

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République algérienne démocratique et populaire
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
جامعة عين تموشنت بلحاج بوشعيب
Université-Ain Témouchent-Belhadj Bouchaib
كلية العلوم والتكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie
قسم الإلكترونيات
Département d'Électrotechnique



Projet de Fin d'Étude

Pour l'obtention du diplôme de Master en :

Domaine : SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Commande Électrique

Thème :

Étude et commande d'une turbine éolienne par la technique MPPT à vitesse variable.

Présenter par :

1-M^{elle}.BENZINA Fatima

2-M^{elle}.BELMEKKI Asma

Devant le jury :

Dr ADJOUDJ Redouane

UAT.B.B (Ain Témouchent)

Président

Pr MENDAZ Kheira

UAT.B.B (Ain Témouchent)

Examinateur

Dr ALLAM Mohamed

UAT.B.B (Ain Témouchent)

Encadrant

Année Universitaire : 2025/2026



J'ai l'honneur et le grand plaisir de dédier ce travail :

♥ **À moi-même** ♥

À celle qui a su rester forte malgré les difficultés, garder espoir dans les moments de stress et avancer même lorsque le chemin semblait difficile. Je dédie ce travail à moi-même, en reconnaissance de tous les sacrifices, des efforts silencieux, des longues heures de travail et de la patience dont j'ai fait preuve durant ce parcours universitaire. Ce résultat est le reflet de mon courage, de mon évolution et de la confiance que j'ai appris à construire. Qu'elles soient le début d'un avenir rempli de succès, d'ambitions réalisées et de rêves accomplis.

♥ **À mon cher papa (رحمه الله)** ♥

Même si tu n'es pas là, tu demeures présent dans mon cœur et dans chacune de mes réussites. Tu m'as appris la dignité dans l'effort, la patience dans les épreuves et la force dans le silence.

Aujourd'hui encore, je continue d'avancer avec les principes et les valeurs que tu m'as transmis, en espérant te rendre fier de moi.

Ton absence laisse un vide immense, mais ton amour et ton souvenir m'accompagnent chaque jour. Ce travail est le fruit des sacrifices que vous avez consentis dans son vaste paradis.

Merci d'avoir cru en moi, même sans le dire... Je l'ai toujours senti. Que ton âme repose en paix...

♥ **À ma chère maman** ♥

À la femme la plus courageuse que je connaisse, merci pour ton amour infini, ta patience et tous les sacrifices que tu as accomplis pour moi. Je lui exprime toute ma reconnaissance pour ses prières, ses encouragements et sa présence constante à mes côtés tout au long de mon parcours. Tu as toujours été là, dans les moments difficiles comme dans les plus beaux, sans jamais faiblir. Merci pour tout ce que tu fais pour moi, pour ton soutien sans limites et ton amour inconditionnel. Je ferai toujours de mon mieux pour te rendre fière.

♥ **À mon cher frère & À mon adorable sœur** ♥

Vous qui avez toujours su transformer mes doutes en courage et mes moments de faiblesse en force. Merci pour votre présence, votre soutien sincère et vos paroles qui m'ont toujours redonné espoir et confiance en moi. À travers votre amour et votre affection, j'ai trouvé un refuge dans les moments difficiles et une motivation pour toujours aller plus loin, et ce succès aussi le vôtre.

♥ **À toute ma famille** ♥

En particulier les familles BENZINA et MESSABIHI, Pour leur affection, leur confiance et leur soutien constant. Dans mes veines, c'est votre amour qui coule.

♥ **À mes vrais amis** ♥

Les vrais de vrais. Ceux qui ont tenu ma main dans l'ombre, qui m'ont laissé pleurer sans jugement, qui ont ramené des touches de lumière dans mes tempêtes mentales. Vous avez été ma famille choisie, mes lampadaires dans les nuits les plus noires.

« Les vraies amitiés ne s'expliquent pas, elles se vivent et restent gravées dans le cœur pour toujours ».



BENZINA Fatima



Dédicace

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Avec une gratitude sincère, je dédie ce travail à ceux qui m'ont soutenu et réconforté lors de cette étape cruciale de ma vie.

A mon père, BELMEKKI BELHADJ,

À l'homme qui a porté mes soucis avant même je ne les exprime, à celui qui a sacrifié son confort et supporté la fatigue pour me voir réussir, aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime et le respect que j'ai toujours eus pour toi. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation.

Puisse Dieu, le tout puissant, te préserver et t'accorder santé, longue vie et bonheur.

A ma mère,

A ma très chère mère, honorable, aimable, tu présentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager.

Pour son amour inconditionnel, ses prières sincères, sa tendresse et son soutien sans faille dans chaque étape de ma vie. Tu as toujours été mon pilier.

A moi-même,

Pour ma persévérance face aux épreuves et mon courage tout au long de ce parcours universitaire.

A mon frère et à ma sœur,

A mon cher frère ABD SAMED, et à ma sœur AMINA en témoignage de l'attachement, et de l'affection que je porte pour vous. Je vous remercie d'être l'épaule sur laquelle je peux toujours compter.

Je vous dédie ce travail avec tous mes vœux de bonheur, de santé et de réussite.

A mes amies,

Merci pour votre présence, votre gentillesse et votre encouragement précieux.



Belmekki Asma



Ce travail représente l'aboutissement d'un long parcours, marqué par des efforts constants, des sacrifices et une grande détermination. Mes premiers remerciements vont au créateur de l'univers **ALLAH**, qui m'a accordé la force, la patience et la volonté nécessaires pour surmonter les difficultés et mener à bien ce travail que j'espère utile.

J'exprime ma profonde gratitude à mon encadrant, le docteur **ALLAM Mohamed**, pour avoir accepté de m'encadrer. Je le remercie sincèrement pour son sérieux, sa disponibilité, ses conseils avisés ainsi que pour son soutien constant. Sa rigueur scientifique et son sens de la responsabilité ont été pour moi une véritable source de motivation tout au long de ce travail.

Je tiens également à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'examiner et d'évaluer ce mémoire. Je tiens à leur exprimer ma profonde gratitude pour l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail, ainsi que pour leurs remarques et conseils judicieux qui contribueront à son amélioration.

Mes remerciements s'adressent aussi à l'ensemble des enseignants du département électrotechnique de l'université Belhadj Bouchaib, pour la qualité de la formation reçue ainsi que pour leur engagement tout au long de mon parcours universitaire.

