

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور الطاهر مولاي سيدة

Université Saida Dr Tahar Moulay –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Mémoire de fin d'études présenté pour l'obtention du Diplôme de MASTER

En : Électrotechnique

Spécialité : Électrotechnique Industrielle

Par : BEKHTI Ikram Aicha et BELHAOUA Imane Ikram

Sujet

**Modélisation et contrôle d'une turbine éolienne avec
l'estimation de la vitesse du vent par le filtre de Kalman
(réalisation d'un dispositif de l'estimation)**

Soutenue publiquement en 25/06/2024 devant le jury composé de :

Mr. HARTANI KADA	Professeur	Univ. Saida	Président
Mr. BENMAHDJOUR Mohammed Amin	MCB	Univ. Saida	Rapporteur
Mr. CHERIFI DJAMILA	MCA	Univ. Saida	Examineur

Année universitaire 2023/2024



REMERCIEMENTS

*À la fin de ce projet, nous exprimons nos remerciements tout d'abord
à Dieu Tout-Puissant pour nous avoir donné la volonté, le courage,
la patience et la volonté pour accomplir ce modeste travail...*

*Nous tenons à adresser nos remerciements spéciaux à notre encadreur
BENMAHDJOUB Mohammed Amin pour avoir supervisé ce projet,
ainsi que pour la confiance et l'intérêt constants*

Qu'il nous a accordés tout au long de sa réalisation.

*Et pour son contribution intellectuelle et son expérience, qui été enrichi
ce travail de recherche. ses conseils éclairés ont grandement contribué
à façonner ce mémoire et à le rendre plus solide .*

*Nos remerciements s'adressent aux membres du jury d'avoir
accepté d'évaluer notre travail.*

*Nous exprimons notre sincère reconnaissance à tous ceux qui ont
contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*



Dédicaces

Du profond de mon cœur, je dédie ce travail à tous ceux qui me sont chers,

*A mon cher père,
A ma chère mère,*

*Qui ne jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour
que je puisse atteindre mes objectifs.*

*A mes chères sœurs,
A mon frère,*

Pour ses soutiens moral et leurs conseils précieux tout au long de mes études.

A ma chère binôme Ikram,

Pour sa entente et sa sympathie, et leurs indéfectibles soutiens et leurs patiences infinies.

*A mes meilleures amies,
Pour leurs aides et support dans les moments difficiles.
« Je vous suis reconnaissant à tous ».*

Imane



Je dédie ce mémoire...

À mes chers parents, pour leur soutien indéfectible, leurs encouragements constants et leur inspiration tout au long de ce voyage académique. Leur précieuse guidance et leurs encouragements m'ont permis de surmonter les obstacles et d'atteindre mes objectifs avec confiance et détermination. Leur présence a été une source de force et de motivation, et je suis profondément reconnaissante de les avoir à mes côtés.

À mon cher frère Mohamed, et à mes sœurs Naima, Imène, Ikhlas, Fatima, et Hadjer, qui ont été un soutien inestimable tout au long de ce parcours. Leur amour, leur compréhension et leur encouragement ont été des piliers sur lesquels je me suis appuyée dans les moments de doute et de difficulté.

A ma binôme que Nous avons partagé ensemble les moments de bonheur et les défis lors du suivi de notre travail.

À toutes ces personnes exceptionnelles, je vous offre mes plus sincères remerciements. Ce mémoire est le fruit de notre collaboration et de notre engagement commun envers l'excellence.

Ikram....

Table des matières

Avant-propos.....	
Dédicace.....	
Table des matières.....	i
Table des notations et des symboles.....	iv
Introduction générale.....	1

Chapitre I : Généralité sur les systèmes éoliens

I.1. Introduction.....	3
I.2. Historique.....	4
I.3. Définition de l'énergie éolienne.....	6
I.4. Définition de l'éolienne.....	7
I.5. Types des aérogénérateurs.....	8
I.5.1. Eoliennes à l'axe vertical.....	9
I.5.1.1. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical.....	10
I.5.2. Eoliennes à l'axe Horizontal.....	10
I.5.2.1. Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal.....	11
I.6. Eolienne à vitesse fixe.....	12
I.7. Eolienne à vitesse variable.....	13
I.8. Conclusion.....	14

Chapitre II : Modélisation de la turbine éolienne

II.1. Introduction.....	16
II.2. Vent.....	16
II.2.1. Caractéristique horizontale du vent.....	18
II.2.2. Portance et trainée.....	19
II.2.3. Modélisation du vent.....	20
II.3. Conversion de l'énergie éolienne.....	21
II.3.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	21
II.3.2. Loi de Betz.....	21
II.4. Modélisation de la turbine éolienne.....	23
II.4.1. Puissance aérodynamique.....	23

II.4.2. Modélisation de l'arbre de la machine	25
II.4.3. Modélisation de multiplicateur de vitesse	26
II.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	26
II.6.Conclusion	28

Chapitre III : Estimation de la vitesse du vent à base du filtre de Kalman

III.1 Introduction	29
III.2 Fonctionnement du filtre de Kalman	30
III.3 Modèle du filtre de Kalman pour un système dynamique	31
III.3.1 Prédiction de l'état	32
III.3.1.1 Prédiction de l'état moyen	32
III.3.1.2 Prédiction de la covariance de l'état	32
III.3.2 Correction de l'état prédit	33
III.3.2.1 Calcul de l'innovation	33
III.3.2.2 Correction de l'état prédit	34
III.3.2.3 Correction d'erreur	34
III.3.2.4 Covariance de la correction de l'état prédit	34
III.3.3 Résultats de la simulation et discussion :	35
III.3.3.1 Résultats de simulation de système basés sur le KF	36
III.4 Conclusion	39

Chapitre IV : Contrôle du système éolien pour maximiser l'extraction de la puissance du vent

IV.1. Introduction	40
IV.2. Contrôle direct en vitesse par contrôleur Proportionnel-Intégral	41
IV.2.1. Synthèse des correcteurs PI	41
IV.2.1.1. Synthèse des correcteurs de la pulsation rotorique	42
IV.3. Contrôle de la vitesse par la logique floue	43
IV.3.1. Généralité sur la logique floue	43
IV.3.2. Les opérations des ensembles flous	43
IV.3.3. Notions ensemble flou	44
IV.3.4. Les propositions floues et les variables linguistiques	45
IV.3.4.1. Implication floue (règle Si /Alors):	45

IV.3.4.2.	Système d'inférence floue.....	46
IV.3.4.3.	Fuzzyfication (quantification floue).....	46
IV.3.4.4.	Inférence floue.....	47
IV.3.4.5.	Défuzzification ou concrétisation.....	48
IV.3.4.6.	Commande floue	50
IV.3.5.	Commande floue de la vitesse de la génératrice	50
IV.3.5.1.	Etape de fuzzification.....	51
IV.3.5.2.	Etape des règles linguistiques.....	52
IV.3.5.3.	Défuzzification	52
IV.4.	Contrôle de la turbine éolienne	53
IV.5.	Résultats du contrôle de la vitesse.....	54
IV.5.1.1.	Comparisons de performances	55
IV.6.	Conclusion.....	58

Chapitre V : Réalisation d'un dispositif d'estimation basé sur un filtre de Kalman

V.1.	Introduction	61
V.2.	Objectifs	61
V.3.	Réalisation d'un capteur d'anémomètre.....	61
V.3.1.	Choix et préparation des composants.....	62
V.3.2.	Assemblage mécanique	62
V.3.3.	Connexion électronique.....	63
V.3.3.1.	Structure software	63
V.4.	Validation et test.....	67
V.4.1.	Implémentation l'algorithme du filtre de Kalman sur la carte Arduino	67
V.4.2.	Supervision des résultats en temps réel	68
V.4.2.1.	Configuration de l'Interface Utilisateur	68
V.4.2.2.	Acquisition et Traitement des Données.....	69
V.4.2.3.	Affichage et Mise à Jour en Temps Réel.....	69
V.4.2.4.	Analyse et Archivage des Données	69
V.4.3.	Discussion et résultats	70
V.5.	Conclusion.....	71
	Conclusion générale	72
	Bibliographie.....	73

Table des notations et des symboles

I. Grandeurs et paramètres mécaniques de la turbine éolienne :

a) Grandeurs mécaniques de la turbine éolienne :

E_v	(J)	Energie cinétique du vent,
m	(kg)	Masse de l'air,
V	(m.s ⁻¹)	Vitesse du vent,
A_0	(m.s ⁻¹)	La valeur moyenne du vent,
A_i	(m.s ⁻¹)	L'amplitude de chaque turbulence,
V_n	(m.s ⁻¹)	La vitesse du vent nominale,
$V_{\min}$	(m.s ⁻¹)	Vitesse du vent minimale,
$V_{\max}$	(m.s ⁻¹)	Vitesse du vent maximale,
V_1	(m.s ⁻¹)	Vitesse du vent en amont,
V_2	(m.s ⁻¹)	Vitesse du vent en aval,
ρ	(Kg.m ⁻³)	Densité de l'air (approximativement 1,225 kg.m ⁻³ à la Pression atmosphérique normale et à 15°C),
S_T	(m ²)	Surface balayée du rotor,
P_v	(W)	Puissance de sortie du vent d'une turbine idéale,
P_n	(W)	Puissance nominale,
P_{ele}	(W)	Puissance nominale,
P_{aer}	(W)	Puissance aérodynamique,
T_{aer}	(N.m)	Couple aérodynamique,
$T_{aer,opt}$	(N.m)	Couple aérodynamique optimal,
ω_t	(rd.s ⁻¹)	Vitesse de rotation de la turbine,
$\omega_{t,opt}$	(rd.s ⁻¹)	Vitesse de rotation de la turbine optimale,
C_p	(-)	Coefficient de puissance,
$C_{p,max}$	(-)	Coefficient de puissance maximal,
λ	(-)	Vitesse relative de la turbine,
λ_{opt}	(-)	Vitesse relative de la turbine optimale,
β	(°)	Angle d'orientation des pales,
R	(m)	Rayon des pales,
θ_t	(rd)	Position angulaire de la turbine,
n_g	(-)	Gain de multiplicateur de vitesse,
η_{aer}	(-)	Rendement aérodynamique,

b) Paramètres mécaniques de la turbine éolienne en (SI) :

J_t	(Kg.m ²)	Inertie du rotor de la turbine,
f_t	(N.m/rd/s)	Coefficient de frottements visqueux du rotor de la turbine,

II. Grandeurs et paramètres mécaniques de la génératrice :

a) Grandeurs mécaniques de la génératrice :

T_{em}	(N.m)	Couple électromagnétique,
ω_g	(rd.s ⁻¹)	Vitesse de rotation de la génératrice,
ω_s	(rd.s ⁻¹)	Vitesse de synchronisme,
θ_s	(rd)	Position angulaire du stator de la génératrice,
θ_r	(rd)	Position angulaire du rotor de la génératrice,
θ_g	(rd)	Position angulaire de la génératrice,

III. Grandeurs de commande :

ω_g^*	(rd.s ⁻¹)	Vitesse de rotation de la génératrice de référence,
θ_g^*	(rd)	Position angulaire de la génératrice de référence,
T_{em}^*	(N.m)	Couple électromagnétique de référence,

IV. Nomenclature :

En Anglais Nomenclature :

TSR	Tip Speed Ratio,
MPPT	Maximum Power Point Tracking,
LABVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench

Introduction générale

L'électricité est cruciale pour le développement socio-économique et est devenue indispensable dans la vie quotidienne, particulièrement dans les pays développés. Bien que certains puissent penser que l'on pourrait s'en passer, le mix énergétique mondial dépend encore largement des énergies fossiles.

Parmi les sources d'énergies renouvelables, l'énergie éolienne se distingue comme une avancée technologique efficace et économique dans le domaine de l'énergie. Capable de rivaliser avec les technologies conventionnelles de production d'énergie, elle représente une source d'énergie sans combustible et sans pollution, avec l'avantage de pouvoir être produite à proximité des zones de consommation, réduisant ainsi les pertes de transmission. De plus, l'énergie éolienne offre de grandes capacités de production, notamment dans les parcs éoliens, tout en permettant la distribution d'énergie dans des endroits éloignés grâce à l'utilisation de petites éoliennes.

Ce mémoire aborde en quatre chapitres différents aspects de l'énergie éolienne, de la modélisation à la régulation en passant par le contrôle et l'estimation de la vitesse du vent par le filtre de Kalman, jusqu'à la réalisation d'un dispositif d'estimation.

Le premier chapitre présente une introduction générale à l'énergie éolienne : son historique, la définition d'une éolienne, son principe de fonctionnement, les différents types d'éoliennes, ainsi que les avantages et inconvénients de cette source d'énergie.

Le deuxième chapitre se concentre sur la modélisation d'une turbine éolienne, en considérant la vitesse du vent, les forces aérodynamiques, la conversion de l'énergie éolienne, et la modélisation de la turbine, de l'arbre mécanique et du multiplicateur de vitesse.

Le troisième chapitre traite du contrôle d'une turbine éolienne, en examinant le contrôle direct en vitesse par un régulateur Proportionnel-Intégral (PI) et la commande de la vitesse par la logique floue. Ce chapitre détaille la logique floue, l'implication floue, le système d'inférence floue, et la défuzzification par le centre de gravité.

Le quatrième chapitre aborde l'estimation de la vitesse du vent à l'aide du filtre de Kalman. Il explique les outils mathématiques nécessaires pour comprendre le filtre de Kalman et

applique ces équations pour améliorer l'estimation de la vitesse du vent dans les systèmes d'énergie éolienne. Ce chapitre inclut également les résultats de simulations et une discussion utilisant MATLAB/Simulink.

Nous concluons notre étude par une conclusion générale et des perspectives sur ce travail.

Généralité sur les systèmes éoliens

I.1.	Introduction	3
I.2.	Historique	4
I.3.	Définition de l'énergie éolienne	6
I.4.	Définition de l'éolienne.....	7
I.5.	Types des aérogénérateurs.....	8
I.5.1.	Eoliennes à l'axe vertical.....	9
I.5.1.1.	Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical.....	10
I.5.2.	Eoliennes à l'axe Horizontal	10
I.5.2.1.	Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal.....	11
I.6.	Eolienne à vitesse fixe	12
I.7.	Eolienne à vitesse variable	13
I.8.	Conclusion.....	14

I.1. Introduction

Les énergies renouvelables sont considérées comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux. Ces sources d'énergie sont propres, inépuisables et moins coûteuses par rapport aux autres sources d'énergie, comme les énergies fossiles et nucléaires, qui impliquent des coûts élevés, tant économiques qu'environnementaux. En raison de la nécessité croissante de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de lutter contre le changement climatique, les énergies renouvelables gagnent en importance et en popularité. Parmi ces sources d'énergie, l'énergie éolienne se distingue par sa capacité à exploiter l'énergie cinétique du vent pour produire de l'électricité.

L'énergie éolienne consiste à convertir la force du vent en énergie électrique grâce à des dispositifs appelés éoliennes ou aérogénérateurs. Ces éoliennes capturent l'énergie du vent avec leurs pales et la convertissent en électricité à l'aide d'un générateur. Au cours des dernières décennies, l'énergie éolienne a connu une croissance exponentielle, en grande partie grâce aux avancées technologiques, à la baisse des coûts de production et aux politiques de soutien à l'énergie propre. Cette croissance a permis de développer des parcs éoliens de plus en plus grands et plus efficaces, tant sur terre (éoliennes terrestres) qu'en mer (éoliennes offshore).

Dans ce chapitre, nous aborderons plusieurs aspects fondamentaux de l'énergie éolienne. Tout d'abord, nous présenterons l'histoire de l'énergie éolienne, retraçant son évolution depuis les premières utilisations du vent pour moulin à grain et pomper l'eau jusqu'aux technologies modernes de production d'électricité. Ensuite, nous examinerons les différents types d'aérogénérateurs, en détaillant leur constitution et leur principe de fonctionnement. Les éoliennes se divisent en deux catégories principales : les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical, chacune ayant ses propres caractéristiques et applications.

Nous détaillerons ensuite le principe de fonctionnement des éoliennes. Ce processus comprend plusieurs étapes : la capture de l'énergie cinétique du vent par les pales, la transmission de cette énergie mécanique à un générateur via un arbre et un multiplicateur de vitesse, et enfin la conversion de cette énergie mécanique en électricité. Chaque composant de l'éolienne, des pales au générateur, joue un rôle crucial dans l'efficacité globale du système.

Enfin, nous énumérerons les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne. Parmi les avantages, nous soulignerons son caractère renouvelable et non polluant, sa capacité à réduire la dépendance aux combustibles fossiles, et son potentiel de création d'emplois dans le secteur des énergies renouvelables. Cependant, nous aborderons également les inconvénients, tels que l'intermittence de la

production d'électricité due à la variabilité du vent, les défis liés à l'impact visuel et sonore des éoliennes, et les contraintes techniques liées à l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques existants.

En conclusion, ce chapitre fournira une vue d'ensemble complète de l'énergie éolienne, mettant en lumière son potentiel en tant que pilier des futurs systèmes énergétiques durables.

I.2. Historique

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, ainsi que par la rotation de la terre. Il constitue donc une ressource naturelle renouvelable. Le mouvement de l'air, qui génère le vent, contient une quantité significative d'énergie. Depuis des milliers d'années, les moulins à vent ont été utilisés pour capter une partie de cette énergie et accomplir divers travaux utiles [Adj-15].

Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical, employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moulinier des grains dès le 7ème siècle avant Jésus Christ. Ce type de moulin est constitué d'un arbre avec des lames horizontales tournant dans un plan vertical. À partir de la Perse et du Moyen-Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et l'Europe centrale [Adj-15].

Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190, en Allemagne en 1222, et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12ème et le 19ème siècle. Vers 1800, environ 20 000 moulins à vent étaient en service en France, et aux Pays-Bas, 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. À la fin du 19ème siècle, des moulins à vent avec des rotors de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe, utilisés non seulement pour moulinier des grains mais aussi pour le pompage d'eau [Adj-15].

L'industrialisation a progressivement conduit à la disparition des moulins à vent. Cependant, en 1904, l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle aux Pays-Bas, avec plus de 18 000 unités installées en Allemagne. L'Amérique a été pionnière dans le développement des éoliennes multiples, à partir de 1870, avant que cette technologie ne revienne en Europe, son lieu de conception, en 1876, sous le nom de moulin américain. Les moulins à vent ont connu un grand succès dans le passé, fournissant à l'homme l'énergie mécanique nécessaire à la réalisation de ses projets. Cependant, avec l'avènement de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, ainsi que le développement de l'électricité, leur utilisation a été progressivement négligée et souvent abandonnée [Adj-15].

L'utilisation de l'énergie éolienne a ainsi été délaissée et son avenir semblait compromis. Cependant, après la crise pétrolière de 1974, avec la diminution des réserves mondiales d'hydrocarbures et les préoccupations croissantes liées à la pollution environnementale, l'énergie éolienne est redevenue d'actualité et a connu un développement rapide. Son utilisation principale est aujourd'hui la production d'électricité, selon le principe utilisé dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi, la demande mondiale pour les éoliennes a connu une croissance rapide au cours des dernières décennies, en grande partie en raison de la nécessité de développer des centrales électriques utilisant des combustibles moins polluants.

Au cours des dernières années, la capacité typique de production d'électricité d'une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou plus. Entre 1995 et la fin de 2003, environ 76% des nouvelles installations d'aérogénérateurs raccordées au réseau ont été réalisées en Europe. Les pays les plus avancés dans le domaine de l'énergie éolienne sont l'Allemagne, avec une capacité installée de 14 609 MW, le Danemark avec 3 110 MW, l'Espagne avec 6 202 MW, les Pays-Bas avec 912 MW et les autres pays européens avec 3 873 MW [Adj-15]. En Amérique du Nord, la capacité installée est de 6 677 MW, tandis qu'en Amérique du Sud et en Amérique centrale elle est de 139 MW, en Asie de 3 034 MW, et en Afrique et au Moyen-Orient de 150 MW [Adj-15].

Des projets d'énergie éolienne au large des côtes ont permis la construction de grandes centrales éoliennes fournissant de l'électricité dans plusieurs parties du monde, à un coût compétitif par rapport aux installations conventionnelles telles que les centrales nucléaires, thermiques au mazout ou au charbon [Adj-15]

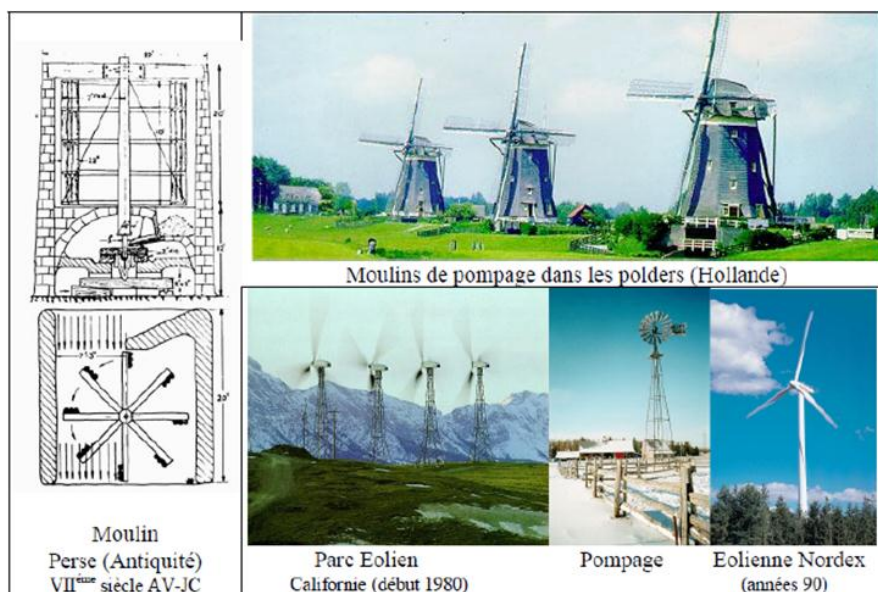


Figure I.1. Évolution des dispositifs éoliens de l'antiquité à nos jours [Sai-16].

I.3. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable, non dégradée, répartie de manière diffuse sur le plan géographique, et fortement corrélée saisonnièrement (l'électricité est souvent davantage demandée en hiver, période où les vitesses moyennes du vent sont généralement les plus élevées). De plus, elle ne génère aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Cependant, son caractère aléatoire dans le temps rend sa capture assez complexe, nécessitant des éoliennes équipées de mâts et de pales de grandes dimensions (pouvant atteindre jusqu'à 60 mètres pour les éoliennes de plusieurs mégawatts) situées dans des zones dégagées géographiquement pour minimiser les turbulences [Ata-19]. On peut résumer la définition de l'énergie éolienne comme suit :

- **Source d'énergie renouvelable** : L'énergie éolienne est renouvelable car elle provient du vent, une ressource naturelle qui se régénère continuellement.
- **Non dégradée et diffuse géographiquement** : Cette énergie est non dégradée car son utilisation ne diminue pas sa disponibilité future. Elle est également diffuse, ce qui signifie qu'elle est présente sur de vastes étendues géographiques, mais pas uniformément concentrée en un seul endroit.
- **Corrélation saisonnière** : Il existe une forte corrélation saisonnière entre la demande d'électricité (plus élevée en hiver, période de chauffage) et les vitesses moyennes du vent (qui sont souvent plus élevées en hiver), ce qui peut maximiser l'utilisation de l'énergie éolienne pour répondre à cette demande accrue.
- **Absence de rejet atmosphérique et déchet radioactif** : Contrairement aux énergies fossiles et nucléaires, l'énergie éolienne ne produit aucun rejet polluant dans l'atmosphère ni de déchets radioactifs, ce qui contribue à réduire l'impact environnemental.
- **Caractère aléatoire et complexité de la capture** : L'énergie éolienne est aléatoire car elle dépend directement des conditions météorologiques. Capturer efficacement cette énergie nécessite des éoliennes équipées de grandes structures, telles que des mâts et des pales pouvant atteindre jusqu'à 60 mètres de diamètre pour les éoliennes de plusieurs mégawatts. Ces éoliennes doivent être installées dans des zones géographiquement dégagées pour minimiser les turbulences, assurant ainsi un fonctionnement optimal et une production d'énergie constante.

Cette décomposition vise à clarifier chaque aspect de la phrase corrigée, en mettant en lumière les caractéristiques principales de l'énergie éolienne et les défis associés à son exploitation.



Figure I.2. Production de l'énergie éoliennes a base une ferme éolienne.

I.4. Définition de l'éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique. En général, une bonne adéquation entre les caractéristiques de couple et de vitesse de la turbine ainsi que de la génératrice électrique est indispensable pour atteindre cet objectif.

Pour cela, une éolienne idéale devrait comporter :

- **Système de contrôle mécanique :** Ce système permet de contrôler mécaniquement l'orientation des pales de l'éolienne ainsi que l'orientation de la nacelle. L'orientation des pales est cruciale car elle permet de maximiser la capture du vent dans différentes conditions météorologiques, tandis que l'orientation de la nacelle assure une optimisation globale de l'efficacité de l'éolienne.
- **Système de contrôle électrique :** Ce système comprend une machine électrique (généralement une génératrice) associée à de l'électronique de commande. Il est essentiel pour réguler la production d'électricité en fonction de la vitesse et de la force du vent. L'électronique de commande ajuste la charge électrique de manière à maintenir une production d'énergie stable et adaptée aux variations du vent.

Ces deux systèmes de contrôle, mécanique et électrique, sont complémentaires et permettent à l'éolienne de fonctionner de manière optimale dans différentes conditions environnementales. Ils assurent également une réponse rapide aux fluctuations du vent, garantissant ainsi une production d'énergie efficace et fiable.

En résumé, une éolienne bien conçue intègre ces éléments pour maximiser la conversion d'énergie cinétique du vent en énergie électrique, jouant ainsi un rôle crucial dans le domaine des énergies renouvelables.

