont montrés l'efficacité de l'observateur à reproduire avec exactitude le comportement de la turbine éolienne.

V.5. MPPT avec estimateur neuronal (RNA)

Les résultats obtenus dans les figures ci-dessous montrent les performances de l'observateur RNA à reproduire avec exactitude le comportement de la turbine éolienne. La figure V.18 montre que la vitesse du vent est bien estimée avec une faible erreur.

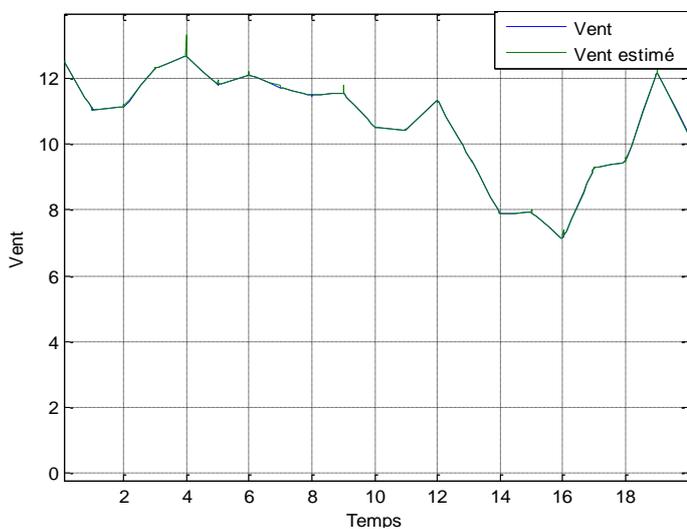


Figure V.18 Vent estimé par RNA

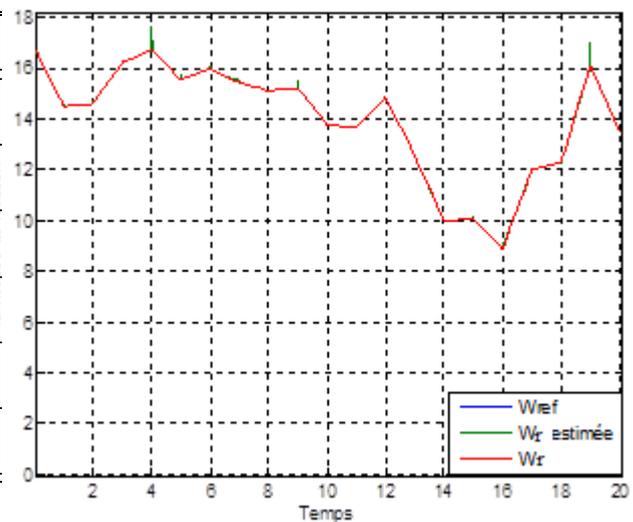


Figure V.19 Vitesse mécanique

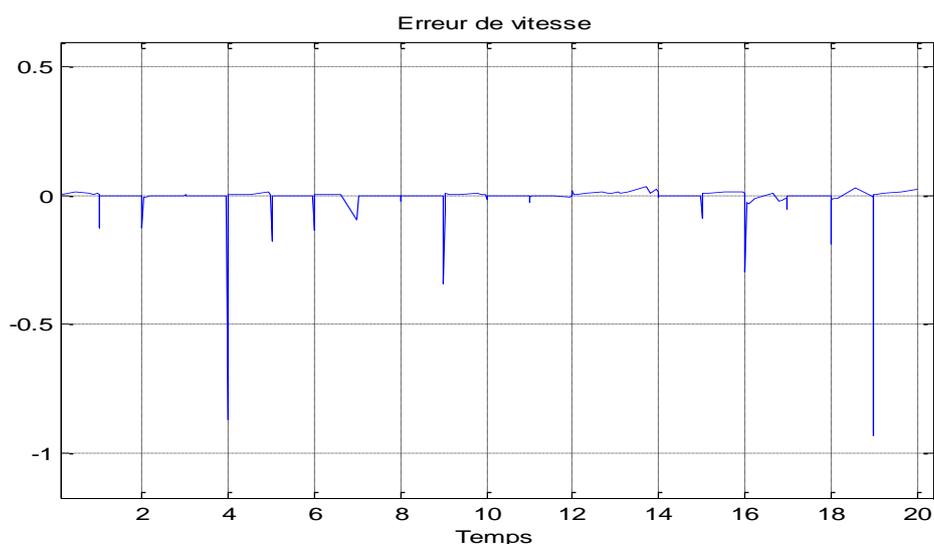


Figure V.20 Erreur de vitesse

V.6. Table comparative des trois méthodes d'estimations.