Je remercie également tous mes amis ainsi que toutes les personnes qui m'ont aidée, de près ou de loin, et qui m'ont soutenue moralement durant ce travail.

Enfin, je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à ma famille, pour leur patience et leur soutien inconditionnel. Je remercie tout particulièrement ma mère pour ses sacrifices et ses encouragements, ainsi que mon père رحمه الله , dont la mémoire reste une source de force et d'inspiration. Mes remerciements s'adressent également à ma sœur et à mon frère pour leurs soutiens constants et leurs encouragements.

Pour terminer, j'adresse un remerciement tout particulier à toute ma famille : **BENZINA** et **MESSABIHI**, pour leur soutien indéfectible, leur présence Constante et leur confiance en moi.



BENZINA Fatima

Remerciement

*Je tiens tout d'abord à remercier **ALLAH** le tout puissant et miséricordieux, qui m'aide et qui m'a donné la force, le courage la patience d'accomplir ce Modeste travail.*

*Je souhaite remercier très sincèrement mon encadrant de ce mémoire, Monsieur **ALLAM MOHAMED**, pour le temps qu'il a consacré à m'apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de cette recherche. Son exigence m'a grandement stimulé.*

Je remercie aussi les membres de jury qui ont accepté d'évaluer et de juger le présent travail.

Un grand Merci à toute l'équipe pédagogique de l'université d'Ain Témouchent, pour la qualité des enseignements fournis tout au long de ma scolarité.

*C'est avec une immense joie et le cœur ému que je remercie mes chers parents **Belmekki Belhadj, Sedikki Hakima** pour leur affection inépuisable et leurs précieux conseils. Ils n'ont cessé de prier pour moi durant mon cursus scolaire et m'ont régulièrement encouragé.*



Belmekki Asma

Introduction Générale.....	1
-----------------------------------	----------

Chapitre I: Généralité sur les énergies renouvelables.

I.1 Introduction :	5
I.2 Définition d'énergie renouvelable :	5
I.2.1 La Biomasse :	5
I.2.2 Énergie hydraulique :	6
I.2.3 Énergie géothermique :	6
I.2.4 Énergie solaire :	7
I.2.5 Énergie éolienne :	8
I.3 Développement des énergies renouvelables en monde :	8
I.4 Développement des énergies renouvelables en Algérie :	10
I.5 Généralité sur les systèmes éoliens :	11
I.5.1 Définition de l'énergie éolienne :	11
I.5.2 Historique d'énergie éolienne :	11
I.5.3 Principe de fonctionnement d'énergie éolienne :	12
I.5.4 Développement d'énergies éoliennes en Monde :	13
I.5.5 Développement d'énergies éoliennes en Algérie :	13
I.5.6 Les types des turbines éoliennes :	15
I.5.7 Classification des turbines éolienne :	17
I.5.8 Les principaux composants d'une éolienne :	18
I.5.9 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :	20
I.6 Type des systèmes :	20
I.6.1 Systèmes autonomes :	20
I.6.2 Systèmes connectés au réseau :	20
I.7 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :	21
I.8 Conclusion :	21

Chapitre II : Modélisation de la turbine éolienne.

II.1	Introduction :	23
II.2	Description de Système de conversion éolienne à base de la GADA :	23
II.3	Modélisation mathématique de la turbine éolienne :	24
II.3.1	Modèle du vent :	24
II.3.2	Modélisation de la chaine de conversion :	25
II.3.3	Modélisation de la turbine :	25
II.3.4	Modélisation de Multiplicateur de vitesse :	28
II.3.5	Modèle de la partie mécanique :	29
II.4	Schéma bloc du modèle de la turbine :	30
II.5	Stratégie de commande de la turbine éolienne :	30
II.5.1	Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique :	32
II.5.2	Contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique :	34
II.6	Présentation De L'environnement MATLAB Simulink™ :	35
II.7	Résultats de simulation et interprétation :	36
II.7.1	Profil du vent appliqué au système étudié :	36
II.7.2	Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β :	36
II.7.3	Coefficient de couple C_c en fonction de λ et β :	37
II.7.4	Puissance de la turbine en fonction de la vitesse mécanique :	38
II.7.5	Couple de la turbine en fonction de la vitesse mécanique :	38
II.7.6	MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique :	39
II.7.7	MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique :	41
II.8	Conclusion :	43
 Chapitre III : Commande MPPT avec régulateur flou de la turbine éolienne.		
III.1	Introduction :	46
III.2	Généralités sur les systèmes de commande par logique floue :	46
III.2.1	Historique de la logique floue :	46
III.2.2	Principe de la logique floue :	46

III.2.3	Domaine d'application :	47
III.2.4	Concepts fondamentaux de la théorie des ensembles flous :.....	47
III.2.5	Structure générale d'un contrôleur flou :.....	52
III.2.6	Moteur d'inférence floue :.....	53
III.2.7	Interface de Défuzzification :	54
III.2.8	Efficacité de la commande floue :	55
III.3	Optimisation de l'Extraction d'Éolienne par Commande MPPT à Logique Floue :.....	56
III.3.1	Résultats de simulation et interprétations :.....	57
III.4	Etude comparative du MPPT avec RC-PI et RI-Flou :.....	59
III.5	Conclusion :	61
Conclusion Générale		62
Références bibliographiques		65
Annexes		68
Résumé		74

Notations :

Notation	Significations	Unité
v	Vitesse du vent	m/s
P_v	Puissance cinétique du vent	W
P_t	Puissance aérodynamique de la turbine	W
C_p	Coefficient de puissance	--
C_c	Coefficient de couple	--
λ	Ratio de vitesse	--
λ_{opt}	Ratio de vitesse optimal	--
R	Rayon de la turbine éolienne	m
β	Angle de calage des pales	deg
Ω_t	Vitesse rotation de la turbine	rad/s
Ω_t^*	Vitesse de référence de la turbine	rad/s
Ω_{mec}	Vitesse mécanique de la génératrice	rad/s
Ω_{mec}^*	Vitesse mécanique de référence de la génératrice	rad/s
C_t	Couple de la turbine avant multiplicateur	N.m
C_{t-opt}	Couple aérodynamique optimal	N.m
C_{mec}	Couple mécanique après multiplicateur	N.m
C_{em}	Couple électromagnétique de la GADA	N.m
G	Gain de multiplicateur de vitesse	--
J_t	Moment d'inertie de la turbine	Kg.m ²
J_T	Moment d'inertie Totale (génératrice +turbine)	Kg.m ²
J_g	Moment d'inertie de la génératrice	Kg.m ²
f_r	Coefficient de frottement visqueux de la génératrice	N.m.s/rad
V_n	Vitesse nominale	m/s
P_n	Puissance nominale	W
ρ	Masse volumique de l'air	Kg/m ³
S	Surface circulaire balayée par la turbine	m ²

Glossaire :

AIE	Agence Internationale de l'Énergie
CSP	Concentrated Solar Power
CDER	Centre de Développement des Énergies Renouvelables
GWEC	Global Wind Energy Council
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
PV	Photovoltaïque
GADA	Génératrice Asynchrone à Double Alimentation
MPPT	Maximum Power Point Tracking
RC-PI	Régulateur Classique Proportional-Integral
RI-Flou	Régulateur Intelligent Flou

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables.