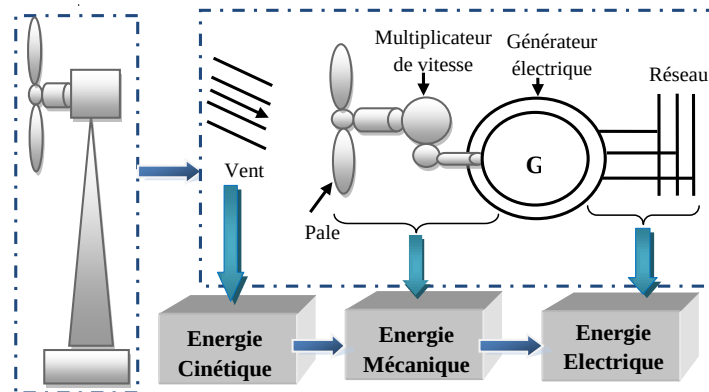


Figure I.3. Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.5. Types des aérogénérateurs

Les solutions techniques pour capter l'énergie éolienne sont diversifiées. Les turbines éoliennes sont principalement classées en deux types selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. En fonction de leur puissance nominale, les éoliennes sont généralement regroupées en trois catégories, correspondant à différentes gammes de puissance [Tar-11] :

- Éoliennes de petite puissance : Cette catégorie comprend les éoliennes dont la puissance est inférieure à 40 kW. Elles sont souvent utilisées pour des applications individuelles ou communautaires.
- Éoliennes de moyenne puissance : Ces éoliennes ont une puissance nominale allant de 40 kW à quelques centaines de kW. Elles peuvent être utilisées pour des applications commerciales ou industrielles, ainsi que pour l'alimentation de réseaux électriques locaux.
- Éoliennes de forte puissance : Cette catégorie englobe les éoliennes ayant une puissance supérieure à 1 MW. Elles sont principalement utilisées dans les parcs éoliens commerciaux et contribuent de manière significative à la production d'électricité à grande échelle.

Cette classification permet de mieux comprendre les différentes applications et capacités des éoliennes en fonction de leur taille et de leur puissance, adaptées aux besoins spécifiques des utilisateurs et des infrastructures énergétiques.

I.5.1. Eoliennes à l'axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été parmi les premières structures développées pour la production d'électricité, en contraste avec les traditionnels moulins à vent à axe horizontal. Elles présentent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, rendant ainsi leur maintenance plus facilement accessible. De nombreuses variantes ont été expérimentées depuis les années vingt, bien que la plupart aient connu peu de succès. Cependant, deux structures ont atteint le stade de l'industrialisation [Fré-03]. Les éoliennes à l'axe vertical ont deux types de rotor :

- **Le rotor de Savonius :** Le fonctionnement de cette conception repose sur le principe de la "traînée différentielle", utilisé également dans les anémomètres : les forces exercées par le vent sur les deux faces d'un corps creux sont de magnitudes différentes, créant un couple moteur qui entraîne la rotation. Cet effet est renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres, augmentant ainsi le couple moteur [Adj-15].



Figure I.4. Eolienne à axe vertical de type Savonius.

- **Le rotor de Darrieus :** Cette conception, nommée d'après l'ingénieur français Georges Darrieus qui a breveté son idée en 1931, est un rotor qui rappelle la forme d'un fouet à battre les œufs. Il existe deux formes principales de ce rotor [Adj-15]. Le fonctionnement de ce type d'éolienne repose sur la différence de portance générée par les forces aérodynamiques agissant sur ses pales. Cependant, il nécessite un vent relativement fort pour démarrer. Une fois en rotation, sa vitesse peut être élevée grâce à la combinaison de la vitesse du vent apparent et de la vitesse de rotation des pales pour certaines configurations déterminées.



Figure I.5. Eolienne à axe vertical de type Darrieus.

I.5.1.1. Avantages et inconvénients des éoliennes à axe vertical

➤ **Avantages :**

- La possibilité de placer la génératrice et le multiplicateur au sol, évitant ainsi la nécessité d'une grande tour.
- Aucun mécanisme d'orientation n'est requis pour aligner le rotor dans la direction du vent.

➤ **Inconvénients :**

- Les vents sont généralement plus faibles près de la surface du sol, réduisant ainsi le potentiel de capture du vent ;
- Certains types d'éoliennes à axe vertical nécessitent un dispositif de démarrage auxiliaire.
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical est souvent inférieure à celle des éoliennes à axe horizontal.
- Certains modèles utilisent la traînée plutôt que la portance aérodynamique, ce qui diminue le coefficient de puissance et réduit leur rendement global [Fré-03].

I.5.2. Eoliennes à l'axe Horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus couramment utilisées pour la production d'énergie éolienne. Les différentes constructions des aérogénérateurs peuvent avoir des voilures à deux, trois ou plusieurs pales, bien que les structures à trois pales soient les plus répandues. Une éolienne à axe horizontal est constituée d'une hélice perpendiculaire au vent, montée sur un mât. Les pales sont profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'un avion. De ce fait, ce type de turbine doit toujours être orienté face au vent pour maximiser son efficacité.

Comparées aux turbines à axe vertical, les éoliennes à axe horizontal sont capables de produire plus d'énergie pour la même vitesse de vent en raison de leur meilleur coefficient de puissance. Elles sont également plus efficaces grâce à leur position élevée, souvent à plusieurs dizaines de mètres du sol, où les vents sont généralement plus forts et plus constants. De plus, elles présentent un coût moindre et une meilleure efficacité globale, ce qui en fait le choix privilégié pour de nombreux projets d'énergie éolienne [Poi-03].



Figure I.6. Eolienne à axe horizontal

I.5.2.1. Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal

L'éolienne à axe horizontal comporte généralement des éléments mécaniques et électriques :

- **Le mat ou la tour** : c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre une tour (mât) de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW : diamètre de 80m, mât 90m) [Adj-15, Bel-14].
- **Le rotor** : formé par des pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept Danois) étant le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.
- **Le système d'orientation des pâles** : qui sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique). En plus de ces éléments, la turbine est munie des pâles fixes ou orientables et qui tournent à des vitesses nominales inférieures à 40 tr/min.

- **L'arbre** : Il relie le moyeu au multiplicateur, il contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.
- **Le multiplicateur** : sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.
- **L'aérogénérateur** : C'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.
- **La nacelle** : Elle regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.
- **Le système de refroidissement** : Généralement, il se compose d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.
- **Le système de commande** : Il contrôle, en permanence, le bon fonctionnement de l'éolienne et intervient automatiquement, en cas de défaillance pour l'arrêter.

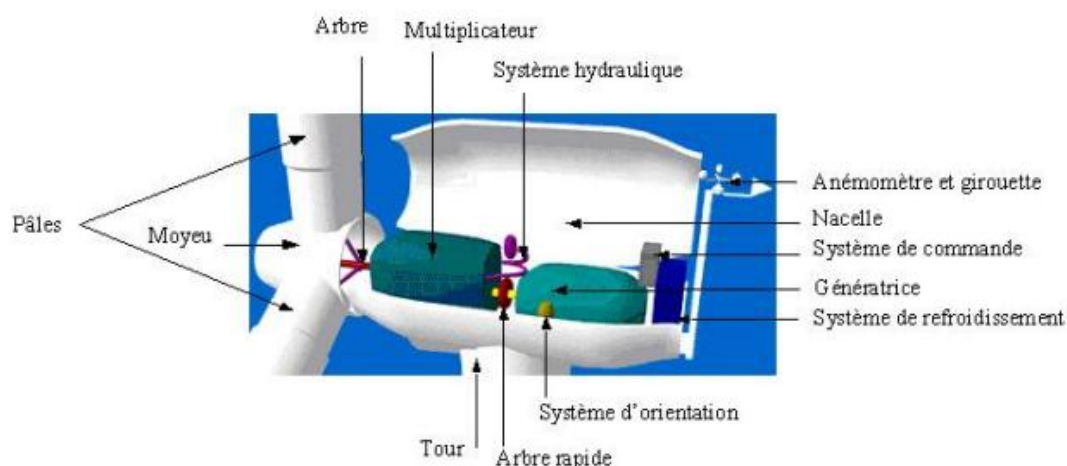


Figure I.7. Eléments constituant une éolienne

I.6. Eolienne à vitesse fixe

Les premières éoliennes commercialisées utilisaient une machine asynchrone à cage directement couplée au réseau électrique. Un multiplicateur de vitesse entraînait cette machine à une vitesse maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs était souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage. La conception des turbines éoliennes à vitesse fixe dépendait fortement des caractéristiques aérodynamiques et mécaniques. Le temps de réponse de certaines de ces parties se situait dans la gamme de la dizaine de millisecondes. Par conséquent, en cas

de rafales de vent, on pouvait observer une variation rapide et importante de la puissance électrique générée [Tar-11].

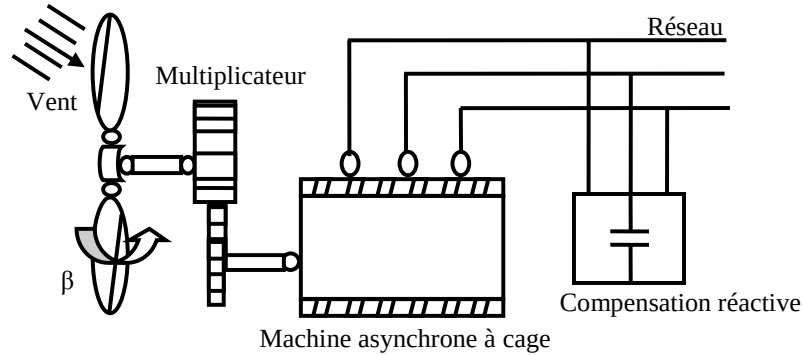


Figure I.8. Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.

Cette configuration présente les avantages et les inconvénients suivants :

a) Avantages :

- ❖ Système électrique simple.
- ❖ Grande fiabilité.
- ❖ Non nécessité de systèmes électrique de commande.
- ❖ Cout global moins cher.

b) Inconvénients :

- ❖ Une puissance extraite non optimale (constante).
- ❖ Quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- ❖ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

I.7. Eolienne à vitesse variable

Afin d'optimiser le point de fonctionnement en termes de puissance extraite, il est nécessaire de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent. Actuellement, les éoliennes de forte puissance, connectées aux réseaux de moyenne tension, fonctionnent sous vitesse variable.

Les avantages principaux des éoliennes à vitesse variable comparées à celles à vitesse fixe sont les suivants [Tar-11] :

- Augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément converti.
- Simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale P_n .
- Réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie.
- Réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente.

I.8. Conclusion

Ce chapitre a fourni un aperçu complet des systèmes éoliens, en mettant en lumière les différentes configurations technologiques, les évolutions historiques, ainsi que les avantages et les défis associés à l'utilisation de l'énergie éolienne. Les éoliennes, qu'elles soient à axe vertical ou horizontal, jouent un rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie renouvelable et durable.

Les éoliennes à axe vertical, bien que pionnières, ont montré certaines limitations en termes de rendement et de fiabilité, malgré des avantages notables comme la facilité d'accès aux composants mécaniques au sol. D'un autre côté, les éoliennes à axe horizontal ont dominé le marché grâce à leur efficacité supérieure et leur capacité à produire davantage d'énergie à des hauteurs où les vents sont plus constants et plus puissants.

L'évolution des technologies de contrôle, notamment avec l'introduction des éoliennes à vitesse variable, a permis d'optimiser la conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Ces innovations ont non seulement amélioré le rendement énergétique mais aussi réduit les contraintes mécaniques et le bruit, tout en facilitant l'intégration au réseau électrique.

L'énergie éolienne se distingue par ses avantages environnementaux, n'engendrant ni émissions polluantes ni déchets radioactifs. Toutefois, elle présente des défis techniques tels que l'intermittence et la nécessité de systèmes complexes pour capter efficacement l'énergie du vent. Malgré cela, les progrès technologiques et les investissements continus dans ce domaine promettent de surmonter ces obstacles et de renforcer la contribution de l'énergie éolienne à la transition énergétique mondiale.

En conclusion, les systèmes éoliens représentent une solution viable et essentielle pour répondre aux besoins énergétiques actuels et futurs, tout en contribuant à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la protection de l'environnement. L'innovation continue et l'amélioration des technologies éoliennes seront déterminantes pour maximiser leur potentiel et atteindre les objectifs globaux de développement durable.

Modélisation de la turbine éolienne

II.1.	Introduction	16
II.2.	Vent	16
II.2.1.	Caractéristique horizontale du vent	18
II.2.2.	Portance et trainée	19
II.2.3.	Modélisation du vent	20
II.3.	Conversion de l'énergie éolienne	21
II.3.1.	Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	21
II.3.2.	Loi de Betz	21
II.4.	Modélisation de la turbine éolienne	22
II.4.1.	Puissance aérodynamique.....	23
II.4.2.	Modélisation de l'arbre de la machine	25
II.4.3.	Modélisation de multiplicateur de vitesse	26
II.5.	Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	26
II.6.	Conclusion.....	28

II.1. Introduction

Les turbines éoliennes jouent un rôle crucial dans la transition vers des sources d'énergie renouvelables, contribuant significativement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre et à la diminution de la dépendance aux combustibles fossiles. La modélisation des turbines éoliennes est un domaine essentiel qui permet de comprendre, simuler et optimiser leur fonctionnement. Cette étape est fondamentale pour améliorer leur efficacité, leur fiabilité et leur intégration dans le réseau électrique.

La modélisation des turbines éoliennes couvre une gamme étendue de phénomènes physiques et mécaniques. Elle inclut des aspects aérodynamiques, structuraux, électriques et de contrôle. En aérodynamique, il s'agit de modéliser le flux d'air autour des pales pour maximiser l'extraction d'énergie. Les aspects structuraux concernent la résistance et la durabilité des matériaux face aux forces et aux contraintes environnementales. Les composants électriques, tels que les générateurs et les convertisseurs, nécessitent une modélisation précise pour optimiser la conversion de l'énergie cinétique en énergie électrique. Enfin, les systèmes de contrôle jouent un rôle clé dans la régulation et la protection de la turbine, en assurant son fonctionnement optimal dans diverses conditions de vent.

Les approches de modélisation varient en fonction des objectifs et des contraintes spécifiques de chaque projet. Elles peuvent aller des modèles analytiques simples, qui offrent des solutions rapides et approximatives, aux simulations numériques complexes utilisant des méthodes comme la dynamique des fluides numérique (CFD) et l'analyse par éléments finis (FEA). Ces techniques avancées permettent de capturer les interactions détaillées entre les différentes parties de la turbine et les conditions environnementales.

La compréhension approfondie de la modélisation des turbines éoliennes est cruciale pour les ingénieurs et les chercheurs travaillant dans le domaine de l'énergie éolienne. Elle permet de concevoir des turbines plus performantes et plus fiables, de prévoir leur comportement sous différentes conditions et de réduire les coûts de maintenance et d'exploitation. Ce chapitre explore les différents aspects et techniques de la modélisation des turbines éoliennes, offrant ainsi une base solide pour les études et les développements futurs dans ce domaine dynamique et en constante évolution.

II.2. Vent

La vitesse et la direction du vent sont influencées par divers éléments tels que l'emplacement géographique, les conditions climatiques, l'altitude, et la topographie du sol, définissant ainsi ses caractéristiques spécifiques. Les éoliennes captent l'énergie cinétique du vent et la transforment en énergie exploitable, principalement sous forme d'énergie électrique. Cette conversion résulte de divers phénomènes complexes et interconnectés.

La vitesse du vent varie en fonction de la latitude, la proximité de grandes étendues d'eau, et la présence de montagnes ou de vallées. Par exemple, les régions côtières et les grandes plaines sont souvent favorables à des vents plus réguliers et plus forts, idéales pour l'installation d'éoliennes. La direction du vent peut également être modifiée par des obstacles naturels ou artificiels, comme les bâtiments ou les forêts, qui créent des perturbations et des turbulences.

L'altitude joue un rôle crucial : plus on monte en altitude, plus les vents sont généralement forts et constants, en raison de la diminution des effets de frottement avec la surface terrestre. La topographie du sol, incluant les collines, les montagnes et les vallées, affecte aussi le flux d'air, créant des accélérations locales et des effets de canalisation du vent.

Les éoliennes, en captant l'énergie cinétique du vent, convertissent cette énergie mécanique en énergie électrique via un générateur. Ce processus commence lorsque le vent fait tourner les pales de la turbine. Les pales sont conçues pour maximiser l'extraction d'énergie en utilisant des profils aérodynamiques sophistiqués qui génèrent une portance, similaire au principe de fonctionnement des ailes d'avion. Cette rotation est ensuite transférée à un générateur par l'intermédiaire d'un arbre et, souvent, d'un multiplicateur de vitesse, augmentant ainsi la vitesse de rotation pour atteindre les niveaux requis pour la production d'électricité.

La conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique implique plusieurs étapes :

- **Aérodynamique des Pales** : Les pales de la turbine capturent le vent et convertissent son énergie cinétique en rotation mécanique.
- **Transmission Mécanique** : L'énergie mécanique des pales est transmise via un arbre principal à un générateur. Un multiplicateur de vitesse est souvent utilisé pour ajuster la vitesse de rotation.
- **Génération Électrique** : Le générateur transforme l'énergie mécanique en énergie électrique, qui est ensuite régulée et convertie en courant utilisable pour le réseau.
- **Contrôle et Optimisation** : Les systèmes de contrôle ajustent l'orientation des pales (pitch control) et la direction de la turbine (yaw control) pour optimiser la capture d'énergie en fonction des variations du vent.

En somme, les caractéristiques du vent, influencées par des facteurs géographiques, climatiques et topographiques, déterminent l'efficacité avec laquelle les éoliennes peuvent convertir l'énergie éolienne en énergie électrique. Comprendre et modéliser ces interactions est crucial pour le développement et l'optimisation des parcs éoliens, permettant de maximiser leur rendement énergétique et leur viabilité économique.

II.2.1. Caractéristique horizontale du vent

La caractéristique horizontale du vent, définie par sa puissance et sa variabilité, a été étudiée à travers des modèles de distribution de vitesses qui adoptent souvent une forme exponentielle. Ces modèles permettent de comprendre et de prédire les conditions éoliennes dans différentes régions, offrant des outils essentiels pour l'évaluation et l'optimisation des parcs éoliens. Parmi les modèles couramment utilisés, on trouve :

- La distribution de Weibull : Ce modèle est largement utilisé en raison de sa flexibilité et de sa capacité à représenter une large gamme de conditions de vent. La distribution de Weibull est caractérisée par deux paramètres : la forme et l'échelle, qui permettent d'ajuster la courbe pour qu'elle corresponde aux données de vitesse du vent observées.
- La distribution hybride de Weibull : Cette variation du modèle de Weibull combine les avantages de la distribution de Weibull avec d'autres distributions pour mieux capturer des aspects spécifiques du comportement du vent, tels que les changements de régime de vent ou les variations saisonnières. Elle est particulièrement utile dans des environnements complexes où une seule distribution de Weibull ne suffit pas à représenter fidèlement les données.
- La distribution de Rayleigh : Ce modèle est un cas particulier de la distribution de Weibull, avec un paramètre de forme égal à 2. Il est souvent utilisé lorsque les données sur le vent sont limitées ou lorsque le vent suit une distribution normale simplifiée. La distribution de Rayleigh est plus facile à appliquer et peut fournir des estimations rapides et raisonnables des conditions de vent moyennes.

Ces modèles de distribution sont employés pour modéliser la variation de la vitesse du vent à l'horizontale, en tenant compte de la nature stochastique et variable du vent. La compréhension de ces modèles est cruciale pour :

- L'Analyse des Ressources Éoliennes : En évaluant les distributions de vitesse du vent, les ingénieurs peuvent estimer la production d'énergie potentielle d'un site éolien avant son développement.
- La Conception des Turbines : Les caractéristiques du vent influencent la conception des turbines, y compris la taille des pales, la hauteur de la tour et les systèmes de contrôle, afin de maximiser l'efficacité et la durabilité des turbines.
- La Planification et l'Optimisation des Parcs Éoliens : Les modèles de distribution aident à déterminer la disposition optimale des turbines au sein d'un parc éolien pour minimiser les effets de sillage et maximiser la capture d'énergie.

- La Gestion de l'Intermittence : En comprenant les modèles de vent, il est possible de mieux prévoir les variations de production et de planifier les opérations du réseau électrique pour gérer l'intermittence de l'énergie éolienne.

Les modèles de distribution de la vitesse du vent, tels que ceux de Weibull, de la distribution hybride de Weibull, et de Rayleigh, sont des outils fondamentaux pour l'étude et la gestion des ressources éoliennes. Ils fournissent des bases solides pour la conception, la planification et l'exploitation efficaces des systèmes d'énergie éolienne, contribuant ainsi à la transition vers une énergie plus durable.

II.2.2. Portance et trainée

Deux types de fonctionnements aérodynamiques sont possibles selon l'utilisation de la force de trainée ou de la force de portance.

Ces deux types de forces physiques sont exploités de différentes manières, conduisant à la création de divers types d'éoliennes, chacune favorisant soit les performances énergétiques, soit les aspects fonctionnels tels que l'orientation, la position de la génératrice et le montage.

Le rotor de l'éolienne, également appelé turbine, joue un rôle crucial en transformant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'éolienne utilise cette énergie cinétique pour induire la rotation des pales. Cette rotation est influencée par deux principaux facteurs :

- La force du vent exercée sur les pales : La vitesse et la densité du vent affectent directement la quantité d'énergie capturée par les pales de l'éolienne. Plus le vent est fort, plus la quantité d'énergie transférée aux pales est importante, ce qui entraîne une rotation plus rapide du rotor.
- L'angle d'incidence des pales par rapport au vent : Cet angle, également appelé angle d'attaque, est crucial pour l'efficacité aérodynamique de l'éolienne. Un angle d'incidence optimal permet de maximiser la portance tout en minimisant la trainée, ce qui améliore l'efficacité énergétique de l'éolienne. La position oblique des pales, déterminée par cet angle, permet de capter au mieux l'énergie du vent et de la convertir en mouvement rotatif.

En somme, l'exploitation des forces de trainée et de portance, ainsi que l'optimisation des facteurs influençant la rotation des pales, sont essentiels pour la conception et l'efficacité des éoliennes. Ces principes permettent de créer des dispositifs adaptés à diverses conditions environnementales et besoins énergétiques.

II.2.3. Modélisation du vent

La modélisation du vent est une composante cruciale dans la représentation du système éolien. Sa vitesse, qui est tridimensionnelle, présente des contrastes aléatoires et une caractéristique très volatile. Par conséquent, il est impératif de modéliser la vitesse du vent en tant que fonction scalaire, une variable qui varie dans le temps. Cette approche permet de tenir compte des fluctuations temporelles et des caractéristiques imprévisibles du vent, offrant ainsi une représentation plus réaliste de son comportement dynamique.

$$v(t) = V_m + \sum_{n=1}^i [a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v t)]$$

V_m : Valeur moyenne de la vitesse du vent.

a_n : Amplitude de l'harmonique de l'ordre.

ω_n : Pulsation de l'harmonique de l'ordre.

La figure II.1 représente le profil du vent simulé avec une vitesse moyenne de 12 m/s.

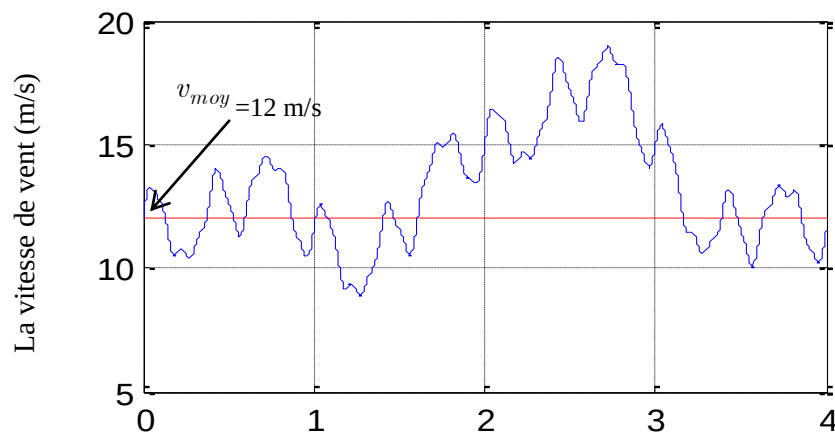


Figure II.1 : Exemple de profil de vent généré

La figure précédant montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (4s) entre deux valeurs ($v_{\max}=18.96$ m/s) comme valeur maximale et ($v_{\min}=8.88$ m/s) comme valeur minimale d'une façon aléatoire ce qui reflète un vent réel.

II.3. Conversion de l'énergie éolienne

II.3.1. Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

L'énergie cinétique (E_c) d'une colonne d'air de longueur dx , de section s , de masse volumique ρ , animée d'une vitesse v (figure II-1), peut être exprimée mathématiquement comme suit :

$$dE_c = \frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot dx v^2 \quad (\text{II.1})$$

Cette formule représente l'énergie cinétique contenue dans la colonne d'air considérée, et elle est souvent utilisée dans le contexte de la modélisation et de la conception de turbines éoliennes pour évaluer la quantité d'énergie cinétique que le vent peut transférer à la turbine.