Erreur	Max	Moy	Min
Kalman	1.1653	0.0222	1.0000e-004
Flou	0.8781	1.6710e-004	0
Neuronal	0.9200	0.0039	1.0000e-004

D'après les valeurs de l'erreur entre les deux grandeurs (vitesse du vent mesuré et celle estimée) des trois observateurs dans la table comparative on distingue que le contrôleur flou nous donne de très bons résultats c'est-à-dire très faible erreur qui converge vers zéro par rapport aux contrôleurs neuronal et celui de Kalman, les figures ci-dessous montrent l'efficacité de chacun à reproduire le modèle de référence.

La figure V.21 montre la simulation des trois contrôleurs au même temps comparé à la vitesse de rotation de référence

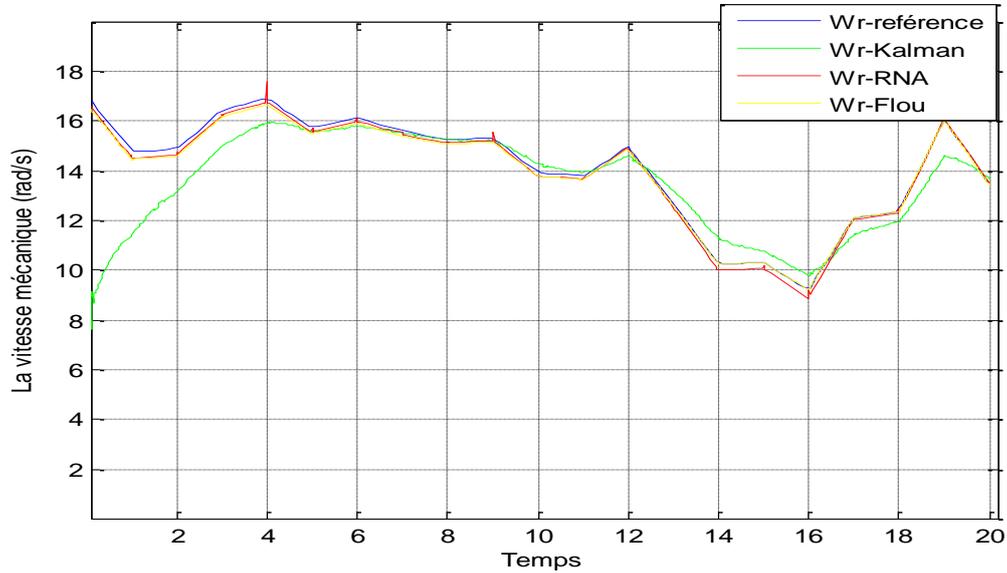


Figure V. 21 Estimation de la Vitesse mécanique par les trois estimateurs

La figure V.21 montre la simulation des trois contrôleurs au même temps comparé au profil du vent de référence