Figure I.1: La biomasse.....	6
Figure I.2: Énergie hydraulique	6
Figure I.3: Énergie géothermique	7
Figure I.4: Panneaux solaires	8
Figure I.5: Énergie éolienne.....	8
Figure I.6: Développement des capacités d'énergies renouvelables dans le monde	9
Figure I.7: Répartition d'énergies renouvelables dans l'Algérie	10
Figure I.8: Les différentes formes d'exploitation de l'énergie éolienne.....	12
Figure I.9: Principe de la conversion d'énergie	13
Figure I.10: Carte potentiel de l'énergie éolienne en Algérie.....	14
Figure I.11: Ferme éolienne de kabertene à Adrar.....	14
Figure I.12: Les éoliennes à axe vertical.....	15
Figure I.13: L'éolienne à axe horizontal.....	16
Figure I.14: Types d'éoliennes selon la direction du vent : amont et aval	17
Figure I.15: Éolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone	18
Figure I.16: Principales composants de l'éolienne	19

Chapitre II : Modélisation de la turbine éolienne

Figure II.1: Système de conversion éolienne.....	24
Figure II.2: Modèle de la turbine éolienne	25
Figure II.3: Multiplicateur de vitesse.....	28
Figure II.4: Model d'un multiplicateur	29
Figure II.5: Modèle mécanique de la turbine éolienne	29
Figure II.6: Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne	30
Figure II.7: Zones de fonctionnement de la turbine éolienne	31
Figure II.8: Stratégies de commande MPPT.....	32
Figure II.9: Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique	34
Figure II.10: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.....	35
Figure II.11: Présentation de l'environnement MATLAB-Simulink™	36
Figure II.12: Simulation du profil du vent appliqué	36
Figure II.13: Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β	37
Figure II.14: Coefficient de couple C_c en fonction de λ et β	37
Figure II.15: Puissance de la turbine en fonction de la vitesse mécanique	38
Figure II.16: Couple de la turbine en fonction de la vitesse mécanique.....	39

Figure II.17: Résultats de simulation du MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique	41
Figure II.18: Résultats de simulation du MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.	43
 Chapitre III : Commande MPPT avec régulateur flou de la turbine éolienne	
Figure III.1 : Exemple de fonction d'appartenance :(a) Logique classique, (b) Logique Floue	48
Figure III.2: Formes usuelles des fonctions d'appartenance	50
Figure III.3: Structure interne d'un système flou.	52
Figure III.4: Fonctions d'appartenance de l'entrée de la fonction floue.	56
Figure III.5: Fonctions d'appartenance de la sortie de la fonction floue.....	56
Figure III.6: Commande MPPT avec Régulateur intelligent Flou.	57
Figure III.7: Résultats de simulation du MPPT avec RI-Flou de la turbine éolienne	59
Figure III.8: Comparaison des résultats de simulation du MPPT avec RC-PI et RI-Flou	60

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelables.

Tableau I.1: Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	21
---	----

Chapitre III : Commande MPPT avec régulateur flou de la turbine éolienne.

Tableau III.1: Comparaison des performances entre le RC-PI et RI-Flou	60
--	----

Tableau III.2: Comparaison entre RC-PI et RI-Flou en terme (tr) et (e)	61
---	----

Introduction Générale

Face à l'augmentation continue de la demande mondiale en énergie électrique et à l'épuisement progressif des ressources fossiles, les énergies renouvelables occupent aujourd'hui une place essentielle dans le développement durable. Parmi ces sources d'énergie, l'énergie éolienne représente une solution prometteuse grâce à sa disponibilité, son caractère propre et son faible impact environnemental. L'exploitation efficace de cette énergie nécessite toutefois des systèmes de conversion et de commande capables d'adapter le fonctionnement de la turbine aux variations permanentes de la vitesse du vent.

Les systèmes éoliens à vitesse variable sont particulièrement utilisés car ils permettent d'améliorer le rendement énergétique et d'extraire le maximum de puissance disponible. Dans ce contexte, les techniques MPPT (Maximum Power Point Tracking) jouent un rôle très important, puisqu'elles permettent de maintenir le fonctionnement de l'éolienne au point de puissance maximale afin d'optimiser la conversion de l'énergie du vent en énergie électrique.

L'objectif principal de ce mémoire est l'étude et la commande d'une turbine éolienne à vitesse variable basée sur la technique MPPT. Ce travail porte également sur l'analyse et la comparaison des différentes stratégies de commande afin d'améliorer les performances dynamiques et énergétiques du système éolien.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

- **Le premier chapitre** présente des généralités sur les énergies renouvelables et plus particulièrement sur l'énergie éolienne. Nous y abordons le principe de fonctionnement des éoliennes, leurs différents types, leurs composants ainsi que les systèmes de régulation utilisés dans les turbines éoliennes.
- **Le deuxième chapitre** est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne de 10 Kw. Les modèles mathématiques du vent, de la turbine, du multiplicateur de vitesse et de la partie mécanique sont développés. Ensuite, les stratégies de commande MPPT avec et sans asservissement de vitesse mécanique sont étudiées et simulées sous l'environnement MATLAB SimulinkTM.
- **Le troisième chapitre** traite de la commande MPPT par régulateur intelligent flou appliquée à la turbine éolienne. Après une présentation des concepts fondamentaux de la logique floue, une commande intelligente basée sur un régulateur flou est mise en œuvre. Les résultats obtenus sont ensuite comparés avec ceux du régulateur classique

RC-PI afin d'évaluer les performances des deux méthodes en termes de la robustesse, rapidité, stabilité et efficacité énergétique.