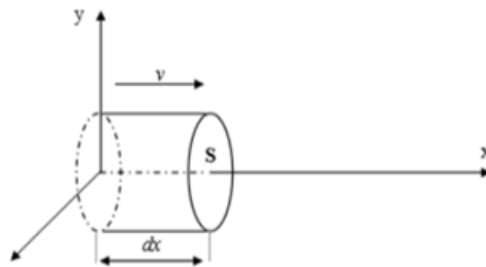


Figure II.1: Colonne d'air animée d'une vitesse v

II.3.2. Loi de Betz

La loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $\frac{16}{27}$ ou de (59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce fut l'Allemand Albert Betz qui, en 1929, formula la loi de Betz pour la première fois. Considérons le système de la (figure II.2) qui représente un tube de courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V_1 représente la vitesse du vent en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

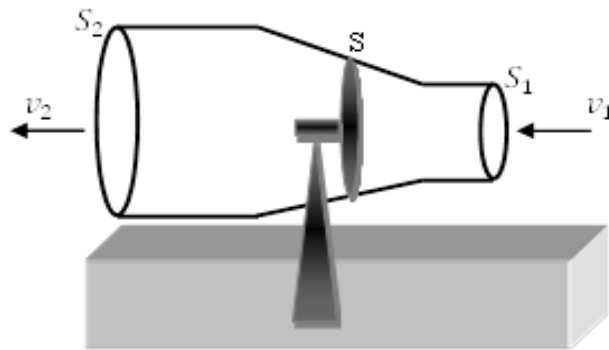


Figure II.3: Tube de courant autour d'une éolienne.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $(V_1 + V_2)/2$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

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

La puissance $P_{\nu, u}$ alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_{\nu, u} = \frac{m \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{II.3})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.1) :

$$P_{\nu, u} = \frac{\rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2)}{4} \quad (\text{II.4})$$

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

$$P_{\nu, t} = \frac{\rho \cdot S \cdot V_1^3}{2} \quad (\text{II.5})$$

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

$$\frac{P_{\nu, u}}{P_{\nu, t}} = \left[\frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)}{2} \right] \quad (\text{II.6})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que le ratio $P_{\nu, u} / P_{\nu, t}$ appelé aussi coefficient de puissance (CP) présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

II.4. Modélisation de la turbine éolienne

On examine une éolienne équipée de pales de longueur R , entraînant une génératrice via un multiplicateur de vitesse avec un gain G . La modélisation de cette composante mécanique vise à

établir une liaison réaliste entre le vent et la génératrice. L'hélice et la génératrice partagent le couple et la vitesse de rotation (via le multiplicateur).

Au niveau de l'hélice, le vent génère des forces de portance et de traînée sur les pales, ce qui crée un couple. Ce couple est ensuite transmis à la génératrice par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse. La génératrice produit de l'électricité en fonction du couple reçu et de sa vitesse de rotation.

La régulation de la vitesse de rotation est cruciale pour optimiser la puissance produite par l'éolienne. Un excès de puissance peut diminuer la vitesse de rotation en augmentant la résistance électrique dans le système de génération, tandis qu'une insuffisance de puissance peut augmenter la vitesse de rotation en réduisant cette résistance. Ainsi, le système s'équilibre pour maintenir une vitesse de rotation optimale en fonction des conditions de vent et des besoins en production électrique.

Le couple généré par les forces de portance et de traînée sur les pales de l'hélice est transmis à la génératrice via le multiplicateur de vitesse. Ce couple, en interaction avec les caractéristiques de la génératrice, régule la vitesse de rotation de l'ensemble du système pour assurer une production de puissance efficace et stable.

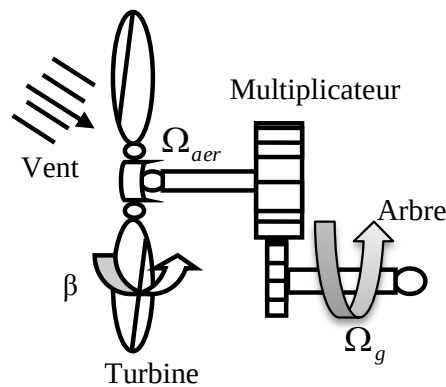


Figure II.4: Schéma de la turbine éolienne

II.4.1. Puissance aérodynamique

Le physicien A. Betz¹ a démontré que l'on pouvait lier la puissance aérodynamique fournie par le système éolien à la puissance du vent P_v , et l'exprimer par l'équation suivante [Sai-21] :

$$P_{aer} = C_p P_v \quad (\text{II.7})$$

Où est le coefficient de puissance. Son expression théorique est donnée par [Poi-03] :

¹ Albert Betz (1885–1968) était un physicien allemand et un pionnier de la technologie des éoliennes.

$$C_p = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right) \cdot \left(1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right)\right)}{2} \quad (\text{II.8})$$

Où :

V_1 : La vitesse du vent en amont de la turbine [$m \cdot s^{-1}$],

V_2 : La vitesse du vent en aval de la turbine [$m \cdot s^{-1}$].

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il dépend des caractéristiques de la turbine, son expression est donnée par [Ker-17] :

$$C_p(\lambda, \beta) = C_1 \cdot \left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3 \cdot \beta - C_4 \right) \cdot e^{\left(\frac{-C_5}{\lambda_i} \right)} + C_6 \cdot \lambda \quad (\text{II.9})$$

D'où :

$$\begin{cases} \frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \\ \lambda = \frac{R \cdot \omega_t}{V} \end{cases} \quad (\text{II.10})$$

Tel que :

R : Rayon des pales [m],

λ : Vitesse relative de la turbine,

β : Angle d'orientation des pales [$^\circ$],

ω_t : Vitesse de rotation de la turbine [$rd \cdot s^{-1}$].

Donc, la puissance aérodynamique apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit alors :

$$P_{aer} = \frac{1}{2} C_p(\lambda, \beta) \rho S_T V^3 \quad (\text{II.11})$$

La Figure II. 5, illustre un exemple de courbes de coefficient de puissance d'une éolienne, montrant l'évolution du coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse relative λ pour différentes valeurs de l'angle d'orientation de pales β .

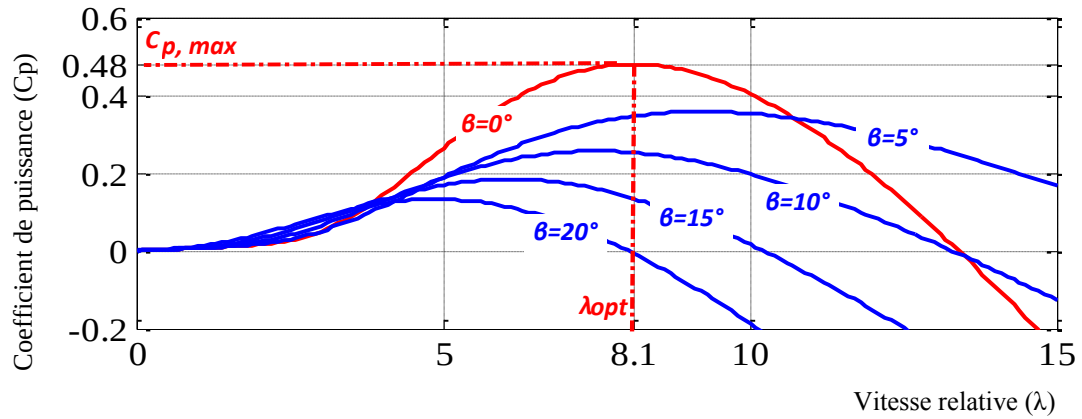


Figure II. 5 : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse relative sous différents angles d'orientation de pales.

II.4.2. Modélisation de l'arbre de la machine

J est l'inertie totale de la turbine qui Transféré sur le rotor et le modèle mécanique de ce l'inertie totale **j** est :

$$J = j_{\text{génératrice}} + j_{\text{turbine}} \quad (\text{II.12})$$

Le couple mécanique compte le couple des frottements visqueux et le couple électromagnétique et le couple du multiplicateur :

$$C_{\text{mec}} = C_{\text{mul}} + C_{\text{em}} + C_{\text{vis}} \quad (\text{II.13})$$

Le comportement mécanique de l'ensemble turbine - génératrice est représenté par l'équation différentielle suivante :

$$\begin{aligned} J_t + J_m \cdot \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} &= C_{\text{mec}} \\ J_t + J_m \cdot \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} &= C_{\text{mul}} - C_{\text{em}} - C_{\text{vis}} \\ J_t + J_m \cdot \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} &= C_{\text{mul}} - C_{\text{em}} - (f_m + f_t) \Omega_{\text{mec}} \end{aligned} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

J_t : Inerties de la turbine.

J_m : Inerties de la machine.

$C_{\text{vis}} = f \Omega_{\text{mec}} = (f_m + f_t) \Omega_{\text{mec}}$

C_{em} : Couple électromagnétique produit par la génératrice.

C_{vis} : Des frottements visqueux.

f_m : Coefficient de frottement de la machine.

f_t : Coefficient du frottement des pales.

Ω_{mec} : La vitesse de rotation.

C_{mul} : Le couple du multiplicateur.

II.4.3. Modélisation de multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur constitue la liaison entre la turbine et le générateur, et il est considéré comme étant rigide, représenté mathématiquement par un simple gain. Les effets de l'élasticité et du frottement sont négligés, tandis que les pertes énergétiques dans cet élément sont supposées être nulles. La fonction principale du multiplicateur est d'ajuster la vitesse initialement basse de la turbine à la vitesse requise par la génératrice. Cette adaptation est formalisée mathématiquement par l'équation suivante :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{génératrice}}{G} \quad (II.15)$$

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport du multiplicateur pour Obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{génératrice} = \frac{C_{turbine}}{G} \quad (II.16)$$

Avec:

G : gain de multiplicateur

II.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif du contrôle de la turbine éolienne à vitesse variable, lorsque la vitesse du vent est en dessous de la vitesse nominale, est de maximiser la puissance aérodynamique en utilisant les différentes stratégies de maximisation de puissance. Cette puissance est maximisée à travers le contrôle du couple électromagnétique. À une vitesse du vent au-dessus de la vitesse nominale, l'objectif du contrôle est de limiter la puissance aérodynamique transmise à la génératrice et de maintenir la turbine dans ses limites de fonctionnement en utilisant les différentes stratégies du contrôle. En effet, lorsque la vitesse du vent au-dessus de la vitesse nominale, le rendement aérodynamique de la turbine doit être limitée la puissance aérodynamique nominale du système éolien. Cela correspond à une réduction de coefficient de puissance. Ceci peut être obtenu principalement avec deux types de contrôles : passif et actif. Le contrôle passif améliore les performances des éoliennes et réduit les charges sans dépense d'énergie externe, alors que le contrôle actif nécessite une énergie externe ou une alimentation auxiliaire. Des exemples de contrôle passif et actif sont étudiés dans les références [Bou-06]. En effet, un contrôle efficace des turbines éoliennes à vitesse variable peut améliorer les caractéristiques dynamiques,

augmenter la durée de vie de l'éolienne et réduire la charge transitoire sur l'arbre de transmission. De nombreuses techniques ont été proposées pour l'extraction maximale ou la limitation de la puissance aérodynamique de la turbine éolienne à vitesse variable au cours de la dernière décennie [Bou-06]. Généralement, le contrôle de la turbine éolienne passe par trois zones de fonctionnement différentes qui dépendent de la vitesse du vent, de la vitesse maximale de la génératrice admissible et de la puissance désirée, comme illustré sur la Figure II. 8.

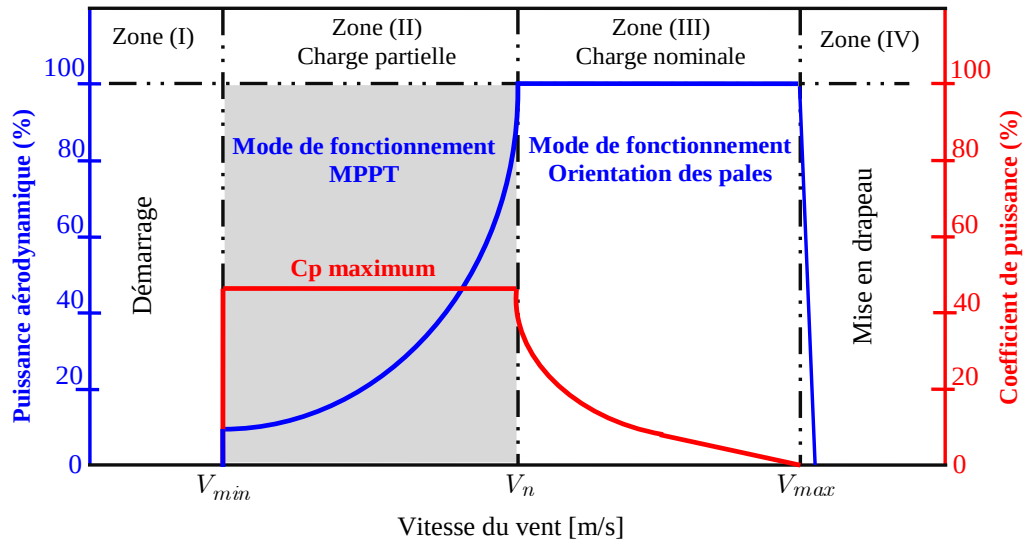


Figure II. 6 : Zones de fonctionnement d'un système éolien à vitesse variable.

- **Zone (I):** dans cette zone, la génératrice est à l'arrêt, car la vitesse du vent n'est pas suffisamment élevée pour faire fonctionner le système éolien, et donc elle ne produit aucune puissance électrique.

$$\begin{cases} V \leq V_{min} \\ P_{ele} = 0 \end{cases} \quad (II.17)$$

- **Zone (II) :** cette zone est caractérisée par un fonctionnement à des vitesses, du vent, inférieures ou égales à la vitesse nominale. Pour cette raison, on cherche à maximiser la puissance aérodynamique afin d'extraire le maximum de la puissance aérodynamique. Avec cette stratégie, on cherche le point de puissance maximale pour chaque vitesse du vent, c'est la MPPT (*En anglais : Maximum Power Point Tracking*). Cette zone s'appelle est caractérisée par un fonctionnement à charge partielle. Dans ce cas, il est à noter que l'angle d'orientation des pales doit être constant et égale toujours à zéro ($\beta = 0^\circ$), et la vitesse relative de la turbine est à sa valeur optimale (λ_{opt}). Dans cette zone :

$$\begin{cases} V_{min} < V \leq V_n \\ P_{aer,max} = 0.5 \cdot C_{p,max} \rho S V^3 \end{cases} \quad (II.18)$$

- **Zone (III) :** cette zone est caractérisée par un fonctionnement à des vitesses, du vent, supérieures à la vitesse nominale. Elle s'appelle zone de fonctionnement à charge nominale. Dans cette zone, une action de contrôle est utilisée sur les aubes de la turbine pour maintenir la puissance aérodynamique P_{aer} dans sa valeur de la puissance nominale, pour assurer la sécurité de la génératrice et limiter les charges mécaniques transmises à la nacelle et à la tour. Si la vitesse du vent dépasse la vitesse maximale, le système de contrôle ajuste l'angle de calage des pales à la valeur ($\beta = 90^\circ$) pour arrêter la génératrice. C'est la mise en drapeau.

Dans cette zone :

$$\begin{cases} V_n < V \leq V_{max} \\ P_{aer} = P_n \end{cases} \quad (II.19)$$

II.6. Conclusion

La modélisation d'une turbine éolienne permet de comprendre et d'optimiser les interactions complexes entre le vent, l'hélice et la génératrice. En étudiant les forces de portance et de traînée sur les pales, ainsi que le rôle du multiplicateur de vitesse, nous avons établi une relation réaliste entre les conditions de vent et la production d'électricité.

Cette approche a révélé l'importance de la régulation du couple et de la vitesse de rotation pour maintenir une production énergétique stable et efficace. En adaptant la résistance électrique en fonction de la puissance disponible, le système peut équilibrer les variations de vitesse de rotation et maximiser la conversion d'énergie éolienne en électricité.

En somme, la modélisation précise de la turbine éolienne constitue une étape cruciale pour améliorer les performances des systèmes éoliens et pour répondre aux exigences croissantes en matière d'énergies renouvelables. Cela ouvre la voie à des innovations technologiques et à des stratégies de gestion énergétique plus sophistiquées, contribuant ainsi à un avenir énergétique durable.

Ce chapitre nous a permis de modéliser un système de conversion d'énergie éolienne. Nous avons commencé par la modélisation de la vitesse du vent appliqué, de la turbine (comprenant les pales, le multiplicateur et l'arbre mécanique) et du coefficient de puissance. À la fin de ce chapitre, nous avons discuté du principe de la régulation mécanique de la puissance d'une éolienne.

Estimation de la vitesse du vent à base du filtre de Kalman

III.1	Introduction	30
III.2	Fonctionnement du filtre de Kalman.....	30
III.3	Modèle du filtre de Kalman pour un système dynamique.....	31
III.3.1	Prediction de l'état	32
III.3.1.1	Prédiction de l'état moyen	32
III.3.1.2	Prédiction de la covariance de l'état	32
III.3.2	Correction de l'état prédit.....	33
III.3.2.1	Calcul de l'innovation.....	33
III.3.2.2	Correction de l'état prédit.....	34
III.3.2.3	Correction d'erreur.....	34
III.3.2.4	Covariance de la correction de l'état prédit.....	34
III.3.3	Résultats de la simulation et discussion :	35
III.3.3.1	Résultats de simulation de système basés sur le KF.....	36
III.4	Conclusion.....	40

III.1 Introduction

Le filtre de Kalman est un processus optimal d'estimation d'état appliqué à un système dynamique qui implique des perturbations aléatoires. Plus précisément, le filtre de Kalman fournit un algorithme récursif linéaire, non biaisé et d'erreurs minimales pour estimer de façon optimale l'état inconnu d'un système dynamique à partir de données bruitées prises en temps réel. La théorie du filtre de Kalman a reçu une attention toute particulière dans de nombreux domaines tels que l'ingénierie, la robotique, la navigation et l'économie depuis les années 60. Avec le développement récent des ordinateurs à grande vitesse de calcul, le filtre de Kalman est devenu plus utile même pour des applications en temps réel très compliquées. Il doit son nom à Rudolf Kalman, éminent chercheur d'origine hongroise qui a publié son fameux article « *A new approach to Linear Filtering and Prediction Problems* » [Kal-60] qui rencontra un certain scepticisme au début, mais qui a par la suite été adopté par la plupart des chercheurs surtout après son application dans le programme spatial Apollo.

Dans ce chapitre, nous définirons dans ce chapitre les outils mathématiques nécessaires pour bien aborder le filtre de Kalman. Ensuite, on va appliquer ces équations pour estimer la vitesse de vent afin d'améliorer les performances du système éolien.

III.2 Fonctionnement du filtre de Kalman

Les problèmes de signaux bruités sont assez fréquents dans beaucoup de domaines, comme par exemple le domaine de la navigation où le signal est noyé dans des erreurs de mesures et d'observations [Bel-15]. Notre but est d'extraire le signal vérité du signal brut observé. Pour cela nous allons introduire dans ce chapitre l'algorithme du filtre de Kalman qui fait appel à la dynamique de la cible qui définit son évolution dans le temps et ainsi obtenir de meilleures données même lorsque la nature précise du système modélisé est inconnue [Bel-17]. Typiquement, on dispose d'une suite d'observations, obtenues après un traitement préalable du signal brut au niveau des capteurs, telle que chaque observation est reliée à un état inconnu précis de façon linéaire. Le but sera d'estimer cet état d'une manière optimale et récursive.

Le principe de fonctionnement du filtre de Kalman peut être résumé comme suit :

- **Modèle dynamique du système :** Tout d'abord, un modèle mathématique du système est établi. Ce modèle décrit la dynamique du système, c'est-à-dire comment l'état du système évolue au fil du temps. Il peut s'agir de lois physiques, de modèles probabilistes, de modèles de mouvement, etc.
- **Prédiction de l'état :** À chaque pas de temps, le filtre de Kalman prédit l'état futur du système en utilisant le modèle dynamique et l'estimation actuelle de l'état. Cette prédiction estime où devrait être l'état du système au prochain pas de temps.

- **Mise à jour de l'estimation** : Lorsqu'une nouvelle mesure est disponible, le filtre de Kalman compare la prédiction de l'état avec la mesure réelle. Il utilise ensuite cette comparaison pour ajuster l'estimation de l'état du système. Plus la mesure est précise, plus elle influence l'estimation finale de l'état.
- **Calcul des covariances** : Le filtre de Kalman prend également en compte les incertitudes associées à l'estimation de l'état et aux mesures. Il calcule les covariances associées à ces incertitudes pour pondérer correctement l'influence de la prédiction et de la mesure lors de la mise à jour de l'estimation.
- **Répétition** : Ce processus de prédiction, de mise à jour et de calcul des covariances est répété à chaque pas de temps, fournissant une estimation continue et adaptative de l'état du système.

En résumé, le filtre de Kalman est un algorithme puissant qui exploite à la fois les informations de modèle et les mesures réelles pour estimer l'état d'un système de manière optimale, en tenant compte des incertitudes associées à ces informations. Cela en fait un outil précieux dans de nombreuses applications où des estimations précises de l'état du système sont nécessaires.

III.3 Modèle du filtre de Kalman pour un système dynamique

Un système dynamique est un modèle mathématique qui permet de décrire un ensemble de composants en interaction en temps réel, étant donné les états antérieurs et l'état précédent, ils ne dépendent que de l'état précédent, des commandes appliquées et d'un processus aléatoire.

Pour établir le filtre de Kalman, nous avons besoin de deux équations. Ces équations sont [Bel-17] :

- L'équation d'état qui donne l'évolution temporelle de l'état :

$$x_{k+1} = A_k x_k + B_k U_k + \xi_k$$
- L'équation d'observation qui nous fournit des informations sur l'état :

$$y_{k+1} = C_k x_k + D_k U_k + \zeta_k$$

tel que $k = 0, 1, \dots$. Dans ces équations :

- x_k est le n-vecteur d'état du processus ;
- A_k est la (n, n)-matrice déterministe de transition de l'état ;
- U_k est le m-vecteur déterministe les entrées du système;
- B_k est la (n, m)-matrice déterministe qui relie le vecteur d'entrée U_k à l'état x_{k+1} ;

- ξ_k est le p-vecteur de bruit blanc, qui modélise l'erreur du processus, avec une moyenne et une (p, p)-matrice de variance covariance Q_k connues ;
- ζ_k est le p-vecteur de bruit blanc, qui modélise l'erreur du processus, avec une moyenne et une (p, p)-matrice de variance covariance R_k connues.

III.3.1 Prédiction de l'état

III.3.1.1 Prédiction de l'état moyen

Le filtre de Kalman est un filtre optimal pour l'estimation de l'état du système, il garantit que l'erreur sur l'estimation est en moyenne nulle et de variance minimale. A cette fin, le calcul de moyenne des équations du filtre de Kalman est nécessaire afin de calculer l'erreur de l'estimation ε_{k+1} . La moyenne des équations du filtre de Kalman se réfère généralement à la prédiction et à la mise à jour des états estimés d'un système dynamique à l'aide de mesures bruitées. Ces équations constituent le cœur du filtre de Kalman et sont utilisées pour estimer l'état actuel du système en se basant sur les observations passées et les modèles dynamiques du système.

La moyenne des équations du filtre de Kalman est donnée comme suit :

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1}^- = E(x_{k+1}) = E(A_k x_k + B_k U_k + \xi_k) \\ \quad = E(A_k x_k) + E(B_k U_k) + E(\xi_k) \\ \hat{y}_{k+1}^- = E(y_{k+1}) = E(C_k x_k + D_k U_k + \zeta_k) \\ \quad = E(C_k x_k) + E(D_k U_k) + E(\zeta_k) \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

On a considéré que ξ_k et ζ_k sont des vecteurs des bruits blancs, donc :

$$E(\xi_k) = E(\zeta_k) = 0 \quad (\text{III.2})$$

Par conséquent, la moyenne des équations du filtre de Kalman est donnée par la relation suivante:

$$\begin{cases} \hat{x}_{k+1} = A_k \hat{x}_k + B_k U_k \\ \hat{y}_{k+1} = C_k \hat{x}_k + D_k U_k \end{cases} \quad (\text{III.3})$$

III.3.1.2 Prédiction de la covariance de l'état

La prédiction de la covariance de l'état est une étape fondamentale dans les filtres de Kalman et d'autres algorithmes d'estimation d'état. Cette covariance représente l'incertitude associée à l'état estimé du système à un certain moment, en prenant en compte à la fois l'incertitude initiale et les erreurs de processus. Pour prédire la covariance de l'état à l'instant suivant, il fallait

propager l'incertitude de l'état actuel en fonction du modèle de transition d'état et des caractéristiques du bruit de processus. Cela peut être fait à l'aide de l'équation de prédiction de covariance :

$$P_{k+1} = \text{cov}(x_{k+1}) = E(\varepsilon_{k+1} \varepsilon_{k+1}^T) \quad (\text{III.4})$$

Avec,

L'erreur de prédiction ε_{k+1} est donnée par la relation suivante:

$$\begin{aligned} \varepsilon_{k+1} &= x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} \\ &= A_k (x_k - \hat{x}_k) + \xi_k \end{aligned} \quad (\text{III.5})$$

En remplaçant les équations du model d'état x_k et de l'état moyen $\hat{x}_k$, l'équation de prédiction de covariance devient comme suit :

$$\begin{aligned} P_{k+1} &= E(A_k ((x_k - \hat{x}_k) + \xi_k)(A_k (x_k - \hat{x}_k) + \xi_k)^T) \\ &= E(A_k \varepsilon_k \varepsilon_k^T A_k^T + A_k \varepsilon_k \xi_k^T + \xi_k^T \varepsilon_k A_k + \xi_k \xi_k^T) \\ &= E(A_k \varepsilon_k \varepsilon_k^T A_k^T) + E(A_k \varepsilon_k \xi_k^T) + E(\xi_k^T \varepsilon_k A_k) + E(\xi_k \xi_k^T) \end{aligned} \quad (\text{III.6})$$

Le produit entre $\varepsilon_k \xi_k^T$ est non corrélé, donc :

$$E(A_k \varepsilon_k \xi_k^T) = E(\xi_k^T \varepsilon_k A_k) = 0$$

Par conséquent, l'équation de prédiction de covariance peut être définie de la manière suivante :

$$\begin{aligned} P_{k+1} &= E(A_k \varepsilon_k \varepsilon_k^T A_k^T) + E(\xi_k \xi_k^T) \\ &= A_k E(\varepsilon_k \varepsilon_k^T) A_k^T + E(\xi_k \xi_k^T) \\ &= A_k P_k A_k^T + Q \end{aligned} \quad (\text{III.7})$$

III.3.2 Correction de l'état prédit

La correction de l'état prédit dans le filtre de Kalman est une étape cruciale pour estimer l'état réel du système en fusionnant les mesures réelles avec les prédictions de l'état. Cette correction est réalisée en mettant à jour l'état prédit en fonction de la différence entre la prédiction du système et les observations réelles.