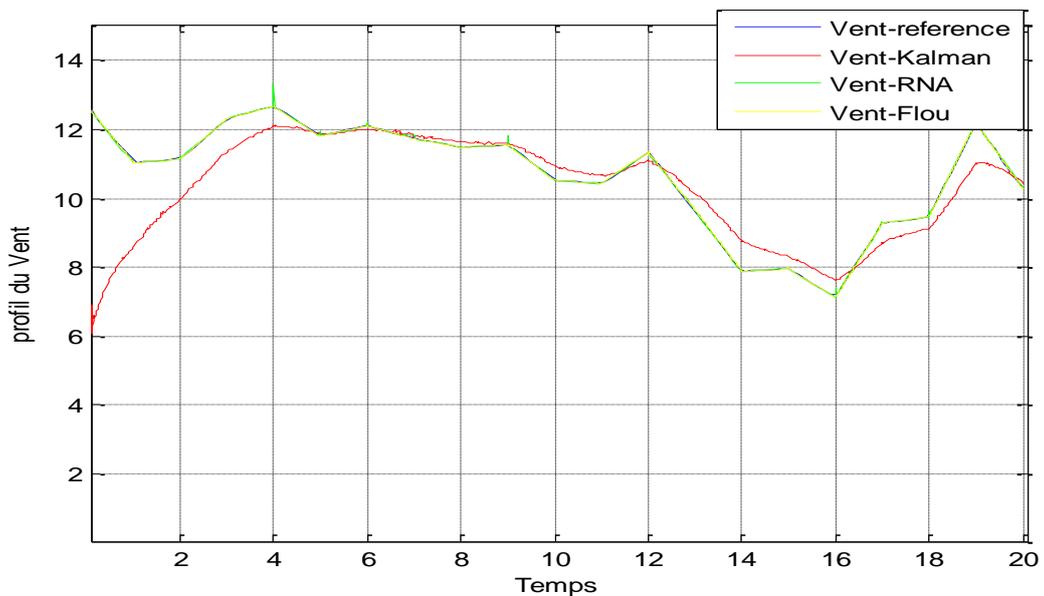


Figure V. 22 Estimation de la vitesse du vent par des trois estimateurs

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 (contrôle avec asservissement de la vitesse).

Nous avons étudié dans ce travail l'apport des techniques avancées tels que les observateurs (flou et neuronal) appliqués pour l'estimation. Ces derniers ont montrées l'efficacité de reproduire avec exactitude le comportement de la turbine éolienne.

Un contrôle basé sur les observateurs (neuronal et flou) est présenté pour estimer la vitesse du vent de l'éolienne à entraînement direct. Par rapport aux stratégies de contrôles traditionnels, ces nouvelles méthodes ont les caractéristiques suivantes:

- ✓ une puissance mécanique maximale de l'éolienne.
- ✓ l'estimation de la vitesse du vent à base de ces techniques est développée pour fournir des informations sur la vitesse du vent pour éviter d'utiliser des anémomètres.
- ✓ Un régime à base de ces dernières est présenté pour compenser le dérivé potentiel du vent et générer la vitesse mécanique pour un coefficient de puissance maximale de la turbine.

A la lumière des observations et des résultats présentés peut être poursuivi et complété par des perspectives pouvant contribuer à l'amélioration de l'ensemble de la chaîne de conversion éolienne. Nous envisageons l'adaptation du modèle développé et les stratégies de commande sur des aérogénérateurs de puissances plus importantes. Il serait intéressant d'étudier la robustesse de la stabilité des lois de commande par rapport à la variation des paramètres physiques de l'ensemble éolienne.

De point de vu d'observation du système éolien, d'autres techniques d'intelligences artificielles telles que les réseaux neuro-flous peuvent être testées pour observer le système éolien.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [ACH10] Achouri Fouzia, « Commande basée sur la passivité d'une éolienne » Mémoire de magister de l'université de Bejaia, 11 juillet 2010.
- [BEN08] Y.A. BENCHRIF, « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation pour la production de l'énergie éolienne », projet de fin d'études, ENSP, Juin 2008.
- [BEN07] M. Bendjebbar, « Contribution à l'étude d'algorithmes de l'intelligence artificielle pour le développement de stratégies de commande des machines asynchrones » Thèse de Doctorat d'Etat, Université des sciences et de la technologie Mohamed Boudiaf d'Oran USTO, Décembre 2007.
- [BEC13] M. BECHOUCHE.Ali. « Utilisation des techniques avancées pour l'observation et la commande d'une machine asynchrone »: Application à une éolienne, 22 Avril 2013.
- [Bel04] F.Belhachat, « Système de classification des chromosomes humains par réseaux de Hopfield », PFE, USTHB, 2004
- [BOU06] Boukhezzar B. « Les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes a vitesse variable », thèse de doctorat en sciences de l'université parisXI Orsay, 2006.
- [BOY06] A. BOYETTE, « Contrôle, commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne », thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy1, Décembre 2006.
- [BUR01] Burns, R.S. (2001). Advanced Control Engineering. butterworth heinemann ed.
- [CAM03] H.Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », thèse de doctorat de l'école Nationale des Arts et Métiers de bordeaux, Décembre 2003.
- [CHE09] CHEKROUN Soufyane, « Commande Neuro-flou sans capteur de vitesse d'une machine asynchrone triphasée » Mémoire de magister à Ecole Normale Supérieure d'Enseignement Technologique d'Oran, le 25 Octobre 2009.