Enfin, ce travail vise à montrer l'intérêt des techniques de commande avancées dans l'amélioration des performances des systèmes éoliens et dans l'optimisation de la production d'énergie électrique à partir des ressources renouvelables.

Chapitre I :

*Généralité sur les
énergies renouvelables*

I.1 Introduction :

Aujourd'hui, les énergies renouvelables s'imposent progressivement dans le monde entier comme une alternative plus propre et durable, elles favorisent la réduction des émissions de gaz à effet de serre et contribuent à la transition vers un modèle énergétique plus respectueux de l'environnement comparativement aux sources d'énergie non renouvelables [1].

Dans ce chapitre, nous allons présenter les différentes sources d'énergies renouvelables utilisées pour la production d'électricité. Une attention particulière est accordée à l'énergie éolienne, en détaillant son principe de fonctionnement, ses différents types de turbine, ses composants, ses systèmes de régulation ainsi que son développement dans le monde et en Algérie.

I.2 Définition d'énergie renouvelable :

Les énergies renouvelables proviennent des ressources naturelles qui se régénèrent en permanence et ne s'épuisent pas à l'échelle humaine. Les principales sources sont l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, la géothermie et la biomasse [1].

Elles offrent des nombreux avantages : un faible impact sur l'environnement, une disponibilité durable et des coûts de production de plus en plus compétitifs. Contrairement aux combustibles fossiles ou à l'énergie nucléaire, elles ne génèrent généralement ni gaz à effet de serre, ni polluants atmosphériques, ni déchets radioactifs. Leur utilisation contribue ainsi à réduire les émissions responsables du changement climatique et à améliorer la qualité de l'air [1].

Après avoir défini les énergies renouvelables, nous allons maintenant présenter les différents types d'énergies renouvelables tels que :

I.2.1 La Biomasse :

L'utilisation de la biomasse remonte aux débuts de l'histoire humaine où feu maîtrisé et utilisation du bois pour chauffage et préparation des aliments coexistaient. En effet, la biomasse est une ressource qui représente l'énergie stockée dans les végétaux et dans les matières organiques [2].

La biomasse, végétale notamment, est l'énergie du soleil captée par les végétaux dans le processus de photosynthèse et transmise aux animaux lors de la consommation de ces végétaux. La biomasse peut être issue des multiples sources et matières premières (bois, culture à but énergétique, résidu agricole, déchets alimentaires, fractions organiques des déchets municipaux

et des déchets industriels). Différentes technologies permettent de convertir cette énergie en énergie valorisable. Ces procédés peuvent soit l'utiliser sous forme de chaleur ou d'électricité, soit la transformer en vecteurs énergétiques intermédiaires types biocarburants ou biogaz [2].



Figure I.1: La biomasse.

I.2.2 Énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique est une source d'énergie renouvelable grâce à son renouvellement par le cycle naturel qui démarre par l'évaporation et les précipitations. Utilisée depuis des millénaires, notamment, par voie des barrages, des moulins à eau et des réseaux d'irrigations, la force motrice de l'eau est mise en œuvre par différentes méthodes techniques pour la valoriser. Les roues à aubes permettent de la convertir directement sous forme d'énergie mécanique comme dans le cas des moulins à eau, mais couplées à des turbines, elles assurent ensuite sa transformation en électricité avec un générateur [2].

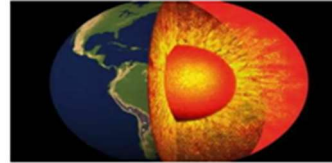


Figure I.2: Énergie hydraulique.

I.2.3 Énergie géothermique :

La géothermie est l'énergie thermique présente dans la profondeur de la terre, énergétiquement utilisée au niveau naturel, à la surface, sous forme des phénomènes volcaniques ou des geysers, ou bien de manière régulière en provenance des sources thermales. Elle permet de générer de l'électricité et d'assurer le confort thermique, c'est-à-dire le chauffage

ou le rafraîchissement, selon les besoins du bâtiment où elle est utilisée, alors même que son extraction peut provenir d'un réservoir de profondeur, atteint par forage, ou d'une nappe peu profonde. À une échelle domestique, elle peut également être mobilisée ! Par exemple, il est possible d'utiliser des pompes à chaleur à faible puissance pour profiter de la géothermie [2].



L'Énergie Géothermique



Rambeaux Loïck
Soufiane Boudjakhdjaka

Figure I.3: Énergie géothermique.

I.2.4 Énergie solaire :

Le terme « énergie solaire » désigne l'énergie apportée par le rayonnement solaire. Le soleil est la source énergétique la plus abondante et accessible gratuitement à condition de savoir capter, utiliser cette ressource. Les technologies disponibles pour capter l'énergie solaire se répartissent en catégories : active, et passive [2].

Les technologies actives convertissent l'énergie solaire en une forme énergétique utilisable, électrique ou thermique. Les cellules photovoltaïques qui transforment directement la lumière en électricité ou encore les capteurs solaires thermiques pour le chauffage de l'eau sanitaire constituent les modalités les plus communes. On peut également évoquer les systèmes de chauffage ou aussi le refroidissement solaire, les concentrateurs solaires, ces derniers étant utilisés avec des miroirs pour capter les rayons du soleil concentrés pour générer une chaleur intense capable de produire la vapeur, elle-même entraînant les turbines pour produire de l'énergie électrique, ainsi que les fours solaires [2].

Les technologies dites passives reposent sur la conception architecturale. Il s'agit d'une orientation du bâtiment par rapport au soleil à la fois efficace, d'une réflexion sur les matériaux d'une part et sur les modèles de construction d'autre part, qui permettent de bénéficier de manière plus ou moins naturelle des apports solaires [2].



Figure I.4: Panneaux solaires.

I.2.5 Énergie éolienne :

Cela fait des milliers d'années que nous avons recours à la force du vent, que ce soit pour déplacer des bateaux ou réaliser diverses opérations dans des moulins. Aujourd'hui, cette ressource est captée par des hélices spécifiques et ensuite convertie en électricité par des dispositifs appropriés, généralement installés sur des sites avec des vents puissants et réguliers, terrestres ou maritimes [2].



Figure I.5: Énergie éolienne.

I.3 Développement des énergies renouvelables en monde :

Selon les estimations de l'AIE, la consommation énergétique mondiale pourrait diminuer d'environ 5 % en 2020. Cette baisse serait particulièrement prononcée dans les transports, avec une chute supérieure à 10 %, tandis que la demande en électricité reculerait plus modérément, de 2,2 %. Fatih Birol, directeur exécutif de l'AIE, qualifie cette année de « pire période pour le secteur énergétique depuis la Seconde Guerre mondiale ». Toutefois, une exception notable se dessine : la production d'électricité renouvelable devrait progresser de près de 7 % à l'échelle mondiale [3].