Le processus de correction de l'état prédit dans le filtre de Kalman peut être détaillé comme suit :

III.3.2.1 Calcul de l'innovation

Avant de corriger l'état prédit, il est nécessaire de calculer l'innovation, qui représente la différence entre les mesures réelles et la prédiction du système. L'innovation est calculée à l'aide de

la différence entre les observations réelles y_k et la prédiction de la mesure $\hat{y}_k$ basée sur l'état prédit et le modèle de mesure. Donc, l'équation de l'innovation e_k est donnée par la relation suivante :

$$\begin{aligned} e_{k+1} &= y_{k+1} - \hat{y}_{k+1} \\ &= C_k (x_k - \hat{x}_k) + \zeta_k \end{aligned} \quad (\text{III.8})$$

III.3.2.2 Correction de l'état prédit

L'étape de correction de l'état prédit consiste à ajuster l'estimation de l'état en fonction de l'innovation. Cela est réalisé comme suit :

$$\hat{x}_{k+1}^+ = \hat{x}_{k+1} + K_k (y_{k+1} - \hat{y}_{k+1}) \quad (\text{III.9})$$

Ou,

K_k est le gain de Kalman ;

Et, les deuxièmes équations de l'état du système dynamique et de prédiction de l'état moyen peuvent être définies comme suit :

$$\begin{cases} y_{k+1} = C_k x_k + \zeta_k \\ \hat{y}_{k+1} = C_k \hat{x}_k \end{cases} \quad (\text{III.10})$$

III.3.2.3 Correction d'erreur

le modèle utilisé pour prédire l'état du système n'est pas précis, cela peut entraîner des erreurs de prédiction. Pour corriger cela, il peut être nécessaire d'améliorer la modélisation du système en ajustant les paramètres du modèle ou en utilisant des modèles plus complexes. Erreur de prédiction du modèle est définie comme suit :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{k+1}^+ &= x_{k+1} - \hat{x}_{k+1}^+ \\ &= x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} - K_k (y_{k+1} - \hat{y}_{k+1}) \\ &= x_{k+1} - \hat{x}_{k+1} - K_k (C_k x_k + \zeta_k - C_k \hat{x}_k) \\ &= (I - K_k C) \varepsilon_k - K_k \zeta_k \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

III.3.2.4 Covariance de la correction de l'état prédit

Près la correction de l'état prédit, la covariance de l'état est mise à jour pour refléter la précision de l'estimation corrigée. Cela est réalisé à l'aide de l'équation de mise à jour de la covariance du filtre de Kalman. Cela peut être fait à l'aide de l'équation de prédiction de covariance :

$$P_{k+1}^+ = \text{cov}(x_{k+1}^+) = E\left(\varepsilon_{k+1}^+ (\varepsilon_{k+1}^+)^T\right) \quad (\text{III.12})$$

Le produit entre $\varepsilon_{k+1}^+ (\varepsilon_{k+1}^+)^T$ est calculé comme suit:

$$\varepsilon_{k+1}^+ (\varepsilon_{k+1}^+)^T = ((I - K_k C) \varepsilon_k - K_k V_k) (\varepsilon_k^T (I - K_k C)^T - V_k^T K_k^T) \quad (\text{III.13})$$

Par conséquent, la covariance de la correction de l'état prédit est définie par la relation suivante :

$$P_{k+1}^+ = (I - K_k C_k) P_k (I - K_k C_k)^T + K_k R K_k^T \quad (\text{III.14})$$

Ou,

$$R = E(V_k V_k^T)$$

Le gain de Kalman K_k est calculé en fonction de la covariance de la prédiction de l'état P_{k+1} comme suit :

$$K_k = P_k C_k (C P_k C_k^T + R)^{-1} \quad (\text{III.15})$$

III.3.3 Résultats de la simulation et discussion :

Pour tester l'efficacité des techniques de filtrage de kalman (KF) dans l'estimation de la vitesse du vent, la plateforme MATLAB/Simulink a été utilisée pour effectuer la simulation. L'algorithme des KF linéaires et non linéaires est programmé et inclus sans un bloc de fonction Matlab. La simulation est effectuée avec un temps fixe de 0,1ms qui est égale au temps d'échantillonnage T du processus de discrétisation

Dans cette simulation, le profil de vitesse du vent mesurée est utilisé comme mentionne dans la section 2. De plus, le couple du générateur T est considéré comme une variable aléatoire incluant un bruit gaussien blanc. La simulation est réalisée en faisant varier la vitesse moyenne du vent et l'intensité de turbulence(TI).en fait, deux cas de simulation ont été traités dans cette mémoire. Ces cas peuvent être mentionnés comme suit :

- Cas 1 : La vitesse moyenne du vent a été maintenue constante à 12 m/s, tandis que l'intensité de la turbulence a été variée, comme mentionné dans le tableau 2.
- Cas 2 : La vitesse moyenne du vent a été maintenue constante à 14 m/s, tandis que l'intensité de la turbulence a été variée comme dans le premier cas ;

Les caractéristiques de la vitesse du vent pour les deux cas de simulation sont résumées dans le tableau III.1 .

Cas de simulation	V [m/s]	TI
Cas 1	12	0.10
	12	0.15
	12	0.25
	14	0.10
Cas 2	14	0.15
	14	0.25

Tableau III.1: Caractéristique de la vitesse du vent pour la simulation du KF

La comparaison entre le profil de vitesse du vent mesurée et estimée obtenu pour chaque cas de simulation est évaluée par une analyse statistique. Dans cette mémoire, la covariance et le coefficient de corrélation (CC, ρ) sont calculés pour chaque intervalle de 5 ms afin de réaliser cette étude comparative. Le temps de simulation est fixé à 6s. Par conséquent, les métriques statistiques utilisées dans cette mémoire seront calculées 1200 fois ($\eta_{\max} = 1200$) en fonction du temps d'échantillonnage $T = 10^{-4}$ s. Les formules de covariance et de CC peuvent être définies comme suit :

$$\begin{cases} Cov(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (A_i - \mu_A)(B_i - \mu_B) \\ \rho(A, B) = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N \left(\frac{A_i - \mu_A}{\sigma_A} \right) \left(\frac{B_i - \mu_B}{\sigma_B} \right) \end{cases} \quad (III.16)$$

Où (μ_A, μ_B) et (σ_A, σ_B) représentent la moyenne et l'écart type de A et B.

Les écarts-types de la variable X sont donnés par :

$$\sigma_X = \sqrt{\frac{1}{N-1} \left(\sum_{i=1}^N |X_i - \mu_X|^2 \right)} \quad (III.17)$$

III.3.3.1 Résultats de simulation de système basés sur le KF

Dans cette partie de simulation, les caractéristiques de vitesse du vent définies dans le tableau III.1 sont appliquées pour traiter les simulations du système éolien basées sur le KF. Les figures III.1 et III.2 illustrent les résultats de simulation obtenus pour le profil de vitesse du vent mesurée et la vitesse du vent estimée obtenue à partir du KF à différentes caractéristiques de vitesse du vent. Pour clarifier les résultats obtenus dans les figures III.1 et III.2, un zoom est appliqué entre 1 s et 1,03 s pour chaque signal obtenu dans la simulation, comme le montrent les figures 1a-1c et 2a-2c. Il est clair que la courbe de vitesse du vent estimée $\mathbf{V_e}$ tend à se déplacer avec la vitesse du vent estimée $\mathbf{V_r}$ à chaque valeur de $\mathbf{TI}$, avec une légère différence entre chaque courbe. Ces différences peuvent être illustrées par les métriques statistiques définies dans l'équation (III.16). Dans cette étude comparative, la covariance et le CC sont utilisés pour démontrer la relation et la dépendance entre la vitesse du vent estimée et la vitesse du vent mesurée.

Les figures III.3 à III.6 illustrent les résultats obtenus pour la covariance et le CC mesurés pour chaque intervalle de 5 ms entre les variables de vitesse du vent estimée et mesurée. Selon les figures III.3-4, les résultats obtenus pour tous les cas de simulation montrent que la covariance obtenue est positive. Par conséquent, les vitesses du vent estimées et mesurée ont une relation positive entre elles, ce qui signifie que la vitesse du vent estimée a tendance à augmenter ou à diminuer selon le changement de la vitesse du vent mesurée. Sinon, la covariance plus élevée obtenue à $TI=0,20$, comparée aux autres covariances, révèle que les valeurs de vitesse du vent elles-mêmes sont plus élevées. Cela ne signifie pas qu'une forte relation a été obtenue entre les vitesses du vent mesurées et estimées. Selon les figures III.5-6, les résultats montrent que le CC mesuré est positif et proche de un à ($\eta = 200; t = 1s$), $\eta = 260; t = 1.3 s$ et $\eta = 320; t = 1.6s$ pour ($TI=0,10$), ($TI=0,15$) et ($TI=0,20$), respectivement. Ainsi, la corrélation positive confirme le résultat obtenu dans les courbes de covariance selon lequel il existe une relation positive entre les vitesses du vent mesurée et estimées. Sinon, les valeurs de corrélation obtenues à l'état stationnaire indiquent que la force de la relation entre les vitesses du vent mesurée et estimées est forte, ce qui signifie qu'il y a une similarité de 95% entre les deux variables. La réponse temporelle de l'estimation de la vitesse du vent diminue avec l'augmentation de l'intensité de turbulence, comme le montrent les figures III.5 et III.6.

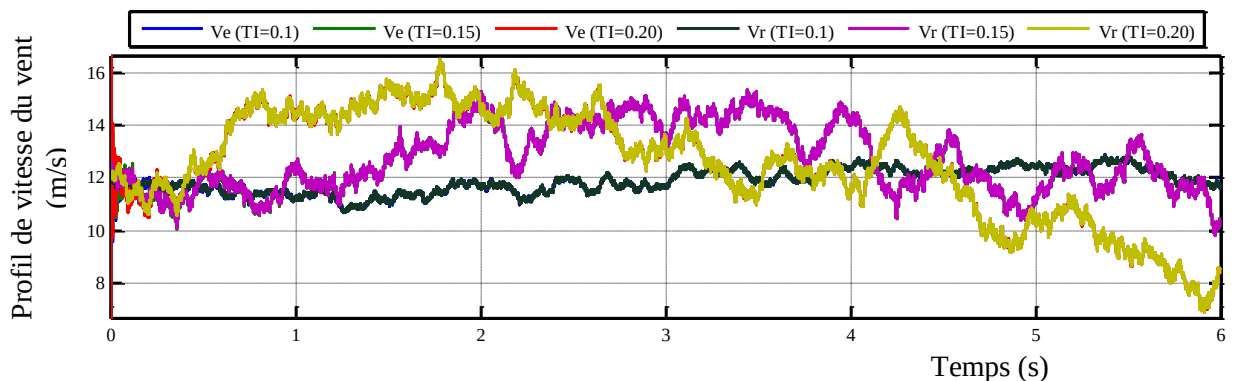


Figure III.1. Estimation de la vitesse du vent basée sur le KF linéaire à une vitesse moyenne du vent égale à $12 m/s$.

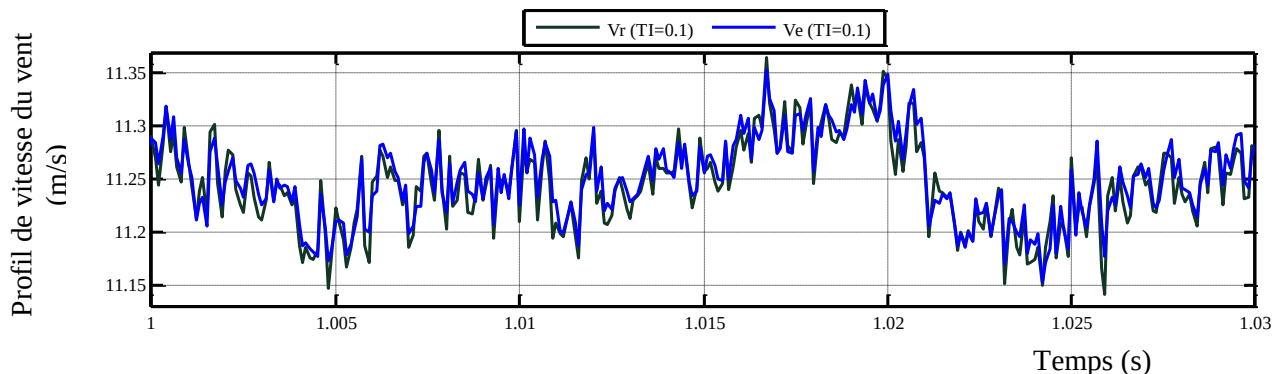


Figure III.2.a. Zoom de l'estimation de la vitesse du vent basée sur le KF à $V = 12 m/s$ and $TI = 0.1$

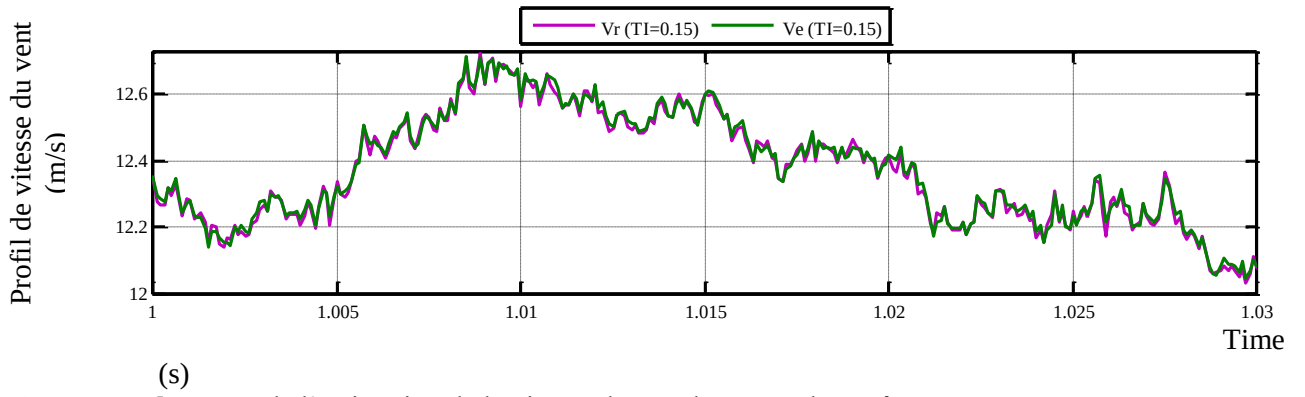


Figure III.3.b. Zoom de l'estimation de la vitesse du vent basée sur le KF à $V = 12 \text{ m/s}$ et $TI = 0.15$

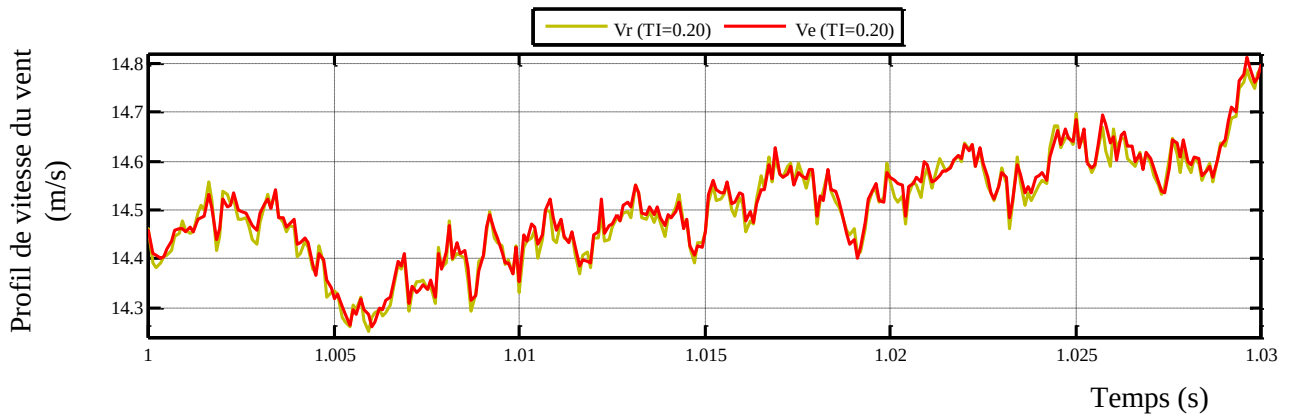


Figure III.4.c. Zoom de l'estimation de la vitesse du vent basée sur le KF à $V = 12 \text{ m/s}$ et $TI = 0.20$

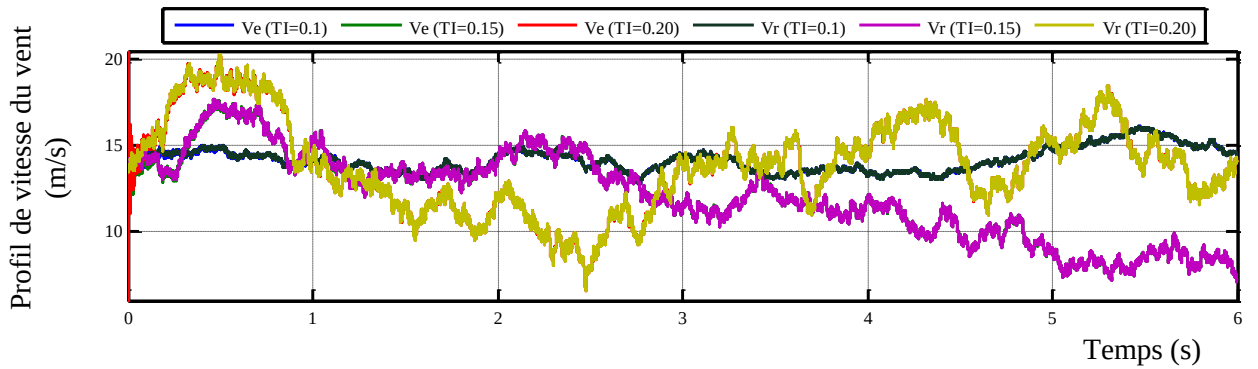


Figure III.5. Estimation de la vitesse du vent basée sur le KF à $V = 14 \text{ m/s}$

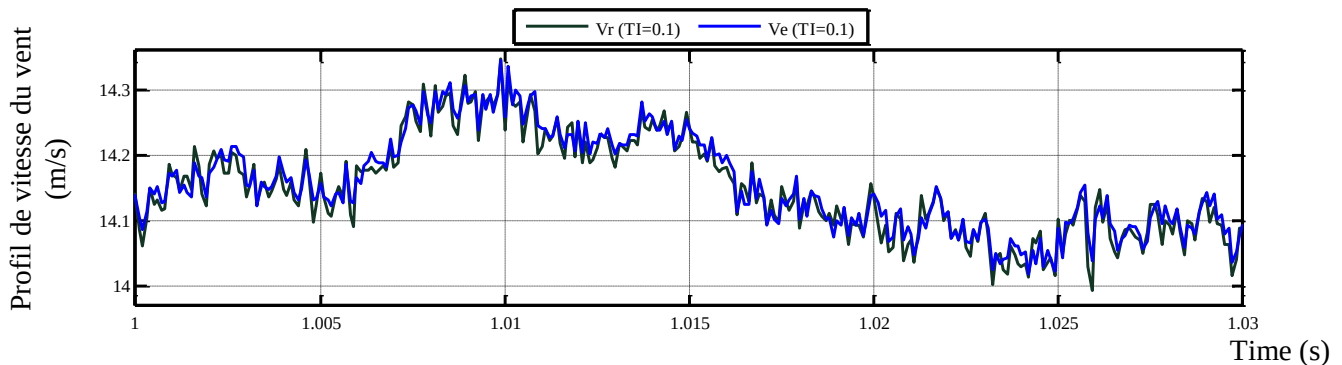


Figure III.6.a. Zoom de l'estimation de la vitesse du vent basée sur le KF à $V = 14 \text{ m/s}$ et $TI = 0.1$

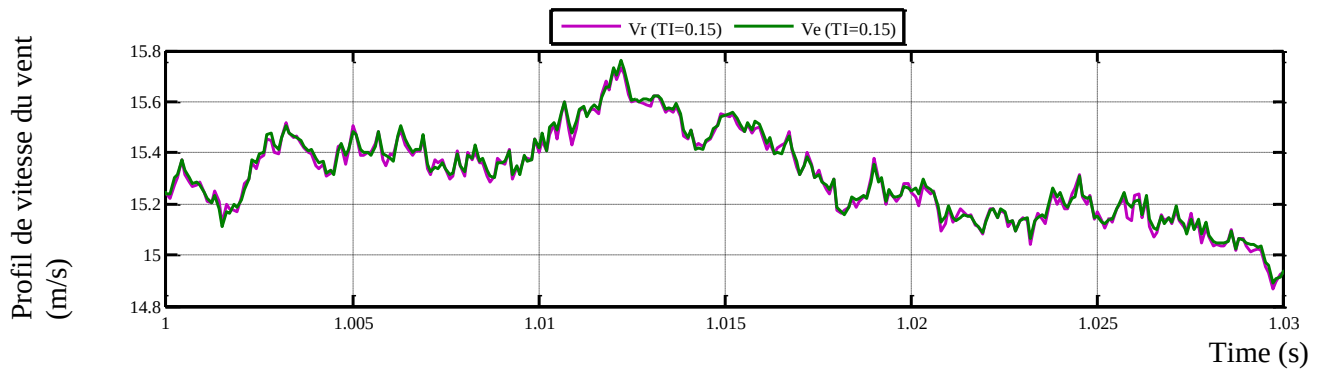


Figure III.7.b. Zoom de l'estimation de la vitesse du vent basée sur le KF linéaire à $V = 14 \text{ m/s}$ and $TI = 0.15$

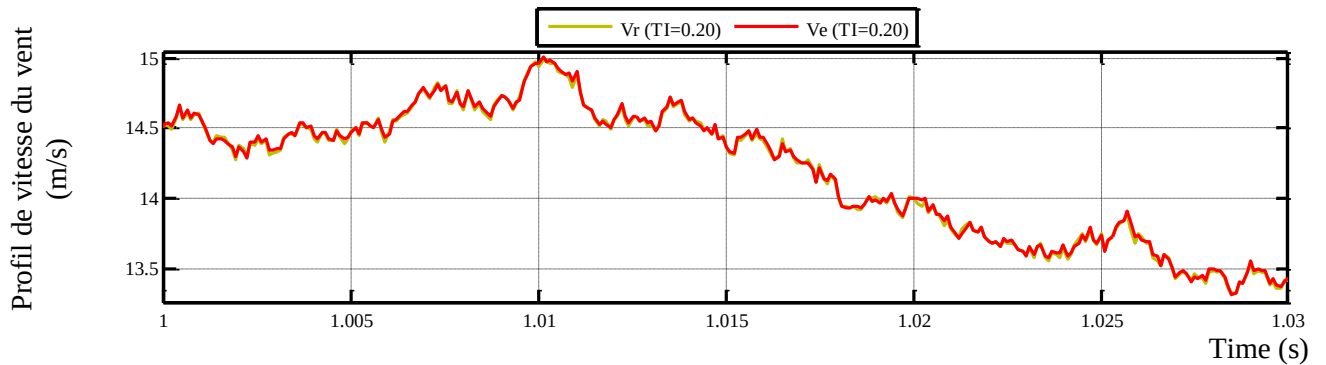


Figure III.8.c. Zoom de l'estimation de la vitesse du vent basée sur le KF linéaire à $V = 14 \text{ m/s}$ et $TI = 0.20$

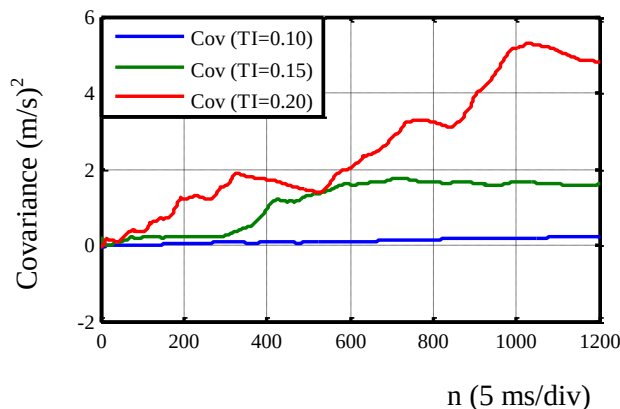


Figure III.9. Mesure de la Covariance pour chaque intervalle de 5 ms à $V = 12 \text{ m/s}$ dans le système éolien basé sur le KF

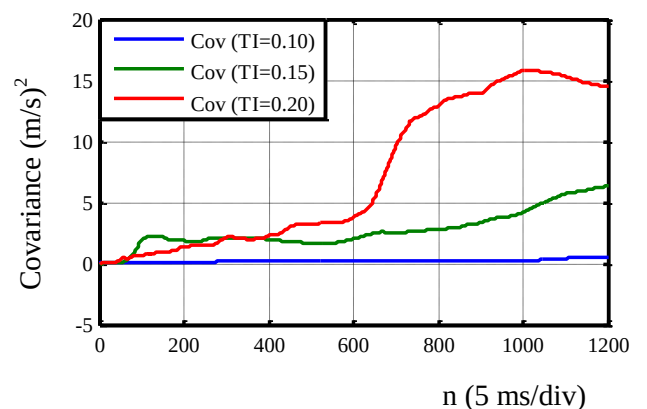


Figure III.10. Mesure de la Covariance pour chaque intervalle de 5 ms à $V = 14 \text{ m/s}$ dans le système éolien basé sur le KF

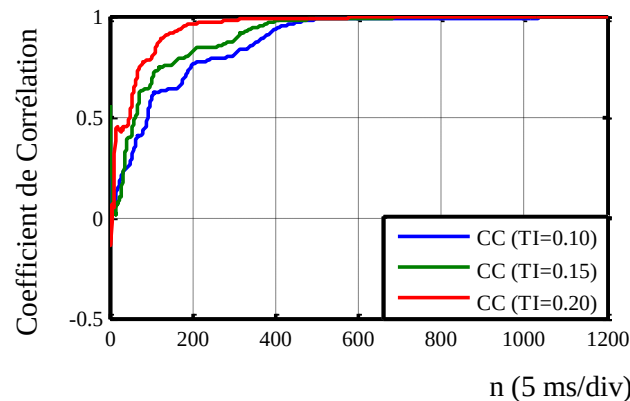


Figure III.11. Mesure du Coefficient de Corrélation pour chaque intervalle de 5 ms à $V = 12 \text{ m/s}$ dans le système éolien basé sur le KF

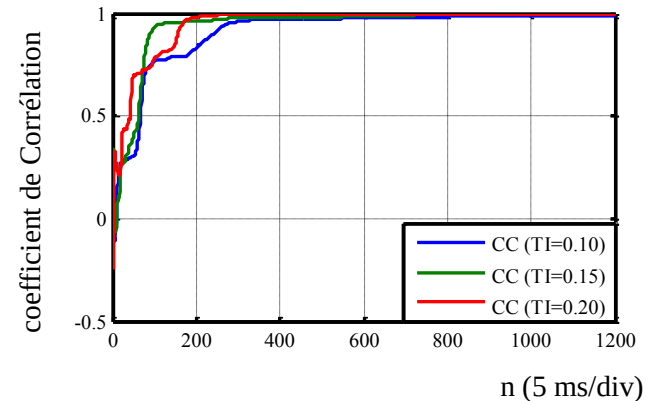


Figure III.12. Mesure du Coefficient de Corrélation pour chaque intervalle de 5 ms à $V = 14 \text{ m/s}$ dans le système éolien basé sur le KF

III.4 Conclusion

Le filtre de Kalman ajuste automatiquement son comportement en fonction des erreurs de modélisation et des fluctuations dans les données de mesure. Ce processus implique une adaptation dynamique des pondérations attribuées au modèle et aux mesures. En conséquence, cela conduit à une estimation de la vitesse plus précise et plus fiable que celle obtenue en se basant uniquement sur le modèle physique ou sur les données de mesure bruitées.