Références bibliographiques

- [COG04] G. Cagnet, P. Hesto, J-L. Houzelot, Ch. Rombaut, J.Tamain, « L'énergie au XXIème siècle une réflexion prospective, une analyse des verrous scientifique et technologique à laver », [http.recherche.gouv.fr/mstp/MRNT/MSTP/01-2004](http://recherche.gouv.fr/mstp/MRNT/MSTP/01-2004).
- [CUN01] Guy Cuntty, « Eolienne et aérogénérateur, guide de l'énergie éolienne », © Edissud, Aixen-provence, 2011, www.edisud.com.
- [GAR01] Dr.Gary L.Johnson, « Wind Energy Système », Chapter 1-introduction, November, 2001.
- [GHE11] Tarak GHENNAM, « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation, thèse de doctorat, L'école centrale de Lille et l'école Militaire Polytechnique D'Alger, 29/09/2011.
- [GOU82] D. Le GOURIERE, « Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations », édition EYROLLES, Paris 1982.
- [GUE09] Ouahib GUENOUNOU, « Méthodologie de conception de contrôleurs intelligents par l'approche génétique- application à un bioprocédé » thèse de doctorat, 22 avril 2009
- [Kim97] Kim et Par, A new approach to fuzzy modeling. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 5(3), 328–337.
- [LEC04] L.Leclerco « Apport de stockage inertiel associé à des éolienne dans un réseau électrique que en vue d'assurer des services systèmes », thèse de doctorat de l'université de Lille, Décembre 2004.
- [MAD07] Mohamed Chafaa MADAOU, « Commande floue et neuro-floue d'un convertisseur direct AC/AC monophasé à structure minimale. Application à l'alimentation d'une machine asynchrone monophasée »Mémoire de Magister. 28.02.2007.
- [MAY08] Mayouf M, « Contribution à la réalisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent ».Mémoire de magister de l'université de Batna, département d'électrotechnique 2008.
- [Man97] Man, K. F. et W.A. Halang (1997). «Genetic algorithms for control and signal processing. In » : Proceedings of the 23rd International Conference on Industrial.

Références bibliographiques

- [MOU07] A. Moussa Siddou, I. Soumana Nouhou, « Etude du générateur asynchrone pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne ». Projet de fin d'étude, ENSP, 2007.
- [MIR05] A.MIRECKI, «Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse le 5 avril 2005.
- [POIT03] F.Poitiers, « Etude et commande de la génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne ». Thèse de Doctorat, Université de Nante, 19 Décembre 2003.
- [Red09] REDJEM Radia, « Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne", thèse de magistère en Electrotechnique », université Mentouri de Constantine, 2009.
- [SAL04] Salma. El Aimani. « Modélisation de différentes technologies d'éolienne Intégrées dans un réseau de moyenne tension ». Thèse de Doctorat, Ecole centrale de Lille, Décembre 2004.
- [Sas94] Sastry, P.S., G. Santharam et K.P. Unnikrishnan (1994). «Memory neuron networks for identification and control of dynamical systems ». IEEE Transactions on Neural Net-works 5(2), 306–319.
- [TEN08] A.Teninge.«Participation aux services système de pores éoliens mixte : Application en milieu Insulaire ». Thèse de Doctorat de l'INPG, spécialité : Génie électrique, 04 Décembre 2009.
- [TOU10] Toual Belkacem. «Modélisation et commande flou optimisée d'une génératrice à double alimentation. Application à un système éolien à vitesse variable», 17 Octobre 2010.
- [Wan96] Wan et Lang, 96, Complex systems modeling via fuzzy logic. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics 26(1), 100–106.
- [Win] <http://www.windpower.org/fr/tour/wres/betz.htm>.
- [ZIO08] N. ZIOUI, « Conception, modélisation et commande d'une éolienne à axe vertical », mémoire de magister, ENSP, 2008.