Cette résilience des énergies renouvelables s'explique, comme le souligne Heymi Bahar, auteur principal du rapport, par plusieurs facteurs : des contrats de long terme, une priorité d'injection sur les réseaux et une croissance soutenue des nouvelles installations. Portées par la Chine et les États-Unis, ces dernières devraient atteindre un niveau record d'environ 200 GW en 2020, représentant près de 90 % de l'augmentation des capacités électriques mondiales cette année. Pour évaluer la production réelle, ces données des capacités installées doivent être rapportées aux facteurs de charge, qui varient selon les filières, les sites et les périodes [3].

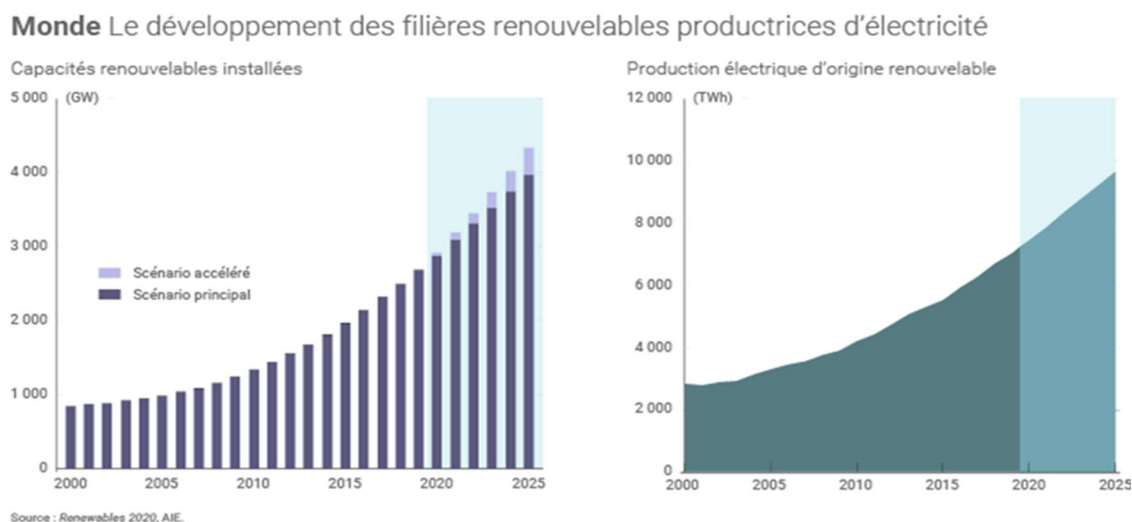


Figure I.6: Développement des capacités d'énergies renouvelables dans le monde.

L'AIE relève que, hors secteur électrique, les énergies renouvelables ont subi les effets de la pandémie de Covid-19. Leur consommation mondiale ne devrait ainsi croître que de 1% en 2020, principalement en raison d'un recul marqué dans les transports, notamment pour les biocarburants, ainsi que dans l'industrie. Fatih Birol a par ailleurs regretté une « opportunité manquée » dans l'aviation, où les aides publiques exceptionnelles ont rarement été assorties des conditions environnementales, à quelques exceptions près comme Air France-KLM, Austrian Airlines et Swiss Air [3].

Selon l'Agence Internationale de l'Énergie (AIE), la production mondiale d'électricité renouvelable pourrait croître de près de 50% d'ici 2025, atteignant 9 745 TWh, soit la consommation annuelle combinée de la Chine et de l'Union européenne. Cette progression porterait la part du renouvelable à 33% de la production électrique mondiale en 2025, dépassant ainsi le charbon [3].

Le solaire photovoltaïque, dont les coûts sont déjà historiquement bas dans plusieurs pays, devrait connaître la croissance la plus dynamique. Il pourrait représenter 60% des nouvelles

capacités renouvelables installées d'ici 2025, un rythme largement influencé par le marché chinois [3].

L'éolien pourrait contribuer à hauteur de 30%, avec une part croissante dédiée à l'offshore. Bien que ces deux filières se développent rapidement, l'hydroélectricité demeurera la principale source renouvelable. Sa part dans la production renouvelable devrait toutefois passer sous les 50% dès 2024 [3].

I.4 Développement des énergies renouvelables en Algérie :

Le gouvernement a approuvé la réactualisation du programme national de développement des énergies renouvelables, réalisé par le ministère de l'énergie. Ce programme réactualisé considère les énergies renouvelables comme l'axe clé de la stratégie algérienne dont les objectifs visent à garantir la préservation des ressources fossiles, la diversification de l'offre électrique et le soutien au développement durable [4].

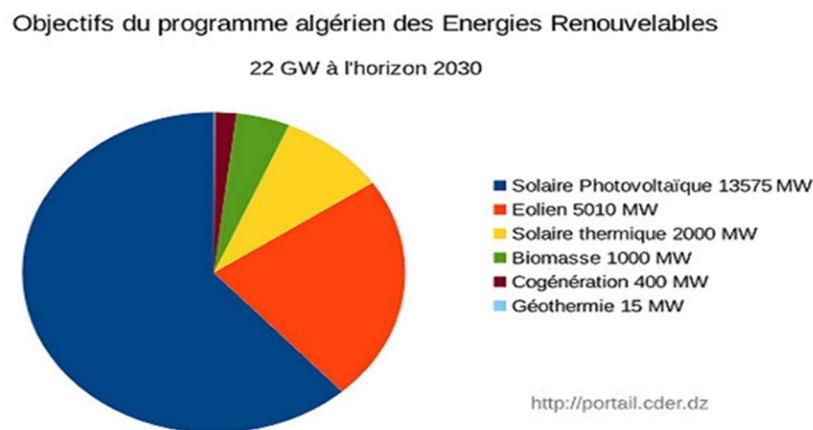


Figure I.7: Répartition d'énergies renouvelables dans l'Algérie.

D'abord, cette réactualisation du programme initial (2011-2030) fait suite à une phase de préfiguration initiée à partir 2013 qui a mis en exergue plusieurs évolutions majeures. D'une part, la plus fine évaluation du potentiel solaire et éolien national, d'autre part, la baisse significative des coûts du photovoltaïque et de l'éolien, les coûts encore trop élevés de la solaire thermodynamique (CSP) au temps finalement mis en place d'un cadre réglementaire attrayant pour les investisseurs [4].