Le filtre de Kalman fonctionne en deux étapes principales : la prédiction et la mise à jour. Pendant la phase de prédiction, le filtre utilise le modèle physique pour estimer l'état futur du système. Dans la phase de mise à jour, cette estimation est ajustée en fonction des nouvelles mesures disponibles. L'ajustement dynamique des pondérations permet de gérer les incertitudes et les erreurs en temps réel, optimisant ainsi la combinaison des informations issues du modèle et des mesures.

Ainsi, le filtre de Kalman minimise l'impact des incertitudes et des erreurs, offrant une solution robuste pour l'estimation de la vitesse et d'autres paramètres dynamiques dans divers systèmes.

Contrôle du système éolien pour maximiser l'extraction de la puissance du vent

IV.1.	Introduction	41
IV.2.	Contrôle direct en vitesse par contrôleur Proportionnel-Intégral	41
IV.2.1.	Synthèse des correcteurs PI.....	42
IV.2.1.1.	Synthèse des correcteurs de la pulsation rotorique.....	43
IV.3.	Contrôle de la vitesse par la logique floue	44
IV.3.1.	Généralité sur la logique floue	44
IV.3.2.	Les opérations des ensembles flous.....	44
IV.3.3.	Notions ensemble flou.....	44
IV.3.4.	Les propositions floues et les variables linguistiques.....	45
IV.3.4.1.	Implication floue (règle Si /Alors):	46
IV.3.4.2.	Système d'inférence floue.....	46
IV.3.4.3.	Fuzzification (quantification floue)	47
IV.3.4.4.	Inférence floue.....	47
IV.3.4.5.	Défuzzification ou concrétisation.....	49
IV.3.4.6.	Commande floue	50
IV.3.5.	Commande floue de la vitesse de la génératrice.....	51
IV.3.5.1.	Etape de fuzzification	51
IV.3.5.2.	Etape des règles linguistiques.....	52
IV.3.5.3.	Défuzzification	53
IV.4.	Contrôle de la turbine éolienne.....	53
IV.5.	Résultats du contrôle de la vitesse.....	54
IV.5.1.1.	Comparisons de performances	55
IV.6.	Conclusion.....	59

IV.1. Introduction

Dans un contexte mondial où la transition énergétique vers des sources renouvelables devient impérative, l'énergie éolienne se positionne comme une solution clé pour réduire notre dépendance aux combustibles fossiles et diminuer les émissions de gaz à effet de serre. Pour exploiter pleinement le potentiel de l'énergie éolienne, il est essentiel de maximiser l'extraction de la puissance du vent par les éoliennes. Ce chapitre, intitulé "Contrôle du Système Éolien pour Maximiser l'Extraction de la Puissance du Vent", se concentre sur les stratégies et techniques de contrôle avancées qui permettent d'optimiser le rendement des éoliennes.

Le contrôle des systèmes éoliens repose sur une compréhension approfondie des interactions complexes entre le vent, les pales de la turbine, et le générateur. La performance d'une éolienne est influencée par de nombreux facteurs, tels que les variations de la vitesse du vent, les conditions atmosphériques, la configuration des pales, et les caractéristiques mécaniques et électriques de la turbine. Par conséquent, une stratégie de contrôle efficace doit être capable de s'adapter dynamiquement à ces conditions changeantes pour maximiser la captation de l'énergie éolienne.

Ce chapitre commence par une présentation des principes fondamentaux de l'aérodynamique des éoliennes, mettant en évidence les forces de portance et de traînée qui agissent sur les pales et génèrent le couple nécessaire pour faire tourner le rotor. Nous aborderons ensuite le concept du coefficient de puissance, un paramètre crucial qui mesure l'efficacité avec laquelle une éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

La partie centrale du chapitre est dédiée aux techniques de contrôle avancées utilisées pour maximiser l'extraction de la puissance du vent. Nous explorerons divers contrôleurs, telles que le contrôle de la vitesse de rotation (torque control) à base du régulateur PI et logique floue. Chacun de ces régulateurs sera analysé en détail, en discutant leurs avantages, leurs limitations et les conditions dans lesquelles elles sont les plus efficaces.

En somme, ce chapitre offre une vue d'ensemble complète des stratégies de contrôle visant à maximiser l'extraction de la puissance du vent, en fournissant les bases théoriques nécessaires et en présentant les dernières avancées dans ce domaine essentiel pour le développement durable et la transition énergétique.

IV.2. Contrôle direct en vitesse par contrôleur Proportionnel-Intégral

Dans la configuration en mode conventionnel, la vitesse de la génératrice doit être asservie par un contrôleur Proportionnel-Intégral (PI). Afin de suivre la vitesse de référence de la génératrice, la servocommande de vitesse utilisant le couple électromagnétique de référence T_{em}^* est utilisée :

$$T_{em}^* = (\omega_g^* - \omega_g) \cdot \left[K_{p,\omega_g} + \frac{K_{i,\omega_g}}{s} \right] \quad (IV.1)$$

IV.2.1. Synthèse des correcteurs PI

Le correcteur Proportionnelle Intégrale (PI) a été utilisé pour le corriger la réponse de la vitesse dans la boucle fermée. Il est simple et rapide à mettre en œuvre tout en offrant des performances acceptables. L'action proportionnelle sert à régler la rapidité de la dynamique du système, alors que l'action intégrale permet d'éliminer l'écart entre la grandeur de consigne et celle que l'on désire asservir.

Sa fonction de transfert est:

$$G(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (IV.2)$$

La fonction de transfert en boucle ouverte $F(s)$ de la vitesse est donnée par :

$$F(s) = \frac{A_r}{1 + T_r \cdot s} \quad (IV.3)$$

$$\begin{cases} A_r = \frac{1}{f_r} \\ T_r = \frac{J_r}{f_r} \end{cases} \quad (IV.4)$$

La fonction transfert en boucle fermée (FTBF) avec le correcteur s'écrit de la manière suivante :

$$FTBF = \frac{\frac{A_r}{T_r} (K_p \cdot p + K_i)}{p^2 + p \left(\frac{1 + A_r \cdot K_p}{T_r} + \frac{A_r \cdot K_i}{T_r} \right)} \quad (IV.5)$$

Le dimensionnement du correcteur est fait à l'aide du principe d'imposition des pôles. Comme le polynôme caractéristique de l'équation (IV.5) est du deuxième ordre, nous imposons deux pôles à partie réelle négative. Pour avoir plus de souplesse dans le choix des dynamiques de régulation, nous utilisons la fonction de transferts correspondants à la forme suivante :

$$D(s) = p^2 + 2 \cdot \xi \cdot \omega_0 \cdot p + \omega_0^2 \quad (IV.6)$$

Ainsi, nous obtenons les paramètres du correcteur, en fonction de l'amortissement ξ et la pulsation propre ω_0 .

$$\begin{cases} K_p = \frac{(2.T_r.\xi.\omega_0 - 1)}{A_r} \\ K_i = \frac{T_r.\omega_0^2}{A_r} \end{cases} \quad (IV.7)$$

IV.2.1.1. Synthèse des correcteurs de la pulsation rotorique

La boucle détaillée de régulation de la pulsation ω_r peut être représentée de la manière suivante:

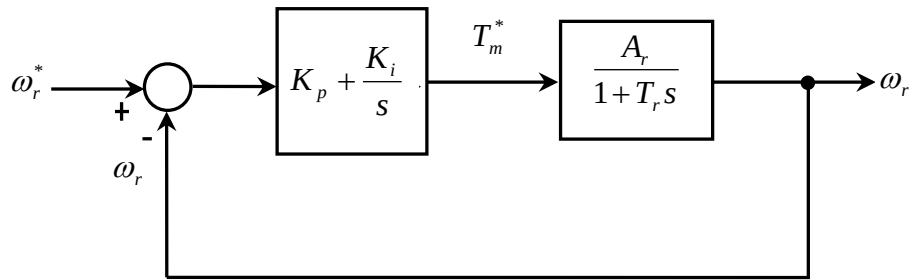


Figure IV.1 Système à régulé de la vitesse ω par un correcteur *PI*.

D'après le raisonnement de l'équation (IV.7), les paramètres des correcteurs de la pulsation rotorique s'écrivent :

$$\begin{cases} K_{p,\omega} = \frac{2.T_r.\xi_\omega.\omega_{0,\omega} - 1}{A_r} \\ K_{i,\omega} = \frac{T_r.\omega_{0,\omega}^2}{A_r} \end{cases} \quad (IV .8)$$

Par imposition des pôles en boucle fermée, nous obtenons les paramètres du correcteur PI :

	$\omega_{0,\omega}$	ξ_ω	$K_{p,\omega}$	$K_{i,\omega}$
Correcteur PI	100	0.7	0.40	8.2275

IV.3. Contrôle de la vitesse par la logique floue

IV.3.1. Généralité sur la logique floue

La théorie des ensembles flous a également donné naissance à un traitement original de l'incertitude, fondée sur l'idée d'ordre, et qui permet de formaliser le traitement de l'ignorance, et permet de formaliser les systèmes d'informations avancés. Les ensembles flous ont également un impact sur les techniques de classification automatique, et ont contribué à un certain renouvellement des approches existantes de l'aide à la décision.

IV.3.2. Les opérations des ensembles flous

La logique floue a été formulée par Lotfi A. Zadeh dans le milieu des années soixante. Elle constitue une généralisation de la logique booléenne classique, et ajoute cependant une fonctionnalité déterminante : la possibilité de calculer un paramètre en disant simplement dans quelle mesure il doit se trouver dans un intervalle de valeurs.

IV.3.3. Notions ensemble flou

On considère que X est un ensemble non nul. Un ensemble flou A dans X est caractérisé par son fonction d'appartenance. $\mu_A(x)$ est interprété comme le degré d'appartenance d'élément x dans l'ensemble flou A car chaque.

On peut donc dire qu'un élément peut appartenir à un ensemble flou (figure IV.2) de manière graduelle, ce qui rompt avec le tout ou rien de la théorie ensembliste classique.

À l'inverse de la logique booléenne, la logique floue permet à une condition d'être en un autre état que vrai ou faux. Il y a des degrés dans la vérification d'une condition.

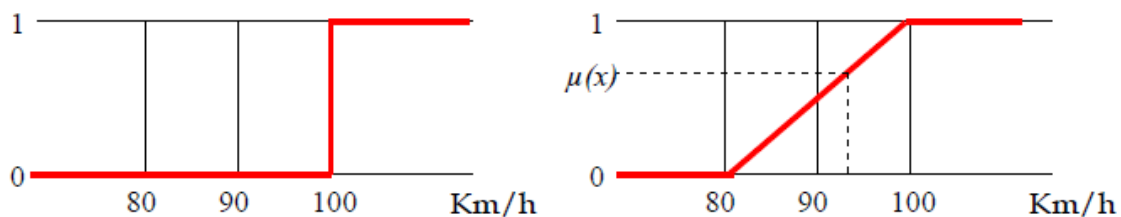


Figure IV.2 Ensemble flou

Comme dans la théorie des ensembles classiques, on définit l'intersection, l'union des ensembles flous ainsi que le complémentaire d'un ensemble flou. Ces relations sont « et », « ou », « non ». De nouvelles fonctions d'appartenance liées à ces opérateurs sont établies :

- ❖ *Et* : opérateur de conjonction : les plus employés sont le « minimum » et le « produit ». x appartient à A et B $\Leftrightarrow x \in A \cap B \Leftrightarrow \mu_{A \cap B}(x)$. L'opérateur « et » se définit par une norme triangulaire (t-norme) :

$$T : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] (x, y) \mapsto z = xTy \quad (IV.9)$$

- ❖ *ou* : opérateur de disjonction, les plus employés sont le « maximum » et la « Somme ».

x Appartient à A ou B $\Leftrightarrow x \in A \cup B \Leftrightarrow \mu_{A \cup B}(x)$. L'opérateur « ou » se définit par une Co-norme triangulaire (T*) qu'on appelle aussi S-norme(S):

$$S : [0,1] \times [0,1] \rightarrow [0,1] (x, y) \mapsto z = xTy \quad (IV.10)$$

- ❖ *Non* : opérateur qui désigne le complémentaire d'un ensemble flou: x appartient au complément de :

$$A \Leftrightarrow x \in \bar{A} \Leftrightarrow \mu_{\bar{A}}(x) \quad (IV.11)$$

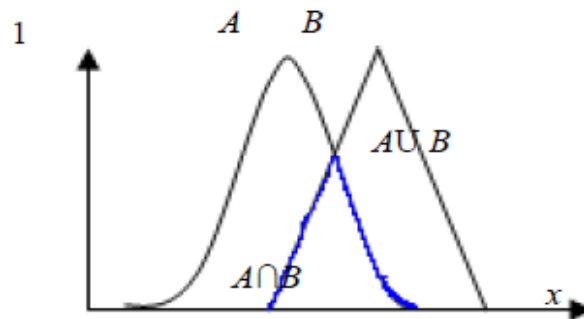


Figure IV.3 Intersection et union de deux ensembles flous

IV.3.4. Les propositions floues et les variables linguistiques

L'association de sous-ensembles flous à des termes linguistique définis sur un univers de discours quelconque, autorise la représentation d'information plus au moins spécifique et précise.

Une variable linguistique peut être définie comme l'association d'une variable Classique et de plusieurs sous-ensembles flous caractérisant les valeurs possibles de celle-ci. On appelle une proposition floue élémentaire, une proposition du type X est A , où:

X Est une variable linguistique et A un sous ensemble flou.

Une telle proposition possède un degré de vérité $\mu_A(X)$, compris entre 0 et 1

IV.3.4.1. Implication floue (règle Si /Alors):

L'opérateur d'implication permet d'introduire la notion de règle floue qui caractérise les relations de dépendance entre plusieurs propositions floues quelconques : X_1 est A_1 et X_2 est A_2 implique Y et B . Cette règle peut également être exprimée sous forme plus classique :

Si(X_1 est A_1) et (X_2 est A_2) alors (Y est B).

Le tableau III.1 regroupe les types d'implications les plus utilisées

N°	Nom	Implication
01	Kleene-dienes (binaire)	$\max \{1-a, b\}$
02	Lukasiewicz	$\min \{1, 1-a-b\}$
03	Reichenbach	$1-a+b*b$
04	Fodor	$\begin{cases} 1 & \text{si } a \leq b \\ \max \{1-a, b\} & \text{si } a > b \end{cases}$
05	Yager	$\begin{cases} 1 & \text{si } a = 0 \\ b^a & \text{si } a > 0 \end{cases}$
06	Zadeh	$\max \{ \min \{a, b, 1-a\} \}$
07	Dubois-Prade	$\begin{cases} 1-a & \text{si } b = 0 \\ b & \text{si } a = 1 \\ 1 & \text{si non} \end{cases}$

Tableau .IV1. Implication floues.

IV.3.4.2. Système d'inférence floue

La notion de règle floue permet de définir un système expert flou comme une extension d'un système expert classique, manipulant la proposition floue. Donc un système d'inférence floue (SIF) est formé de trois blocs comme l'indique la figure 4. Le premier, bloc fuzzification transforme les valeurs numériques en degrés d'appartenance aux différents ensembles flous de la partition. Le second bloc est le moteur d'inférence, constitué de l'ensemble de règles. Enfin, le bloc de défuzzification permet, si nécessaire, d'inférer une valeur nette, à partir du résultat de l'agrégation des règles.

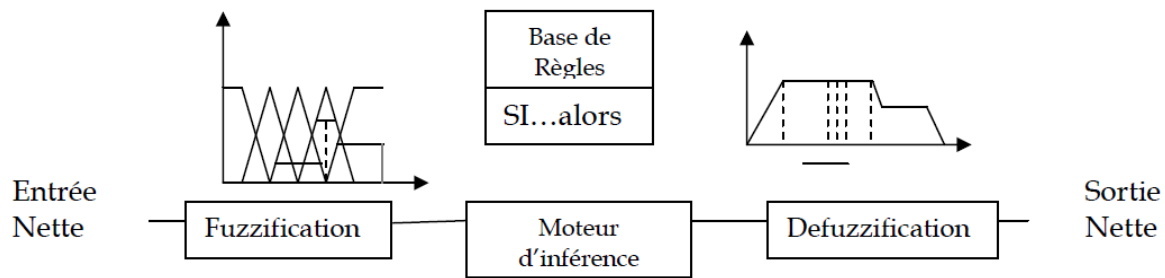


Figure IV.4 Système d'inférence floue

IV.3.4.3. Fuzzyfication (quantification floue)

Elle consiste à associer à chaque valeur d'entrée un ou plusieurs sous-ensembles flous ainsi que les degrés d'appartenance associés. Cette étape réalise la transformation de valeurs numériques en informations symboliques floues.

Le choix du nombre d'ensembles flous, de la forme des fonctions d'appartenance, du recouvrement de ces fonctions et de leur répartition sur l'univers de discours n'est pas évident. Il y a cependant des facteurs qui sont plus importants que d'autres.

- **Comment fuzzifier?**

Pour fuzzifier, il faut donner:

1. L'univers du discours, i.e. : Plage de variations possibles de l'entrée considérée.
2. Une partition en classe floue de cet univers.
3. Les fonctions d'appartenances de chacune de ces classes.

IV.3.4.4. Inférence floue

La phase d'inférence consiste à calculer le degré de vérité des différentes règles du système, en utilisant les formules données dans la phase de fuzzification, et à associer à chaque règle une valeur de sortie. Cette valeur de sortie dépend de la partie conclusion des règles qui peut prendre plusieurs formes. Donc on peut dire que l'inférence floue est l'opération d'agrégation des règles floues.

Il peut s'agir d'une proposition floue, et l'on parlera dans ce cas de règle de *type mamdani* :

SI Alors Y est B.

Il peut également s'agir d'une fonction réelle des entrées, et l'on parlera dans ce cas de règle de *type sugeno* : *SI* Alors Y est $f(x_1, x_2, \dots, x_n)$ où $x_1, \dots, x_n$ sont des valeurs réelles des variables d'entrée.

Une règle est une combinaison de variables d'entrées, combinaison qui utilise les opérateurs flous, tel que le "ET" et le "OU" (min et max).

Ainsi, pour toutes les combinaisons possibles des entrées, nous allons définir une règle. Cette règle nous indique à quel sous-ensemble de sortie, le coefficient de modification va être attribué.

Les règles d'inférences peuvent être décrites de plusieurs façons

- linguistiquement : on écrit les règles d'une façon explicite.
- symboliquement : il s'agit en fait d'une description linguistique où l'on remplace la Désignation des ensembles flous par des observations.
- Par matrice d'inférence : elle rassemble toutes les règles d'inférence sous forme de tableau à deux dimensions : Les entrées du tableau représentent les ensembles flous des variables d'entrée. L'intersection d'une colonne et d'une ligne donne l'ensemble flou de la variable de sortie définie par la règle. Il y a autant de cases que de règles.

Il existe plusieurs méthodes pour calculer la valeur représentative d'un ensemble de sortie, dont les principales sont : **MIN / MAX**, **MAX / PROD**, **SOM / PROD**.

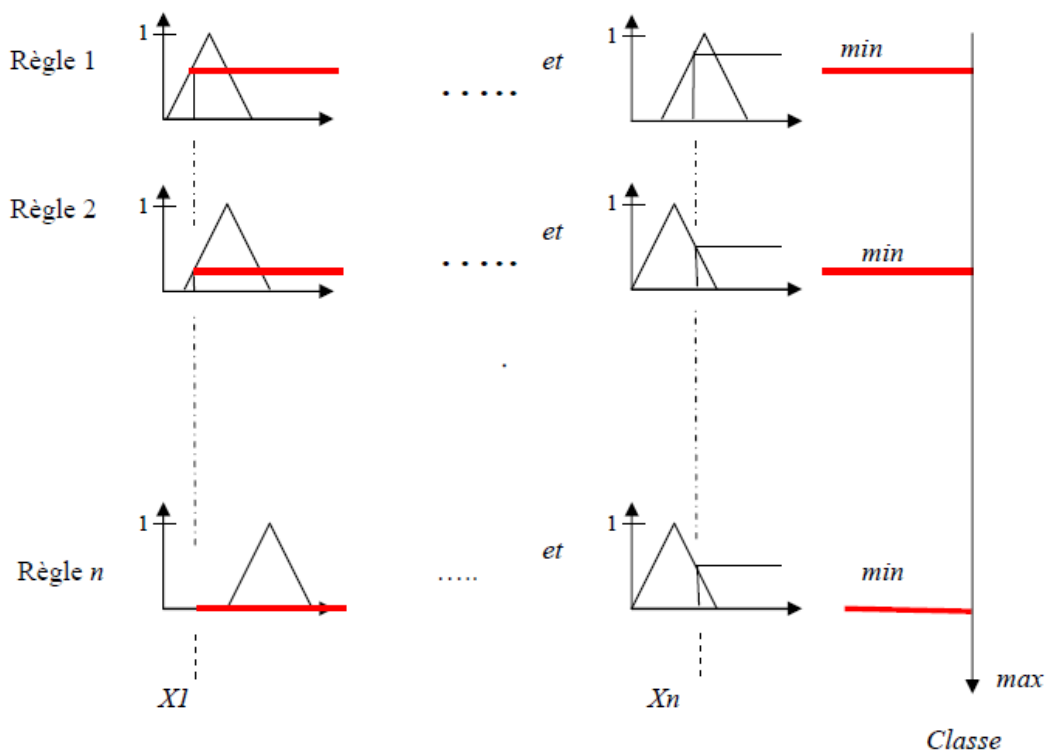


Figure IV.5. Base de règle floue avec une évaluation Min/Max

	MIN/MAX	MAX / PROD	SOM / PROD
ET	Min	Min	Prod
OU	Max	Max	Som
ALORS	Min	Prod	Prod
Combinaison	Max	Max	Som
Combinaison des règles activées (OU)			

Tableau .IV.2. Méthodes d'inférence floues.

IV.3.4.5. Défuzzification ou concrétisation

Le moteur d'inférence fournit une fonction d'appartenance résultante pour la variable de sortie. Il s'agit donc d'une information floue.

Par cette étape se fait le retour aux grandeurs de sortie réelles. Il s'agit de calculer, à partir des degrés d'appartenance à tous les ensembles flous de la variable de sortie, l'abscisse correspondant à la valeur de cette sortie.

Il existe plusieurs méthodes pour calculer la valeur représentative d'un ensemble de sortie, dont les principales sont : Défuzzifications basées sur le centre de gravité des ensembles ; le MIN / MAX ; le SOM / PROD.

➤ Défuzzification par le centre de gravité

La méthode de défuzzification la plus utilisée est celle de la détermination du centre de gravité de la fonction d'appartenance résultante $\mu_{RES}(xR)$. Dans ce contexte il suffit de calculer l'abscisse Z^* . La figure 6 montre le principe de défuzzification.

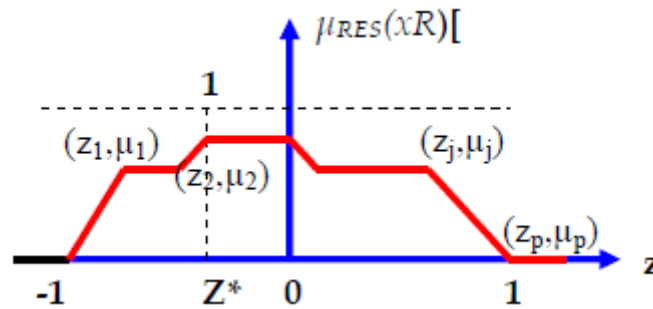


Figure IV.6 Défuzzification par centre de gravité

Lorsque la fonction d'appartenance est composée par morceaux de droites, il est possible de faire les intégrations analytiquement. Avec les coordonnées Z_j , μ_j des points d'intersections des p segments de droites.

L'abscisse du centre de gravité peut être calculée par la relation :

$$Z^* = \frac{\sum_{j=1}^p (z_{j+1} - z_j) [(2z_{j+1} + z_j) \mu_{j+1} + (z_{j+1} + 2z_j) \mu_j]}{3 \sum_{j=1}^p (z_{j+1} - z_j) (\mu_{j+1} + \mu_j)} \quad (IV.12)$$

➤ Calcul du centre de gravité lors de la méthode d'inférence SOM / PROD

Cette méthode est la plus utilisée vu son temps de calcul court. Les coefficients issus du moteur d'inférence sont utilisés pour multiplier les fonctions d'appartenance des sous-ensembles de sortie. La valeur de la sortie correspondra au centre de gravité de tous ces ensembles pris individuellement.

Remarque : La position du centre de gravité de chaque sous-ensemble n'a pas été modifiée par le produit, d'où l'avantage d'un calcul simple du centre de gravité global.

Le calcul du centre de gravité peut être ramené au calcul suivant:

$$X^*_R = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_{ci} X^*_i S_i}{\sum \mu_{ci} S_i} \quad (IV.13)$$

Où :

μ_{ci} : Coefficient de modification à appliquer au sous-ensemble.

S_i : Surface du sous-ensemble i.

X^*_i : Centre de gravité du sous-ensemble de sortie i.

IV.3.4.6. Commande floue

La Commande floue est l'application la plus utilisée de la logique floue. Elle consiste à remplacer les algorithmes de réglage conventionnels par des règles linguistiques. Ainsi, on obtient un algorithme linguistique s'y prête mieux que les méthodes traditionnelles à la commande d'un processus. Le schéma général d'une commande floue est illustré sur la figure IV.7.

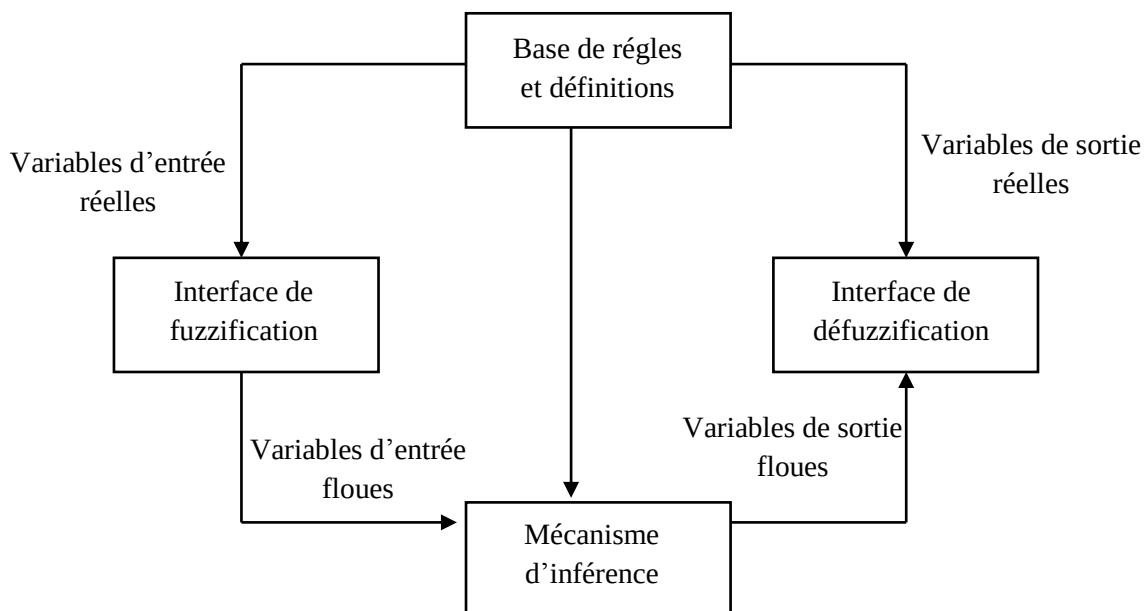


Figure IV.7 Schéma général d'une commande floue

Nous procédons tout d'abord à la partition en sous-ensembles flous des différents univers de discours (ou référentiels) que le système impose. Nous déterminons ensuite la base de règles qui va caractériser le fonctionnement désiré du système. Puis il faut transformer les variables réelles, c'est à dire celles

qui ont une réalité physique, en variables floues. On appelle cette étape la « fuzzification ». Nous utilisons alors ces variables floues dans un mécanisme d'inférence qui crée et détermine les variables floues de sortie en utilisant les opérations sur les fonctions d'appartenance. Enfin, nous opérons à la defuzzification qui consiste à extraire une valeur réelle de sortie à partir de la fonction d'appartenance du sous-ensemble flou de sortie établi par le mécanisme d'inférence.

IV.3.5. Commande floue de la vitesse de la génératrice

Après avoir énoncé des concepts de base et les termes linguistiques utilisés en logique floue, nous présentons la structure d'un contrôleur flou. Dans ce qui suit, nous nous intéressons principalement au régulateur de la position du moteur pas à pas à aimant permanent.

Le contrôleur développé utilise le schéma proposé par Mamdani. Ce schéma est présenté sur la Figure (8), il est composé de :

- Des facteurs de normalisation associent à l'erreur (e), à sa variation (Δe) et à la variation de la vitesse (V).
- D'un bloc de fuzzification de l'erreur et sa variation.
- Des règles de contrôle flou.
- D'un bloc de defuzzification utilisé pour convertir la variation de commande floue en valeur numérique.

Il est important de bien choisir les plages de valeurs. Un bon choix de plages avec une bonne répartition peut garantir une conception réussie. En revanche, un mauvais choix entraîne des longues corrections dans les étapes qui suivent; il faut souvent même redéfinir les plages des valeurs afin d'éviter l'échec dans la conception. Un bon choix demande de l'expérience et de la connaissance du système à commander.

IV.3.5.1. Etape de fuzzification

Les variables et les valeurs linguistiques sont définies comme suit :

- **2 entrées** : Erreur (e), Dérivée de la sortie ($\frac{dN}{dt}$)
 - a. Erreur (e) $\in$ {Négative Grande (NL), Négative Moyenne (NM), Négative (NS), Environ Zéro (ZC), Positive (PS), Positive Moyenne (PM), Positive Grande (PL)}
 - b. Dérivée de la sortie ($\frac{de}{dt}$) $\in$ {Négative Grande (NL), Négative Moyenne (NM), Négative (NS), Environ Zéro (ZC), Positive (PS), Positive Moyenne (PM), Positive Grande (PL)}
- **1 sortie** : Couple (T_m)
 - a. Couple (T_m) $\in$ { Négative Grande (NL), Négative Moyenne (NM), Négative (NS), Environ Zéro (ZC), Positive (PS), Positive Moyenne (PM), Positive Grande (PL)}

Les fonctions d'appartenance pour les variables d'entrées et de sortie sont définies comme suit :

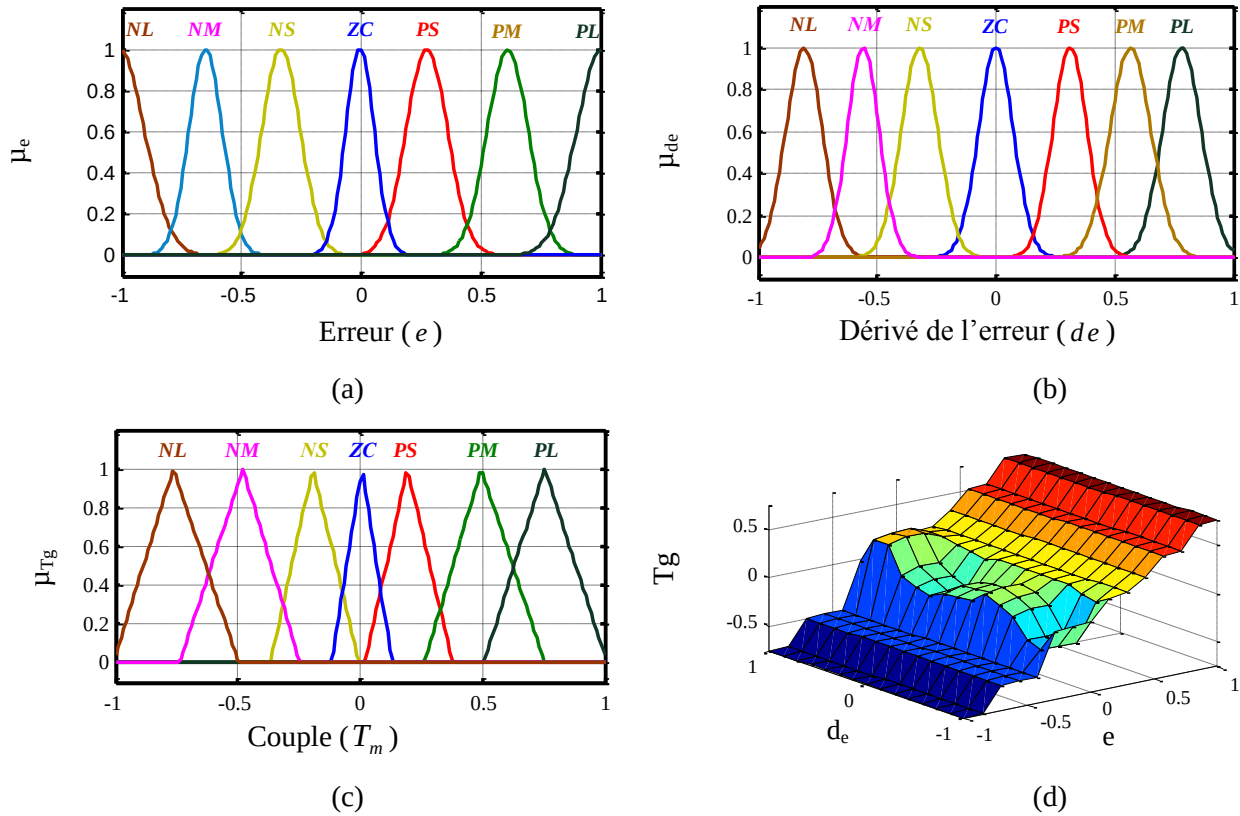


Figure IV.8 Variables linguistiques de la commande floue de la vitesse; (a): Membership de l'erreur ; (b): Membership de la dérivé de l'erreur;(c): Membership du couple; (d): Surface de génération

IV.3.5.2. Etape des règles linguistiques

A partir de l'étude du comportement du système en boucle fermée de la vitesse rotorique basée sur les expériences, nous pouvons établir les règles de commande, qui relient la sortie avec les entrées. Comme nous l'avons constaté, il y a onze règles linguistiques, Les règles sont définies comme suit :

e							
de	NL	NM	NS	ZC	PS	PM	PL
NL	NL	NL	NM	NM	PM	PL	PL
NM	NL	NM	NS	NS	PS	PM	PL
NS	NL	NS	NS	NS	PS	PS	PL
ZC	NL	NS	NS	ZC	PS	PS	PL
PS	NL	NS	NS	NS	PS	PS	PL
PM	NL	NM	NS	NS	PS	PM	PL
PL	NL	NL	NM	NM	PL	PL	PL

Tableau IV.3. Les règles linguistiques

IV.3.5.3. Défuzzification

Lorsque la sortie floue est calculée, il faut la transformer en une valeur numérique. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette transformation. La plus utilisée est la méthode du centre de gravité, qu'on a adoptée dans notre travail.

L'abscisse du centre de gravité correspondant à la sortie du régulateur est donnée par la relation suivante :

$$\bar{x} = \frac{\int_{-1}^{+1} x \mu_B(x) dx}{\int_{-1}^{+1} \mu_B(x) dx} \quad (IV.14)$$

IV.4. Contrôle de la turbine éolienne

Le contrôle de l'éolienne pour maximiser l'extraction de la puissance du vent peut être efficacement réalisé en utilisant la méthode de contrôle de la vitesse de rotation (Tip Speed Ratio, TSR) combinée avec des régulateurs proportionnels intégraux (PI) et la logique floue adaptative. La méthode TSR vise à maintenir un rapport optimal entre la vitesse de rotation des pales de l'éolienne et la vitesse du vent, maximisant ainsi le coefficient de puissance de l'éolienne.

Les régulateurs PI sont largement utilisés dans le contrôle des systèmes éoliens en raison de leur simplicité et de leur efficacité. Ils fonctionnent en ajustant le signal de commande en fonction de l'erreur actuelle (proportionnelle) et de l'accumulation des erreurs passées (intégrale), permettant une réponse rapide et stable aux variations de la vitesse du vent. Cependant, les régulateurs PI classiques peuvent avoir des limitations en présence de non-linéarités, d'incertitudes, ou de perturbations dans le système.

Pour surmonter ces limitations, la logique floue adaptative peut être intégrée aux régulateurs PI. La logique floue utilise des règles basées sur des connaissances expertes pour gérer l'incertitude et les non-linéarités dans le système de contrôle. En adaptant dynamiquement les paramètres des régulateurs PI en fonction des conditions de fonctionnement en temps réel, la logique floue améliore la robustesse et la performance du contrôle.

Dans ce cadre, le contrôle basé sur la méthode TSR avec régulateurs PI et logique floue adaptative fonctionne comme suit : le régulateur PI ajuste la vitesse de rotation de l'éolienne pour maintenir le TSR optimal, tandis que la logique floue adaptative modifie les gains proportionnels et intégraux du régulateur PI en fonction des variations du vent et des conditions de fonctionnement. Cela permet d'obtenir une réponse plus rapide et plus précise, en minimisant les fluctuations de puissance et en maximisant l'extraction de l'énergie éolienne.

L'approche hybride PI et logique floue adaptative offre une solution avancée pour le contrôle des éoliennes, combinant la simplicité des régulateurs PI avec la flexibilité et la robustesse de la logique floue. Cette méthode améliore non seulement l'efficacité énergétique, mais aussi la stabilité et la fiabilité des éoliennes dans des environnements changeants et incertains, contribuant ainsi à une exploitation plus efficace et durable des ressources éoliennes.

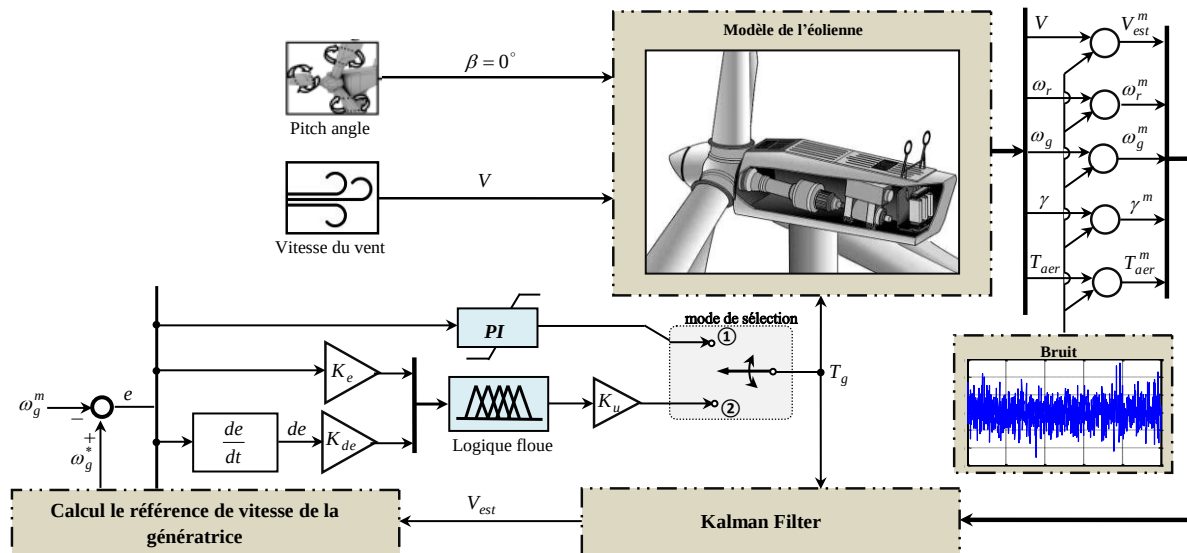


Figure IV.9 Contrôle de l'éolienne en utilisant la méthode TSR basée sur les régulateurs proportionnels intégraux (PI) et la logique floue adaptative

IV.5. Résultats du contrôle de la vitesse

Les Figures IV.11 à IV.14 présentent les résultats obtenus pour les cas de simulation définis dans le chapitre précédent. Pour clarifier les résultats obtenus, le zoom est appliqué entre 2s et 4s pour chaque courbe obtenue dans cette partie. Dans cette simulation, la performance du système de contrôle de l'éolienne pendant le fonctionnement à charge partielle et sous différentes caractéristiques de vitesse du vent RISØ est illustrée. En fait, ces performances sont liées à la rapidité et à l'efficacité des régulateurs TSR proposés pour extraire la puissance maximale du vent. En effet, la méthode TSR basée sur la logique floue adaptative et les régulateurs PI consiste à maintenir la vitesse du générateur à sa référence. Les Figures IV.11a à IV.14a illustrent les résultats obtenus pour la vitesse du générateur. Il est clair que la vitesse du générateur tend à suivre la référence de vitesse du générateur pour les deux régulateurs TSR. Ainsi, le suivi optimal de la vitesse du générateur est atteint. Cependant, le régulateur TSR basé sur le contrôleur flou présente des performances élevées par rapport à l'autre. Ce résultat peut être justifié par les raisons suivantes :

- Le dépassement causé par le régulateur PI est éliminé par le régulateur flou adaptatif
- La réponse du régulateur flou est plus rapide que celle du régulateur PI en réduisant le temps de réponse dans la stabilité à l'état transitoire .

- Le régulateur flou est plus précis et plus précis que l'autre régulateur en diminuant l'erreur entre la vitesse du générateur et sa référence, comme le montre le zoom des Figures IV.11a à IV.14a.

L'efficacité de chaque régulateur TSR proposé dans les boucles fermées de la vitesse du générateur affectera les performances du système éolien, telles que la puissance aérodynamique capturée. Les Figures IV.11b à IV.14b illustrent les résultats obtenus pour la puissance aérodynamique extraite du profil de vent RISØ à des vitesses moyennes du vent de 10ms/s et 12ms/s et avec des intensités de turbulence de 10% et 15%. Les résultats démontrent que la puissance aérodynamique capturée P_{aer} est proche de la puissance aérodynamique optimale $P_{aer,opt}$ pour les deux régulateurs. Ainsi, la puissance aérodynamique optimale a été suivie avec succès par les régulateurs proposés. Il est clair que le régulateur TSR basé sur le contrôleur logique floue a amélioré la capture de la puissance aérodynamique obtenue à partir du régulateur PI en éliminant le dépassement, en réduisant le temps de réponse dans la stabilité à l'état transitoire et en atteignant un suivi précis de la puissance aérodynamique optimale. La puissance aérodynamique capturée à partir de la puissance totale disponible dans le vent peut être clarifiée par l'analyse du coefficient de puissance et du rapport de vitesse de pointe. Les Figures IV.11c, d à IV.14c, d montrent les résultats obtenus pour le coefficient de puissance et le rapport de vitesse de pointe sous différentes caractéristiques de vitesse du vent RISØ, respectivement. Les résultats montrent que la valeur maximale du coefficient de puissance et la valeur optimale du TSR sont maintenues sous différentes vitesses moyennes du vent et intensités de turbulence. Il est clair que la fluctuation et le dépassement causés par le régulateur PI sont améliorés par le régulateur flou, comme le montre le zoom des Figures IV.11c, d à IV.14c, d.

IV.5.1.1. Comparisons de performances

Dans cette étude, la méthode TSR basée sur les régulateurs proportionnels intégraux (PI) et la logique floue adaptative est utilisée pour capturer la puissance maximale disponible dans le vent. La comparaison des performances des régulateurs TSR proposés peut être évaluée en calculant l'efficacité aérodynamique, donnée par l'équation suivante [62]:

$$\eta_{aer}(\%) = \frac{\int_{t_0}^{t_f} P_{aer}(t)dt}{\int_{t_0}^{t_f} P_{aer,opt}(t)dt} \quad (IV.15)$$

La moyenne des critères d'efficacité aérodynamique définis dans l'équation (IV.15) des cas de simulation a donné une note de 98,24% pour le TSR basé sur le contrôleur flou, tandis qu'il a donné une note de 97,56% pour l'autre régulateur. Ainsi, l'efficacité aérodynamique du TSR basé sur le contrôleur flou est légèrement meilleure que celle du régulateur PI.

Selon les résultats obtenus, l'étude comparative entre les deux régulateurs proposés peut être résumée comme suit :

- La méthode TSR basée sur les régulateurs PI et flou présente une performance élevée pour capturer la puissance maximale dans la stabilité à l'état stationnaire.
- Le TSR basé sur le régulateur flou est légèrement meilleur que le régulateur PI pour capturer la puissance maximale du vent, avec des efficacités aérodynamiques de 98,24% et 97,56% pour les contrôleurs flou et PI, respectivement.
- Le TSR basé sur le régulateur flou a amélioré les performances du système éolien en éliminant le dépassement et en réduisant le temps de réponse dans la stabilité à l'état transitoire.

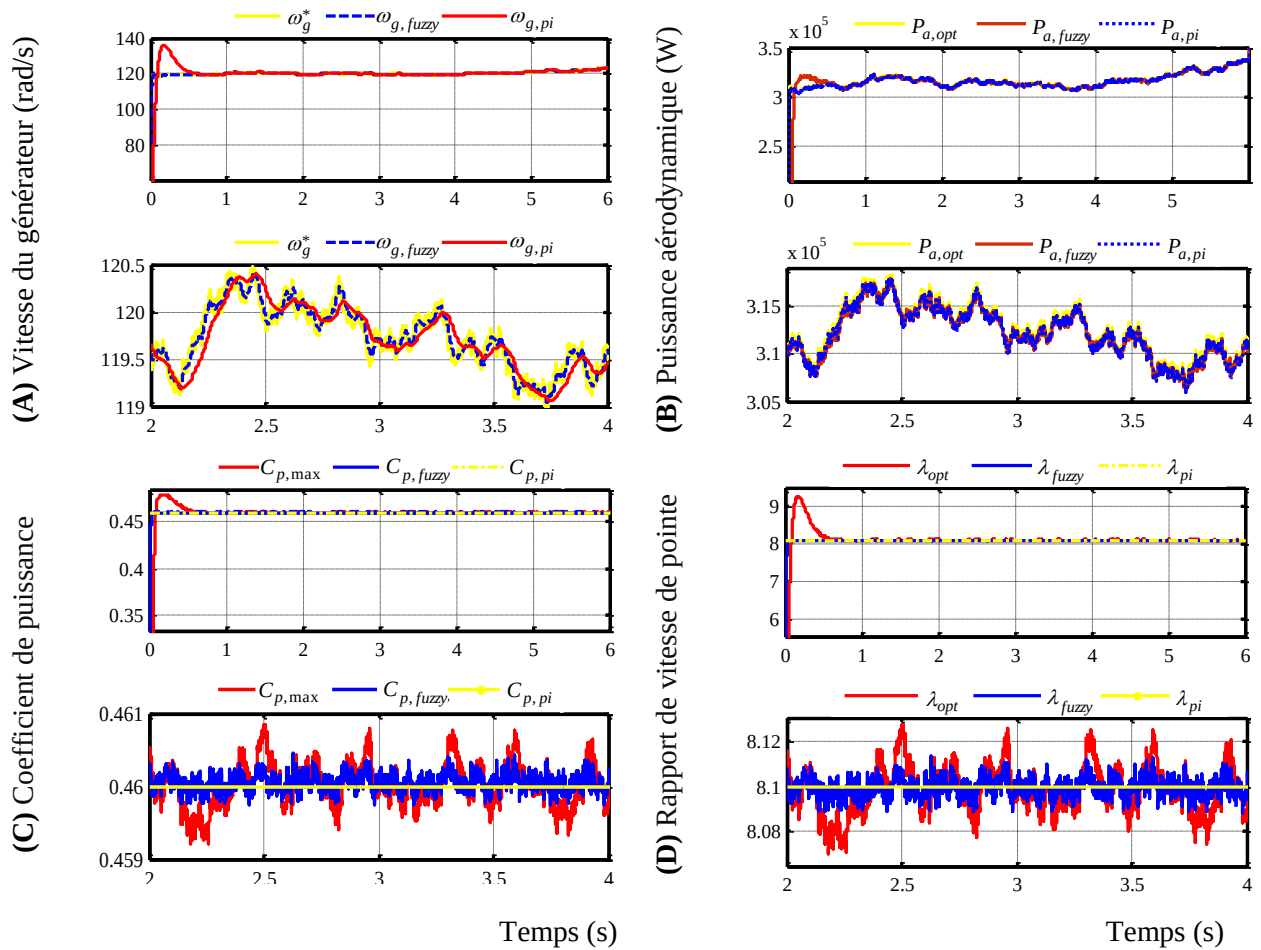


Figure IV.10. Performance de l'éolienne à une vitesse moyenne du vent de 12 m/s avec une intensité de turbulence de 10%