Ainsi, le programme réactualisé met tout d'abord en avant un développement à grande échelle du photovoltaïque et de l'éolien, il intègre la biomasse, la cogénération, la géothermie et reporte au mieux le développement du CSP après 2021. L'objectif spécifique de la période

2015-2030 est de 22 000 MW à réaliser dont plus de 4 500 MW d'ici 2020 pour le marché national [4].

I.5 Généralité sur les systèmes éoliens :

I.5.1 Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable qui exploite la force du vent pour produire de l'électricité. Les éoliennes, munies des pales mises en mouvement par le vent, entraînent un rotor qui actionne une génératrice. L'électricité ainsi produite peut être consommée immédiatement ou stockée dans des batteries pour un usage ultérieur [5].

Considérée comme une énergie propre, l'éolien ne génère ni gaz à effet de serre ni pollution atmosphérique. Elle est en outre abondante et largement disponible à l'échelle mondiale. Toutefois, son développement peut avoir des impacts environnementaux, notamment sur les habitats d'oiseaux et des chauves-souris. Par ailleurs, la production reste intermittente, car elle dépend directement de la variabilité du vent [5].

I.5.2 Historique d'énergie éolienne :

Depuis l'Antiquité, les moulins à vent ont permis de transformer l'énergie du vent en énergie mécanique, principalement pour moudre le grain. Plus tard, des éoliennes ont été associées à des pompes à eau, utilisées pour irriguer les terres arides, assécher les zones humides ou abreuver le bétail. Avec l'avènement de l'électricité, Poul La Cour eut en 1891 l'idée de coupler une turbine éolienne à une génératrice, redonnant ainsi une nouvelle utilité à l'énergie éolienne. Dans les années 1940, le Danemark comptait déjà environ 1300 éoliennes [7].

Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs se sont largement répandus aux États-Unis, où près de 6 millions d'unités furent fabriquées pour fournir de l'électricité aux campagnes isolées. Dans les années 1960, on en recensait environ un million en fonctionnement dans le monde. Toutefois, cette technologie fut progressivement délaissée, avant de connaître un regain d'intérêt à la suite de la crise pétrolière de 1974, qui relança les recherches et les expérimentations sur les éoliennes [7].

À la fin des années 1980, le marché des systèmes éoliens raccordés au réseau à véritablement pris son essor en Europe, aux États-Unis, ainsi qu'en Asie et en Afrique du Nord. En Europe, le leadership fut assuré par le Danemark, principalement en raison de ses faibles ressources énergétiques traditionnelles. Aujourd'hui encore, les Danois conservent une avance considérable à l'échelle mondiale, représentant plus de la moitié des systèmes éoliens vendus [6].

Dans les zones isolées, la rentabilité étant plus facile à atteindre, des petites éoliennes d'une puissance allant des quelques centaines des watts à plusieurs dizaines des kilowatts sont commercialisées depuis longtemps. Par ailleurs, la baisse du coût des cellules photovoltaïques permet désormais de développer des systèmes hybrides associant éolien et solaire. Ces solutions tirent parti de la complémentarité fréquente entre vent et ensoleillement, réduisant ainsi les besoins - et donc les coûts - liés aux batteries des stockages indispensables en site isolé [6].

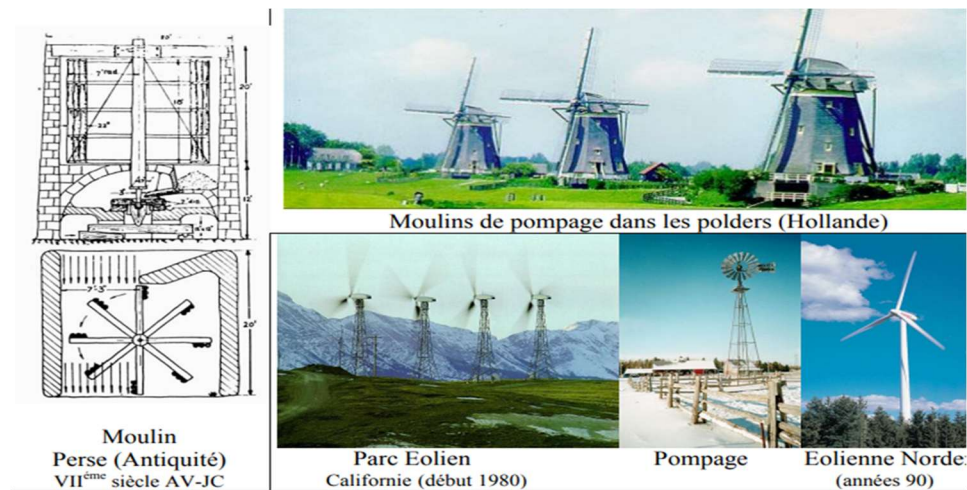


Figure I.8: Les différentes formes d'exploitation de l'énergie éolienne.

I.5.3 Principe de fonctionnement d'énergie éolienne :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- au niveau de la turbine, qui reçoit l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique.
- au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est ensuite transmise au réseau électrique.

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulière de l'énergie ; la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine [8].

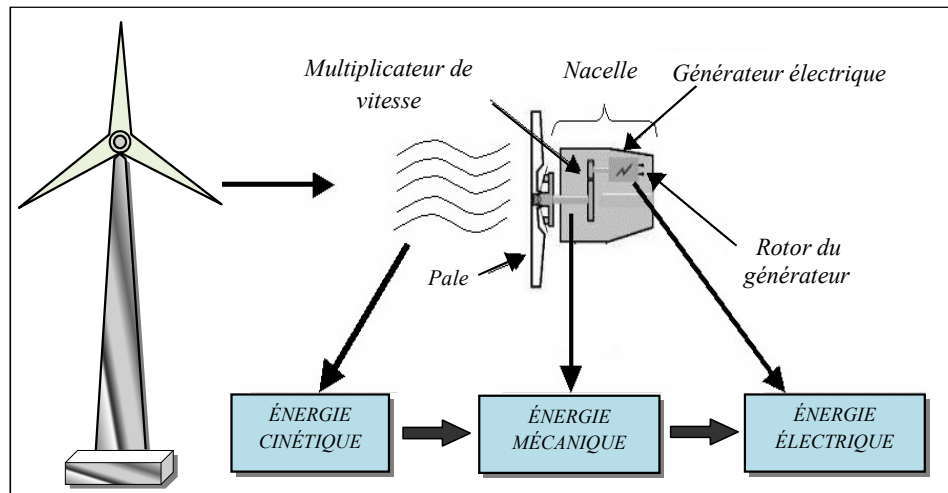


Figure I.9: Principe de la conversion d'énergie.