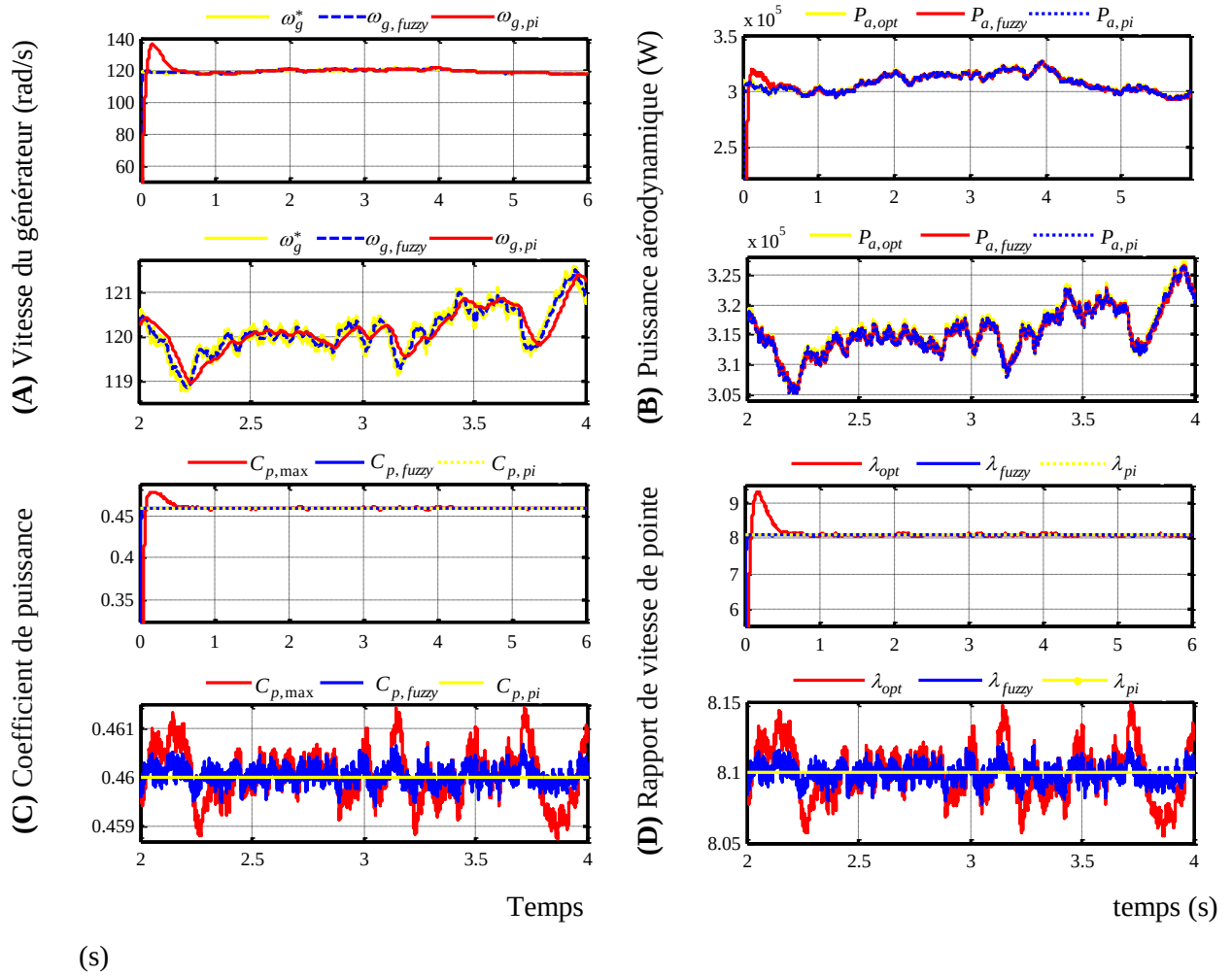
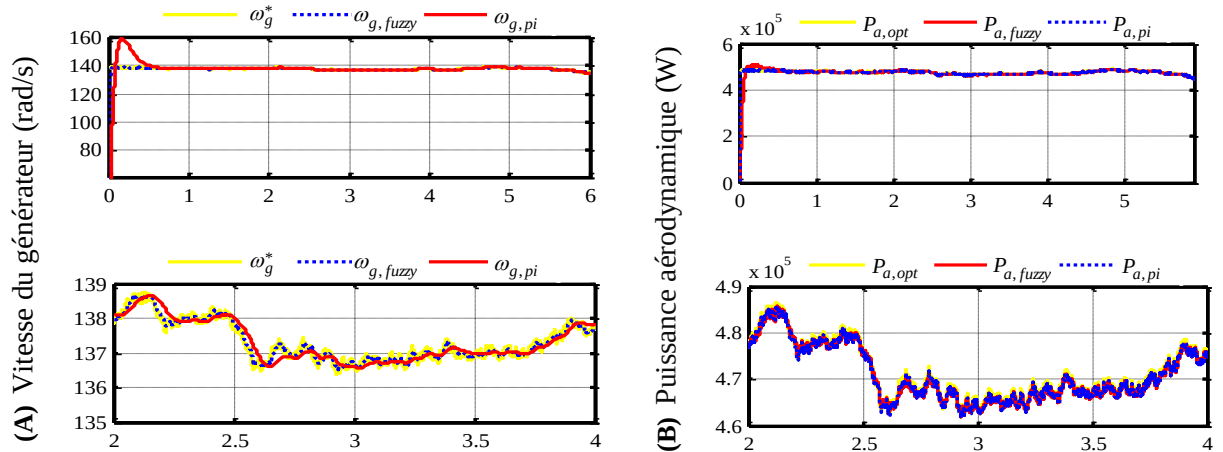


Figure IV.11. Performance de l'éolienne à une vitesse moyenne du vent de 12 m/s avec une intensité de turbulence de 15%



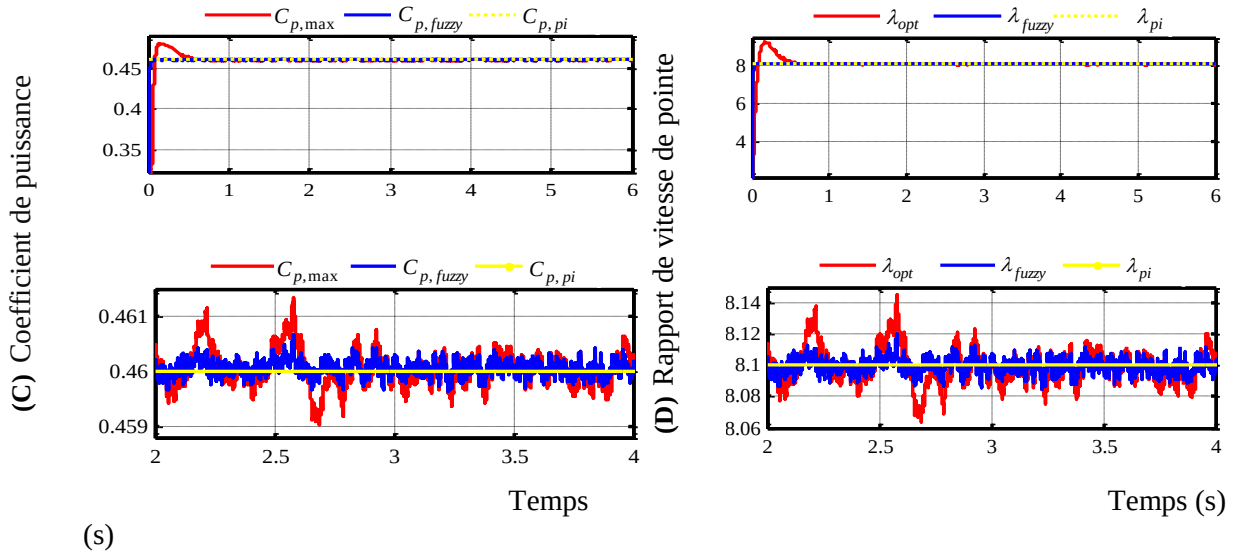


Figure IV.12. Performance de l'éolienne à une vitesse moyenne du vent de 14 m/s avec une intensité de turbulence de 10%

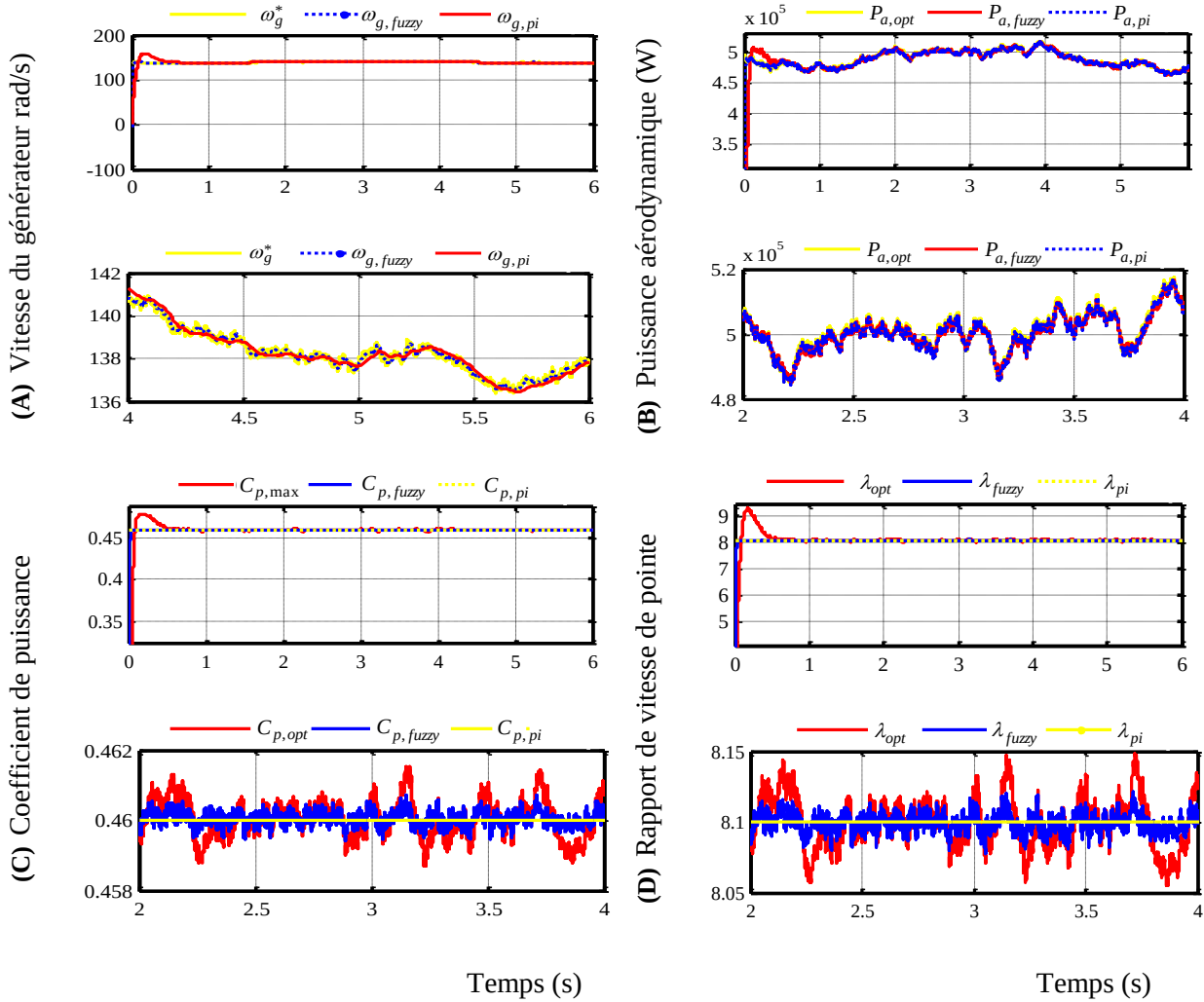


Figure IV.13 Performance de l'éolienne à une vitesse moyenne du vent de 14 m/s avec une intensité de turbulence de 14%

IV.6. Conclusion

La performance du système de turbine éolienne dépend principalement du contrôle de la turbine éolienne, qui nécessite une mesure précise de la vitesse du vent. Ces mesures peuvent être acquises par des capteurs ou estimées par des estimateurs. En fait, la mesure par des capteurs n'est pas précise et imprécise car ses mesures ne sont effectuées qu'en un seul point du rotor de la turbine. Ainsi, les estimateurs peuvent être considérés comme la meilleure solution pour le contrôle de la turbine éolienne. Dans cette étude, le filtre de Kalman étendu (EKF) est utilisé pour estimer la vitesse du vent en tenant compte de l'effet de l'ombre de la tour. L'EKF atteint une haute performance dans l'estimation de la vitesse du vent en obtenant une similarité de 98% entre la vitesse du vent développée par le laboratoire national danois RISØ et la vitesse du vent estimée. La vitesse du vent estimée est utilisée comme entrée dans le modèle de turbine éolienne basé sur un train d'entraînement à deux masses pour effectuer le contrôle de la turbine éolienne dans Matlab/Simulink.

Dans cette mémoire , la méthode TSR basée sur des contrôleurs PI et logiques flous adaptatifs est utilisée pour capturer la puissance maximale disponible dans le vent. La méthode TSR proposée consiste à maintenir la vitesse du générateur à sa référence. En conséquence, l'efficacité des éoliennes est améliorée en générant la puissance maximale sous différentes caractéristiques de vitesse du vent. La moyenne des critères d'efficacité aérodynamique obtenus pour les cas de simulation a donné une notation de 97,56% et 98,24% pour les contrôleurs PI et logiques flous adaptatifs, respectivement. Par conséquent, l'efficacité aérodynamique pour la méthode TSR basée sur le contrôleur logique flou est légèrement meilleure que celle basée sur le contrôleur PI.

Les résultats de comparaison illustrent que le TSR basé sur le contrôleur flou assure un suivi précis de la référence de vitesse du générateur par rapport au TSR basé sur le contrôleur PI. De plus, le contrôleur flou adaptatif améliore les performances du système de turbine éolienne en éliminant le dépassement de la référence causé par le contrôleur PI et en réduisant la réponse temporelle dans l'état transitoire de stabilité. Bien que le contrôleur flou donne de meilleurs résultats que le contrôleur PI, le temps de développement d'un contrôleur flou est assez important que celui des autres contrôleurs car nous avons rencontré des difficultés pour poser des règles floues et des fonctions d'appartenance pour notre système de turbine éolienne.

Réalisation d'un dispositif d'estimation basé sur un filtre de Kalman

V.1.	Introduction	61
V.2.	Objectifs	61
V.3.	Réalisation d'un capteur d'anémomètre	61
V.3.1.	Choix et préparation des composants	62
V.3.2.	Assemblage mécanique	62
V.3.3.	Connexion électronique	63
V.3.3.1.	Structure software.....	63
V.4.	Validation et test.....	67
V.4.1.	Implémentation l'algorithme du filtre de Kalman sur la carte Arduino	67
V.4.2.	Supervision des résultats en temps réel	68
V.4.2.1.	Configuration de l'Interface Utilisateur	68
V.4.2.2.	Acquisition et Traitement des Données.....	69
V.4.2.3.	Affichage et Mise à Jour en Temps Réel.....	69
V.4.2.4.	Analyse et Archivage des Données	69
V.4.3.	Discussion et résultats	70
V.5.	Conclusion.....	71

V.1.Introduction

L'estimation précise des variables d'état est cruciale dans de nombreux systèmes dynamiques, notamment ceux impliquant des processus de mesure et de contrôle en temps réel. L'un des outils mathématiques les plus puissants pour réaliser cette estimation est le filtre de Kalman. Ce filtre permet de combiner les mesures de différents capteurs avec un modèle mathématique du système pour fournir des estimations optimisées des variables d'intérêt, même en présence de bruit et d'incertitudes.

Dans ce chapitre, nous nous concentrerons sur la conception et la mise en œuvre d'un dispositif d'estimation basé sur un filtre de Kalman, en utilisant un anémomètre comme capteur principal et une carte Arduino pour l'acquisition et le traitement des données. Un anémomètre est un instrument utilisé pour mesurer la vitesse du vent, ce qui en fait un capteur idéal pour diverses applications météorologiques et industrielles. L'Arduino, avec sa capacité de traitement embarqué et son environnement de développement convivial, est largement utilisé pour des projets de prototypage et de déploiement de capteurs.

V.2. Objectifs

Les objectifs principaux de ce chapitre sont les suivants :

- Intégration de l'anémomètre : Apprendre à interfacer un anémomètre avec une carte Arduino, en couvrant les aspects de câblage, de lecture des données, et de traitement des signaux.
- Implémentation du filtre de Kalman : Développer et implémenter le filtre de Kalman sur l'Arduino pour améliorer la précision des mesures de vitesse du vent en filtrant le bruit et les fluctuations indésirables.
- Validation et tests : Effectuer des tests expérimentaux pour valider l'efficacité du filtre de Kalman dans l'estimation des mesures fournies par l'anémomètre, en comparant les résultats avec des méthodes de mesure traditionnelles ou des données de référence.

V.3. Réalisation d'un capteur d'anémomètre

La réalisation d'un capteur d'anémomètre basé sur un capteur à effet Hall implique la conception et l'intégration d'un système capable de mesurer avec précision la vitesse du vent. Un capteur à effet Hall détecte les variations de champ magnétique et peut être utilisé pour compter les rotations d'un rotor équipé d'aimants. Voici un aperçu détaillé des étapes nécessaires pour réaliser ce type de capteur.

V.3.1. Choix et préparation des composants

- **Rotor avec Ailettes** : Le cœur du système de mesure est un rotor équipé de plusieurs ailettes. Les ailettes captent le vent, faisant tourner le rotor proportionnellement à la vitesse du vent, , comme l'illustre la figure V.1.
- **Aimants** : De petits aimants sont fixés sur le rotor. Leur nombre dépend de la précision souhaitée ; plus il y a d'aimants, plus la fréquence de rotation mesurée sera élevée, augmentant ainsi la résolution des mesures, comme l'illustre la figure V.1.
- **Capteur à Effet Hall** : Ce capteur est positionné de manière à ce qu'il puisse détecter chaque passage des aimants. Les capteurs à effet Hall sont choisis pour leur précision et leur capacité à fonctionner sans contact, ce qui réduit l'usure mécanique.

V.3.2. Assemblage mécanique

- **Montage du Rotor** : Le rotor avec les ailettes et les aimants est monté sur un axe rotatif. L'axe doit être fixé de manière à tourner librement avec un minimum de friction, souvent à l'aide de roulements à billes.
- **Positionnement du Capteur à Effet Hall** : Le capteur à effet Hall est placé à une distance appropriée de l'axe rotatif, généralement sur une structure fixe, de manière à ce que chaque aimant passe directement devant le capteur lors de la rotation du rotor.

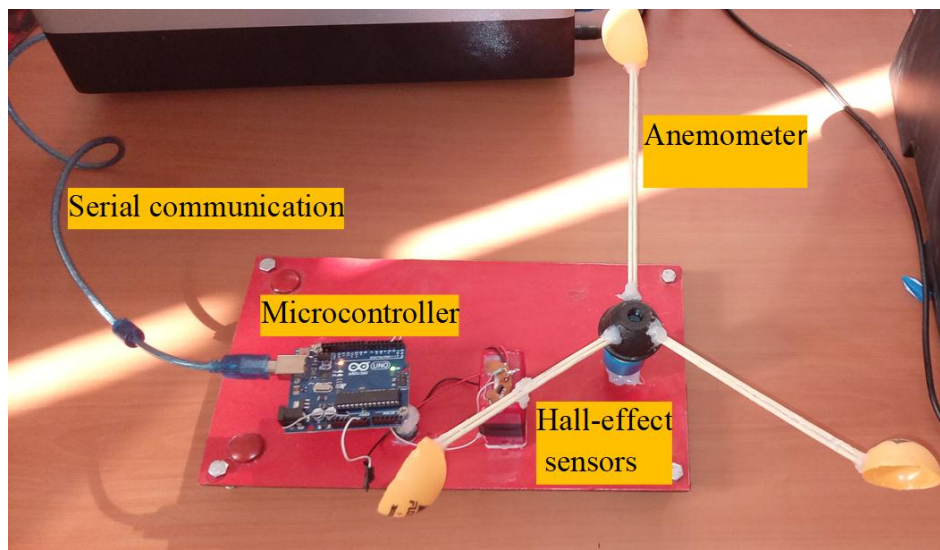


Figure V.1. Réalisation d'un capteur d'anémomètre à base du capteur à effet-hall

V.3.3. Connexion électronique

Le capteur à effet Hall est connecté à une carte Arduino. Le capteur à effet Hall possède généralement trois broches : alimentation (+5V), masse (GND), et sortie de signal (signal de détection). La sortie de signal est connectée à une entrée numérique de l'Arduino.

V.3.3.1. Structure software

La carte de commande est constituée d'une carte Arduino UNO, alimentée par une alimentation de 5 Volts. Le programme Arduino est écrit pour lire les impulsions générées par le capteur à effet Hall. Chaque fois qu'un aimant passe devant le capteur, une interruption est générée, et le programme compte le nombre de passages par unité de temps. La figure ci-dessous montre la carte Arduino UNO et le Brochage de l'ATMega328.

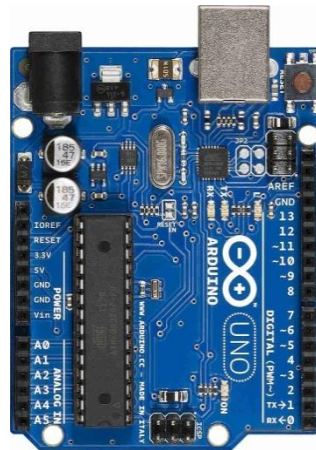


Figure V.2. Carte Arduino UNO.

RESET	Pin # 1: PC6	Pin # 28: PC5	Analog Input 5
Digital pin 0 (RX)	Pin # 2: PD0	Pin # 27: PC4	Analog Input 4
Digital pin 1 (TX)	Pin # 3: PD1	Pin # 26: PC3	Analog Input 3
Digital pin 2	Pin # 4: PD2	Pin # 25: PC2	Analog Input 2
Digital pin 3 (PWM)	Pin # 5: PD3	Pin # 24: PC1	Analog Input 1
Digital pin 4	Pin # 6: PD4	Pin # 23: PC0	Analog Input 0
Voltage (VCC)	Pin # 7: VCC	Pin # 22: GND	Ground (GND)
Ground	Pin # 8: GND	Pin # 21: Aref	Analog Reference
Crystal	Pin # 9: PB6	Pin # 20: AVCC	Voltage (VCC)
Crystal	Pin # 10: PB7	Pin # 19: PB5	Digital Pin 13
Digital pin 5	Pin # 11: PD5	Pin # 18: PB4	Digital Pin 12
Digital pin 6	Pin # 12: PD6	Pin # 17: PB3	Digital Pin 11 (PWM)
Digital pin 7	Pin # 13: PD7	Pin # 16: PB2	Digital Pin 10 (PWM)
Digital pin 8	Pin # 14: PB0	Pin # 15: PB1	Digital Pin 9 (PWM)

Figure V.3. Brochage de l'ATMega328.

➤ Vue d'ensemble

Le modèle UNO de la société ARDUINO est une carte électronique dont le cœur est un microcontrôleur ATMEL de référence ATmega328. Le microcontrôleur ATmega328 est un microcontrôleur 8bits avec une vitesse d'horloge de 16Mhz de la famille AVR dont la programmation peut être réalisée en langage C. L'intérêt principal des cartes ARDUINO (d'autres modèles existant) est leur facilité de mise en œuvre. ARDUINO fournit un environnement de développement s'appuyant sur des outils open source. Le chargement du programme dans la mémoire du microcontrôleur se fait de façon très simple par port USB. En outre, des bibliothèques de fonctions "clé en main" sont également fournies pour l'exploitation d'entrées/sorties courantes : gestion des E/S TOR, gestion des convertisseurs ADC, génération de signaux PWM, exploitation de bus TWI/I2C, exploitation de servomoteurs..

Nous avons choisi le microcontrôleur Arduino Uno grâce à ces avantages suivants :

- Pas cher : les cartes Arduino sont relativement peu coûteuses comparativement aux autres plates-formes.
- La moins chère assemblée à la main, et même les cartes Arduino pré euros (microcontrôleur inclus).
- multiplateforme : le logiciel Arduino, écrit en Java, tourne sous les systèmes d'exploitation Windows, Macintosh et Linux. La plupart des systèmes à microcontrôleurs sont limités à Windows.
- un environnement de programmation clair et simple : l'environnement de programmation Arduino (le logiciel Arduino) est facile à utiliser pour les débutants, tout en étant assez flexible pour que les utilisateurs avancés puissent en tirer profit également.
- logiciel Open Source et extensible : le logiciel Arduino et le langage Arduino sont publiés sous licence open source, disponible pour être complété par des programmes expérimentés.
- matériel Open source et extensible : les cartes Arduino sont basées sur les microcontrôleurs Atmel ATMEGA8, ATMEGA168, ATMEGA 328, etc... Les schémas des modules sont publiés sous une licence Creative Commons, et les concepteurs de circuits expérimentés peuvent réaliser leur propre version des cartes Arduino, en les complétant et en les améliorant. Même les utilisateurs relativement inexpérimentés peuvent fabriquer la version sur plaque d'essai de la carte Arduino, dans le but de comprendre comment elle fonctionne.

➤ Les entrées et sorties de la carte Arduino

Le microcontrôleur utilisé dans notre réalisation expérimentale contient deux broches principales :

- **Broche numérique** : Chacune des 14 broches numériques de la carte UNO (numérotées de 0 à 13) peut être utilisée soit comme une entrée numérique, soit comme une sortie numérique, en utilisant les instructions `pinMode()`, `digitalWrite()` et `digitalRead()` du langage Arduino. Ces broches fonctionnent en 5V. Chaque broche peut fournir ou recevoir un maximum de 40mA d'intensité et dispose d'une résistance interne "rappel au plus" (pull-up) (déconnectée par défaut) de 20-50 KOhms. Cette résistance interne s'active sur une broche en entrée à l'aide de l'instruction `digitalWrite(broche, HIGH)`.
- **Broche analogique** : La carte Uno dispose de 6 entrées analogiques (numérotées de 0 à 5), chacune pouvant fournir une mesure d'une résolution de 10 bits (c-à-d sur 1024 niveaux soit de 0 à 1023) à l'aide de la très utile fonction `analogRead()` du langage Arduino. Par défaut, ces broches mesurent entre le 0V (valeur 0) et le 5V (valeur 1023),

De plus, certaines broches ont des fonctions spécialisées :

- ✓ **Communication Série**: Port série (USART) Broches 0 (RX) et 1 (TX). Utilisées pour recevoir (RX) et transmettre (TX) les données série.
- ✓ **Interruptions Externes**: Broches 2 et 3. Ces broches peuvent être configurées pour déclencher une interruption sur une valeur basse, sur un front montant ou descendant, ou sur un changement de valeur. Voir l'instruction `attachInterrupt()` pour plus de détails
- Timers/Counters: Timer0 et Timer2 (comptage 8 bits), Timer1 (comptage 16bits), on peut les utiliser comme temporisateur ou compteur.
- ✓ PWM 8-bits à travers les broches 3, 5, 6, 9, 10, et 11.
- ✓ SPI (Interface Série Périphérique): Broches 10 (SS), 11 (MOSI), 12 (MISO), 13 (SCK). Les broches SPI sont également connectées sur le connecteur ICSP qui est mécaniquement compatible avec les cartes Mega.
- ✓ Communication I2C: Broches 4 (SDA) et 5 (SCL). Supportent les communications de protocole I2C (ou interface TWI (TwoWire Interface - Interface "2 fils"), disponible en utilisant la librairie `Wire/I2C` (ou TWI - Two-Wire interface - interface "2 fils") .