I.5.4 Développement d'énergies éoliennes en Monde :

Au cours des trente dernières années, l'énergie éolienne a connu un essor remarquable, stimulé notamment par les premiers chocs pétroliers. D'après le Global Wind Energy Council (GWEC), l'année 2021 a représenté la deuxième meilleure performance mondiale du secteur, avec près de 94 GW des nouvelles capacités installées.

Si l'Europe, l'Amérique latine, l'Afrique et le Moyen-Orient ont enregistré des progressions inédites en matière d'installations terrestres, le volume global des nouvelles centrales éoliennes terrestres en 2021 reste inférieur de 18 % à celui de l'année précédente. Ce recul s'explique principalement par le ralentissement du marché en Chine et aux États-Unis, les deux leaders mondiaux du secteur. En revanche, la Chine a dominé le développement de l'éolien offshore, représentant à elle seule 80 % des nouvelles capacités mondiales en 2021. Sa puissance cumulée offshore atteint ainsi 27,7 GW, un niveau exceptionnel que l'Europe n'a atteint qu'après trois décennies de développement [9].

I.5.5 Développement d'énergies éoliennes en Algérie :

L'Algérie possède un potentiel éolien considérable, comme l'indique la figure I.1. Selon la carte des vents élaborée par le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), le pays bénéficie d'un régime du vent modéré, généralement compris entre 2 et 6 m/s. Toutefois, en raison de l'étendue géographique du territoire, ce potentiel varie sensiblement d'une région à l'autre [9].

Dans le nord, les vitesses du vent restent modestes, oscillant entre 1 et 4 m/s, avec la présence des microclimats notamment autour d'Annaba, d'Oran et des hauts plateaux. Ce type de ressource énergétique, bien que limité pour la production d'électricité à grande échelle, se révèle particulièrement adapté à des applications locales telles que le pompage de l'eau [9].

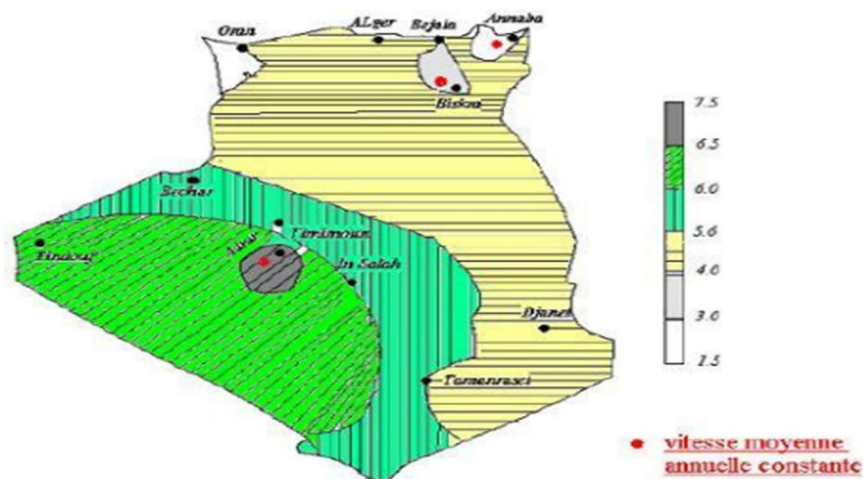


Figure I.10: Carte potentiel de l'énergie éolienne en Algérie.

L'énergie éolienne constitue le deuxième axe majeur du développement des énergies renouvelables en Algérie, après le solaire, notamment dans le sud-ouest saharien. La wilaya d'Adrar a bénéficié d'un projet de parc éolien réalisé dans le cadre d'un partenariat algérois-français. Ce parc, implanté dans la région de Kabertene à 80 Km au nord d'Adrar, comprend 12 éoliennes de 850 Kw chacune, fournies par la société espagnole Gamesa. À une vitesse du vent de 8 m/s, l'installation atteint une puissance totale de 10 MW, et les éoliennes sont raccordées au réseau de transport [9].

Dans le cadre de la planification, le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) est chargé d'identifier les sites favorables à l'implantation des nouveaux parcs éoliens dans le sud algérien, en particulier dans des zones telles que Touggourt, Hassi Messaoud et Ghardaïa [9].



Figure I.11: Ferme éolienne de Kabertene à Adrar.

I.5.6 Les types des turbines éoliennes :

Il existe de nos jours plusieurs sortes d'éoliennes parmi ces deux grandes catégories : les éoliennes à axe vertical et celles à axe horizontal.

I.5.6.1 Éolienne à axe vertical (VAWT) :

Ce type d'éolienne possède un axe monté verticalement par rapport au sol, perpendiculaire à la direction du vent. Cette configuration permet d'installer le multiplicateur et la génératrice directement au sol, ce qui facilite la maintenance et réduit les coûts. En revanche, elle exploite un vent situé près du sol, généralement moins puissant car ralenti par le relief [10].

Grâce à son axe vertical, l'éolienne présente une symétrie de révolution : elle peut capter le vent quelle que soit sa direction, sans nécessiter l'orientation du rotor. Toutefois, elle ne peut pas démarrer seule ; il faut l'impulser manuellement dès qu'un vent suffisamment fort apparaît pour enclencher la production [10].



Figure I.12: Les éoliennes à axe vertical.

Ces éoliennes occupent plus d'espace au sol que les modèles à tour classique, car elles nécessitent des longs haubans pour être stabilisées. Les câbles doivent passer au-dessus des pales, ce qui complique leur installation, notamment sur des terrains agricoles [10].

En plus de cette contrainte d'implantation, leur rendement énergétique relativement faible a freiné leur développement. C'est pourquoi les éoliennes à axe horizontal, plus efficaces et pratiques, se sont largement imposées [10].

I.5.6.2 Éolienne à axe horizontal (HAWT) :

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues, bien qu'elles nécessitent généralement un système d'orientation des pales ainsi qu'une nacelle regroupant l'ensemble de

la chaîne de conversion. Leur principal atout réside dans un rendement aérodynamique supérieur à celui des éoliennes à axe vertical. De plus, elles peuvent démarrer de manière autonome et occupent peu d'espace au sol. Selon les conceptions, ces aérogénérateurs peuvent être équipés des deux pales, des trois pales la configuration la plus courante ou encore de multiples pales [7].