➤ Programmation de la carte

Pour programmer la carte Aduino UNO, nous avons utilisé le logiciel Arduino C prévu à cet effet. C'est un logiciel libre et gratuit développé pour Windows, Mac et Linux. Ce logiciel présente une interface épurée et permet de développer facilement des programmes qui peuvent être transférés sur la

carte en branchant celle-ci sur un port USB. Le langage utilisé par le logiciel est basé sur le C, auquel s'ajoutent des instructions spécifiques au langage Arduino. Le logiciel dispose d'une banque d'exemples très riche qui permet d'utiliser des morceaux de codes pré-écrit.

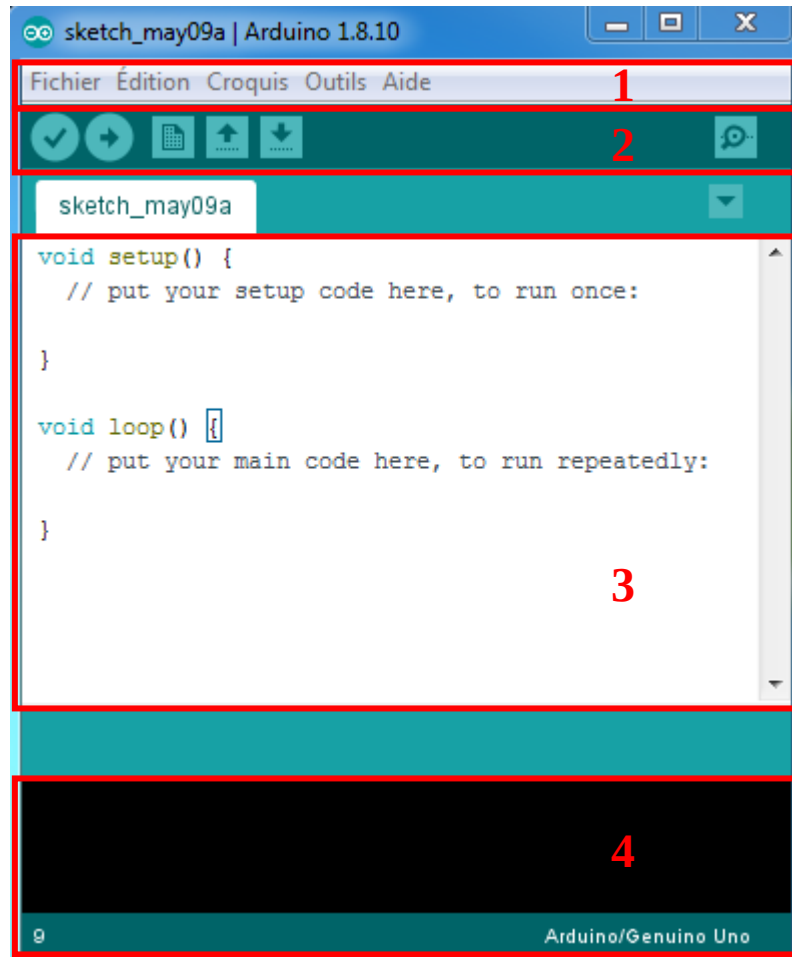


Figure V.4. : Présentation du logiciel de programmation pour le microcontrôleur Arduino

- Le cadre numéro 1 : ce sont les options de configuration du logiciel,
- Le cadre numéro 2 : il contient les boutons qui vont nous servir lorsque l'on va programmer la carte Arduino,
- Le cadre numéro 3 : ce bloc va contenir le programme que nous allons écrire,
- Le cadre numéro 4 : celui-ci est important, car il va nous aider à corriger les fautes dans notre programme.

V.4. Validation et test

Les mesures de vitesse du vent sont essentielles dans des domaines variés tels que la production d'énergie éolienne. Cependant, ces mesures sont souvent affectées par des perturbations et du bruit environnemental, rendant difficile l'obtention de données fiables. Le filtre de Kalman, grâce à sa capacité à fournir des estimations optimales en combinant des modèles de système avec des données de capteur bruitées, représente une solution idéale pour améliorer la précision des mesures d'anémomètre.

L'utilisation d'une carte Arduino pour cette tâche présente plusieurs avantages, notamment sa facilité de programmation, son coût réduit, et sa flexibilité. En combinant ces outils, ce chapitre vise à fournir une méthode robuste et accessible pour l'estimation de la vitesse du vent, qui peut être appliquée dans divers contextes pratiques.

V.4.1. Implémentation l'algorithme du filtre de Kalman sur la carte Arduino

L'implémentation de l'algorithme du filtre de Kalman sur une carte Arduino représente une étape cruciale pour améliorer la précision des mesures de capteurs dans des applications en temps réel. Le filtre de Kalman est un outil statistique puissant utilisé pour estimer l'état d'un système dynamique à partir de mesures bruitées. Dans le contexte de ce projet, il permet de traiter les données issues d'un anémomètre connecté à une carte Arduino, en fournissant des estimations plus fiables de la vitesse du vent malgré la présence de bruit et d'incertitudes dans les mesures. Cela inclut :

- **Préparation de l'environnement de développement** : Configuration de l'environnement Arduino pour le codage et le débogage.
- **Définition du modèle du système** : Modélisation mathématique du système mesuré par l'anémomètre, y compris les équations d'état et de mesure.
- **Codage de l'algorithme du filtre de Kalman** : Traduction de l'algorithme théorique en code exécutable sur l'Arduino.
- **Intégration avec le capteur d'anémomètre** : Liaison du code de filtrage avec les données brutes du capteur pour une estimation en temps réel.
- **Tests et validation** : Évaluation des performances du filtre de Kalman en comparant les résultats avec des mesures de référence.

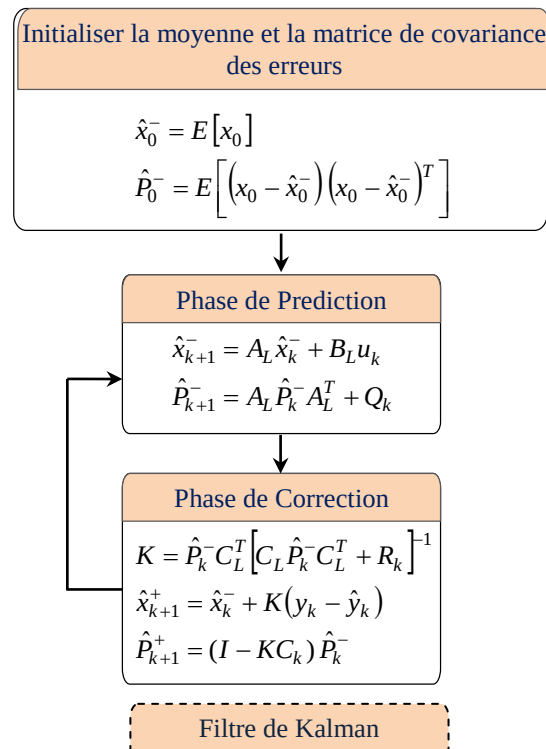


Figure V.5. : Algorithme du filtre de Kalman

V.4.2. Supervision des résultats en temps réel

La supervision de la vitesse du vent mesurée et estimée en temps réel est une application indispensable dans la validation expérimentale de la réalisation d'un dispositif d'estimation basé sur le filtre de Kalman. En utilisant LabVIEW, un environnement de développement graphique largement utilisé pour l'acquisition de données et le contrôle industriel, il est possible de créer une interface conviviale pour visualiser ces mesures en temps réel.

V.4.2.1. Configuration de l'Interface Utilisateur

La première étape consiste à concevoir l'interface utilisateur (UI) dans LabVIEW. Cette interface doit inclure des éléments graphiques tels que des graphiques temps réel, des indicateurs numériques, et des jauges pour afficher la vitesse du vent mesurée par l'anémomètre et la vitesse du vent estimée par le filtre de Kalman. Les éléments de l'UI sont disposés de manière à offrir une vue claire et intuitive des données.

- **Graphiques Temps Réel :** Les graphiques sont utilisés pour tracer la vitesse du vent mesurée et estimée sur un axe temporel, permettant de visualiser les variations et les tendances instantanément.

- **Indicateurs Numériques** : Ces indicateurs affichent les valeurs actuelles de la vitesse du vent, fournissant une lecture rapide et précise.
- **Jauges Analogiques** : Les jauges offrent une représentation visuelle des vitesses du vent, facilitant la comparaison entre les valeurs mesurées et estimées.

V.4.2.2.Acquisition et Traitement des Données

L'acquisition des données en temps réel se fait à partir de l'Arduino, qui est connecté à l'anémomètre et exécute le filtre de Kalman. LabVIEW utilise des protocoles de communication série (comme UART) pour recevoir les données envoyées par l'Arduino. Un VI (Virtual Instrument) est créé pour gérer cette communication et traiter les données entrantes.

- **Lecture des Données Série** : Un bloc de lecture série dans LabVIEW est configuré pour lire les données envoyées par l'Arduino. Les données comprennent à la fois la vitesse du vent mesurée et la vitesse du vent estimée.
- **Traitement et Filtrage des Données** : Les données brutes peuvent nécessiter un prétraitement, comme le filtrage des valeurs aberrantes ou la conversion des unités. LabVIEW offre une variété d'outils pour ces opérations.

V.4.2.3.Affichage et Mise à Jour en Temps Réel

Une fois les données acquises et traitées, elles sont affichées en temps réel sur l'interface utilisateur. LabVIEW utilise une boucle de contrôle temps réel pour mettre à jour continuellement les graphiques et les indicateurs avec les nouvelles données. Cette boucle assure que l'interface réagit instantanément aux changements dans les mesures du vent.

- **Mise à Jour des Graphiques** : Les graphiques sont mis à jour à chaque itération de la boucle, affichant les dernières valeurs de vitesse du vent mesurée et estimée.
- **Synchronisation des Données** : Les données de mesure et d'estimation sont synchronisées temporellement pour une comparaison précise, ce qui permet de visualiser l'effet du filtre de Kalman en réduisant les fluctuations indésirables et le bruit.

V.4.2.4.Analyse et Archivage des Données

Pour une analyse plus approfondie, les données mesurées et estimées peuvent être enregistrées et archivées. LabVIEW permet de sauvegarder les données dans des fichiers, facilitant leur utilisation pour des analyses futures ou des rapports.

- **Enregistrement des Données** : Les données de vitesse du vent sont enregistrées dans des fichiers CSV ou des bases de données, incluant les horodatages pour chaque enregistrement.
- **Analyse Hors Ligne** : Les données enregistrées peuvent être importées dans des outils d'analyse pour une évaluation plus détaillée des performances du système et du filtre de Kalman.

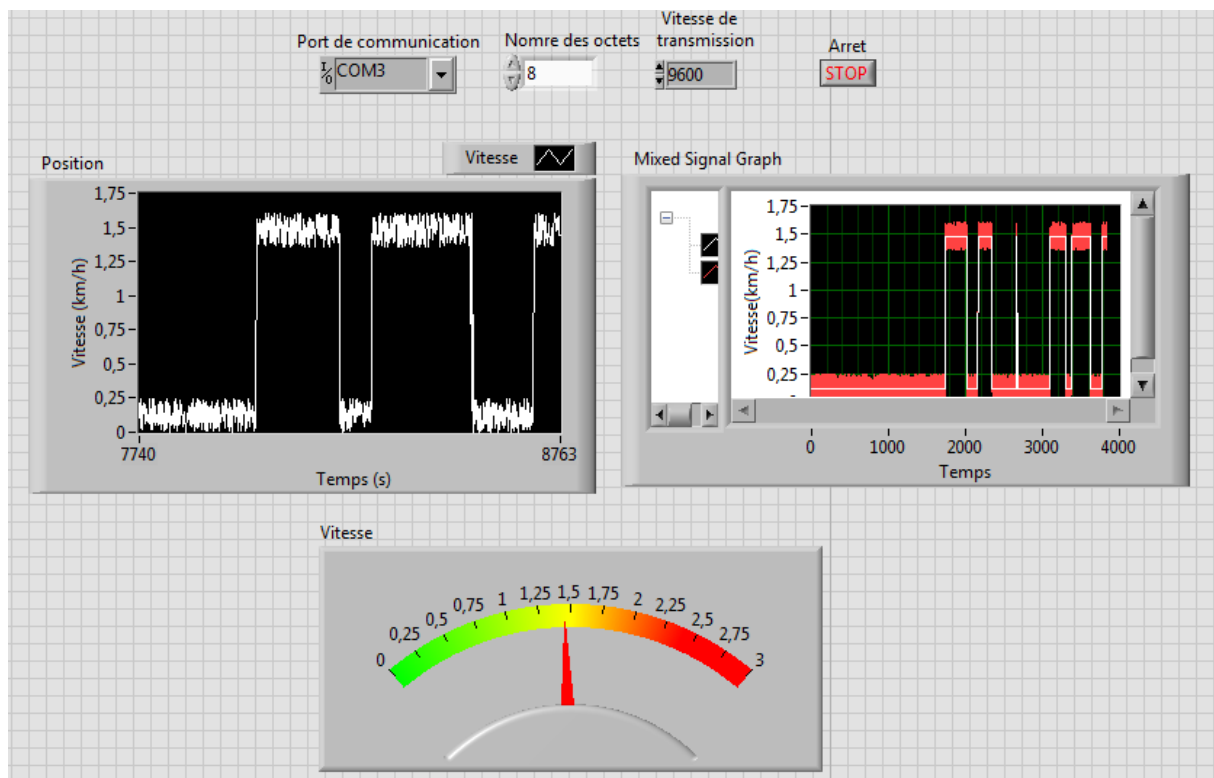


Figure V.6. Application de supervision basée sur langage de programmation graphique (LABVIEW)

V.4.3. Discussion et résultats

La supervision de la vitesse du vent mesurée et estimée en temps réel à travers une application de LabVIEW permet une visualisation intuitive et une analyse approfondie des données. Cette approche combine les capacités de traitement temps réel de l'Arduino avec l'interface utilisateur puissante et flexible de LabVIEW, offrant ainsi une solution robuste et évolutive pour la surveillance et le contrôle des systèmes de mesure environnementale. La figure V.6 montre les résultats obtenus en temps réel pour la mesure de la vitesse du vent à partir du capteur d'anémomètre réalisé, ainsi que l'estimation de la vitesse du vent obtenue grâce au filtre de Kalman. D'après la figure, il est évident que le filtre de Kalman a considérablement réduit le bruit présent dans les mesures de la vitesse du vent.

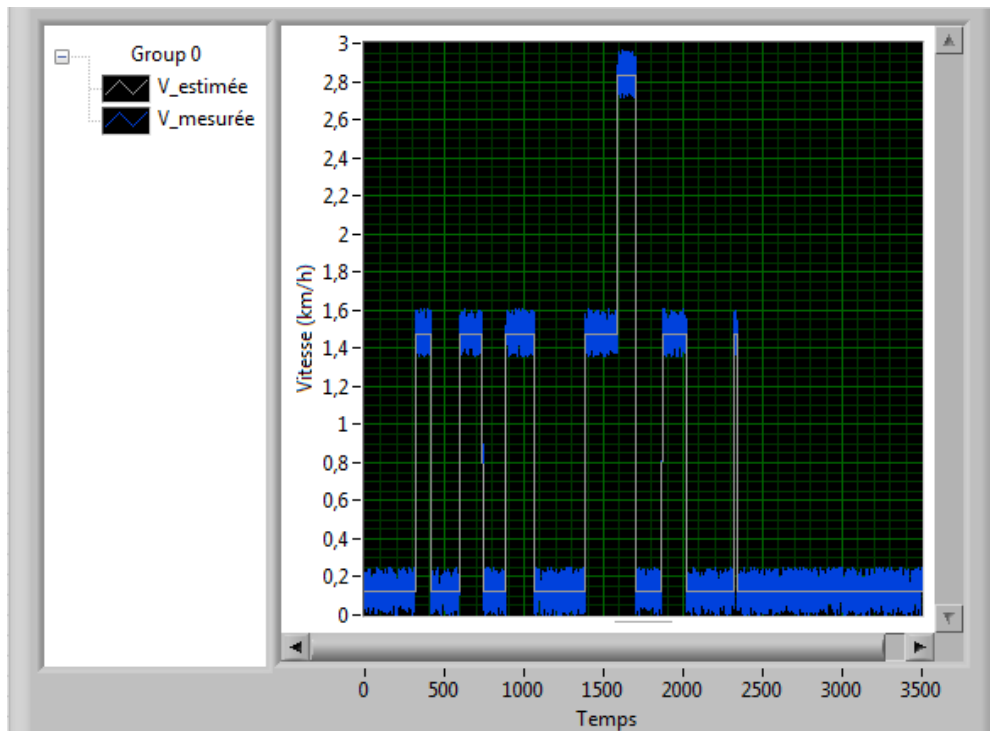


Figure V.7. Supervision en temps réel de la vitesse du vent estimée et mesurée

V.5. Conclusion

La mise en œuvre d'un système de mesure et d'estimation de la vitesse du vent en temps réel, utilisant un anémomètre basé sur un capteur à effet Hall et une carte Arduino, démontre la puissance et la précision des outils de traitement des signaux, en particulier le filtre de Kalman. L'intégration de ce filtre sur la carte Arduino a permis de traiter efficacement les données bruitées provenant de l'anémomètre, fournissant des estimations optimisées de la vitesse du vent.

En complément, l'utilisation de LabVIEW pour la supervision en temps réel des données mesurées et estimées a offert une interface intuitive et puissante pour visualiser et analyser ces informations. Cette approche a facilité la comparaison des performances du système et a permis de vérifier l'efficacité du filtre de Kalman en réduisant le bruit et les fluctuations indésirables.

Les résultats obtenus montrent clairement que le filtre de Kalman améliore significativement la qualité des mesures de la vitesse du vent, rendant le système plus fiable pour des applications pratiques. En combinant des techniques avancées de traitement des signaux avec des plateformes matérielles accessibles et des outils de développement sophistiqués, ce projet a réussi à créer un dispositif robuste et précis pour la mesure environnementale.

Cette réalisation ouvre la voie à de nombreuses autres applications où des mesures précises et fiables sont cruciales, et démontre l'importance de l'intégration des systèmes de capteurs avec des algorithmes de traitement avancés pour l'amélioration des performances des systèmes de mesure et de contrôle en temps réel.

Conclusion générale

Cette étude a porté sur la modélisation et le contrôle d'une turbine éolienne, en mettant l'accent sur l'estimation de la vitesse du vent à l'aide du filtre de Kalman et sur la sélection de la stratégie de contrôle la plus efficace pour optimiser l'extraction de la puissance disponible dans le vent. Les principaux résultats obtenus démontrent l'efficacité et la pertinence de cette approche pour améliorer les performances des turbines éoliennes.

Tout d'abord, un travail pratique a été réalisé afin d'estimer la vitesse du vent par le filtre de Kalman. Une modélisation mathématique détaillée de la turbine éolienne a été effectuée, prenant en compte les aspects aérodynamiques, mécaniques et électriques. Cette modélisation a fourni une base solide pour l'implémentation et la validation des algorithmes de contrôle.

Les résultats obtenus en termes de contrôle montrent qu'il est possible d'extraire un maximum de la puissance disponible dans le vent en contrôlant adéquatement la vitesse mécanique de l'éolienne à l'aide de régulateurs appropriés. De plus, le contrôle utilisant la logique floue (fuzzification) a montré de très bonnes performances comparées à la régulation PID traditionnelle, offrant une réponse plus flexible et adaptative aux variations des conditions de vent.

L'utilisation du filtre de Kalman pour estimer la vitesse du vent a permis d'obtenir des estimations plus précises, essentielles pour un contrôle optimal de la turbine. Les simulations ont démontré que le filtre de Kalman améliore significativement la précision des estimations de la vitesse du vent, ce qui est crucial pour le contrôle optimal de la turbine.

En conclusion, l'étude a démontré l'importance de l'estimation précise de la vitesse du vent par le filtre de Kalman et son impact positif sur le contrôle des turbines éoliennes. Les résultats obtenus ouvrent la voie à des recherches supplémentaires et à des applications pratiques dans le domaine des énergies renouvelables. Cette approche intégrée, combinant modélisation détaillée, estimation avancée et stratégies de contrôle optimisées, promet d'améliorer l'efficacité et la fiabilité des systèmes éoliens, contribuant ainsi à une meilleure exploitation des ressources éoliennes.

Bibliographie

- [Adj-15] Adjeroud, M et Boudjellaba, f «Etude d'une éolienne en fonctionnement autonome», Université Abderrahmane Mira de Bejaïa, Soutenue 2015
- [Ata-19] Atallah, M, Mezzouar, A « Gestion des puissances active et réactive dans une ferme éolienne au vu de son intégration dans le réseau électrique », Université Dr, Moulay Tahar, Saida Soutenu le 26/06/2019
- [Bel-15] Belhadji, R, Larabi, R, « Prédiction à l'aide du Filtre de Kalman des Symboles M-QAM dans une Transmission Mono Porteuse », Université SAAD DAHLAB de BLIDA , Soutenu le 2015
- [Bel-17] Belattar, H, « Quelques considérations sur le filtre de Kalman discret », Sherbrooke, Québec, Canada, mars 2017
- [Bou-06] Boukhezzar, B. (2006). Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable (Doctoral dissertation, Université Paris Sud-Paris XI).
- [Fré-03] Frédéric, P «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne -Machine asynchrone à cage autonome -Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» à l'Ecole polytechnique de l'Université de Nantes Soutenu publiquement le 19 décembre 2003.
- [Kal-60] Kalman, R. E. (1960). A new approach to linear filtering and prediction problems.
- [Ker-16] Kerrouche, K, «Application des FACTS pour améliorer les performances dynamiques d'un parc éolien raccordé aux réseaux électriques», Thèse de doctorat à l'université Dr, Tahar Moulay de Saida, Soutenu le 2016.
- [Poi-03] Poitiers, F «Etude et commande de génératrices asynchrones pour L'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau», Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Nantes, France, Soutenu le 2003.
- [Sai-16] Saidi, Y, Mezzouar, A « Modélisation et contrôle d'un système éolien à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents », Université Dr, Moulay Tahar Saida Soutenu le 21/06/2016
- [Sai-21] Saidi, Y, « Modélisation, contrôle et gestion d'un système éolien à base d'une génératrice synchrone à aimants permanents », Thèse de Doctorat, Université de Saida, Soutenu le 2021.
- [Tar-11] Tarak, G «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, Ecole Centrale de Lille, 29/09/2011

نمذجة وتحكم في توربين الرياح مع تقدير سرعة الرياح باستخدام مرشح كالمان (تنفيذ جهاز تقدير)

الملخص: تمثل توليد الطاقة من الرياح حلاً مهماً يمكن أن يخفف من مشاكل التلوث، وذلك أساساً بسبب تأثيراتها البيئية الطفيفة وحقيقة أن هذه الطاقة متجددة ويمكن أن تسهم في التنمية العالمية. في هذا العمل، اخترنا دراسة توربين رياح ذو سرعة متغيرة. تكمن مشكلة هذا العمل في ضرورة استخراج أكبر قدر ممكن من الطاقة من الرياح وضمان استمرارية النظام في حالة تعطل أجهزة استشعار الرياح. لذلك، فإن الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تقديم مساهمة في نمذجة وتحكم توربين الرياح مع تقدير سرعة الرياح باستخدام مرشح كالمان.

الكلمات المفتاحية: نظام الرياح، توربين الرياح، MPPT، مرشح كالمان

Modélisation et contrôle d'une turbine éolienne avec l'estimation de la vitesse du vent par le filtre de Kalman (réalisation d'un dispositif d'estimation)

Résumé : La génération de l'énergie éolienne représente une solution importante qui pourrait mitiger les problèmes de la pollution grâce essentiellement à ces impacts insignifiants sur l'environnement, et le fait que cette énergie est renouvelable et pourrait contribuer au développement dans le monde. Dans ce travail, nous avons choisi d'étudier une éolienne à vitesse variable. La problématique de ce travail est la nécessité d'extraire un maximum d'énergie du vent et d'assurer la continuité du système en cas de dysfonctionnement des capteurs de vent. Pour cela, l'objectif principal de ce travail est de proposer une contribution à la modélisation et au contrôle de la turbine éolienne avec l'estimation de la vitesse du vent par le filtre de Kalman.

Mots clés : Système éolien, Turbine éolienne, MPPT, Filtre de Kalman,

Modeling and Control of a Wind Turbine with Wind Speed Estimation using the Kalman Filter (Development of an Estimation Device)

Abstract: Wind energy generation represents a significant solution that could mitigate pollution problems, primarily due to its minimal environmental impact and the fact that this energy is renewable and could contribute to global development. In this work, we chose to study a variable-speed wind turbine. The challenge of this work is the necessity to extract maximum energy from the wind and ensure the continuity of the system in case of wind sensor malfunctions. Therefore, the main objective of this work is to propose a contribution to the modeling and control of the wind turbine with wind speed estimation using the Kalman filter.

Keywords: Wind system, Wind turbine, MPPT, Kalman filter