Figure I.13: L'éolienne à axe horizontal.

Les éoliennes à axe horizontal se divisent en deux grandes catégories :

Éoliennes en amont (Up Wind) : le vent frappe d'abord les pales avant d'atteindre la nacelle. Les pales sont rigides et le rotor doit être orienté face au vent grâce à un système de direction (un simple gouvernail pour les petites puissances, ou un dispositif actif pour les grandes puissances) [11].

Éoliennes en aval (Down Wind) : le vent passe d'abord par la nacelle et le mât, puis atteint l'arrière des pales. Ce type de rotor s'oriente automatiquement dans la direction du vent. Cependant, cette configuration est moins utilisée car le passage du vent par la nacelle et le pylône crée des perturbations, ce qui réduit le rendement et la stabilité, surtout pour les grandes puissances [11].

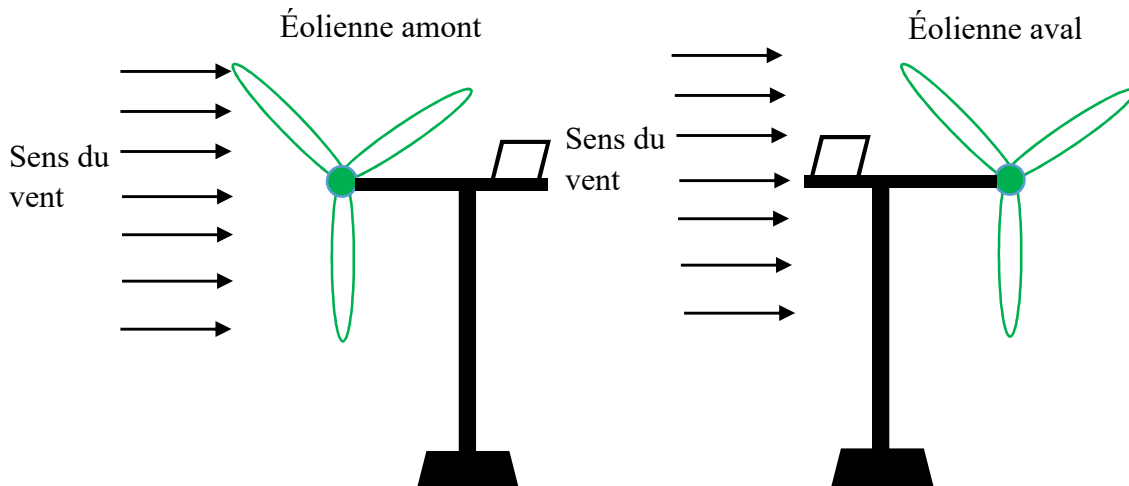


Figure I.14: Types d'éoliennes selon la direction du vent : amont et aval.

I.5.7 Classification des turbines éolienne :

I.5.7.1 Les éoliennes à vitesse fixe :

Dans ce cas, le générateur généralement basé sur des machines asynchrones, fonctionne à vitesse fixe ou varie très lentement grâce au réglage du glissement de la machine. Deux types des génératrices sont utilisés dans cette configuration :

Un générateur asynchrone dimensionné pour des faibles puissances, adapté aux vitesses du vent réduites, un générateur conçu pour des fortes puissances, correspondant aux vitesses du vent plus élevées [10].

Le principal inconvénient de cette solution réside dans la complexité du montage, qui entraîne une augmentation de la masse de l'ensemble.

Les premières éoliennes de grande puissance ont été équipées des machines asynchrones à cage directement couplées au réseau électrique (**voir Figure I.15**). Ces machines sont entraînées par un multiplicateur de vitesse, et leur régime est maintenu approximativement constant grâce à un système mécanique d'orientation des pales (pitch control) [10].

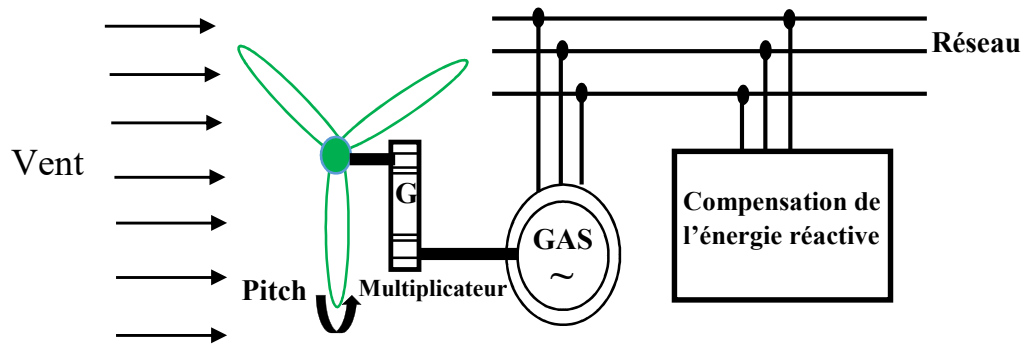


Figure I.15: Éolienne à vitesse fixe utilisant une génératrice asynchrone.

I.5.7.2 Les éoliennes à vitesse variable :

Les éoliennes modernes fonctionnent généralement en vitesse variable. Cela signifie que la vitesse de rotation de la turbine n'est pas directement liée à la fréquence du réseau électrique. L'intérêt principal de cette technologie est qu'elle permet d'adapter la vitesse de la turbine au vent, afin de capter le maximum d'énergie disponible [10].

Pour ce type d'éoliennes, on utilise principalement trois sortes des génératrices [10] :

- La génératrice synchrone.
- La génératrice asynchrone.
- La génératrice asynchrone à double alimentation.

I.5.8 Les principaux composants d'une éolienne :

Une éolienne se compose généralement : d'un rotor, d'une nacelle et d'un mât [12].

- **Le rotor** est constitué des pales qui prennent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en un mouvement de rotation.
- **La nacelle** abrite la génératrice qui transforme l'énergie mécanique en électricité. Elle reçoit par ailleurs des dispositifs de régulation et de freinage qui se déclenchent en cas du vent trop fort.
- **Le mât** et ses fondations supportent l'ensemble rotor-nacelle. Ils sont dimensionnés pour résister aux différentes sollicitations mécaniques. La hauteur du mât, qui varie d'un modèle à l'autre et selon les conditions du vent visées, se situe généralement entre 10 et 100 mètres.

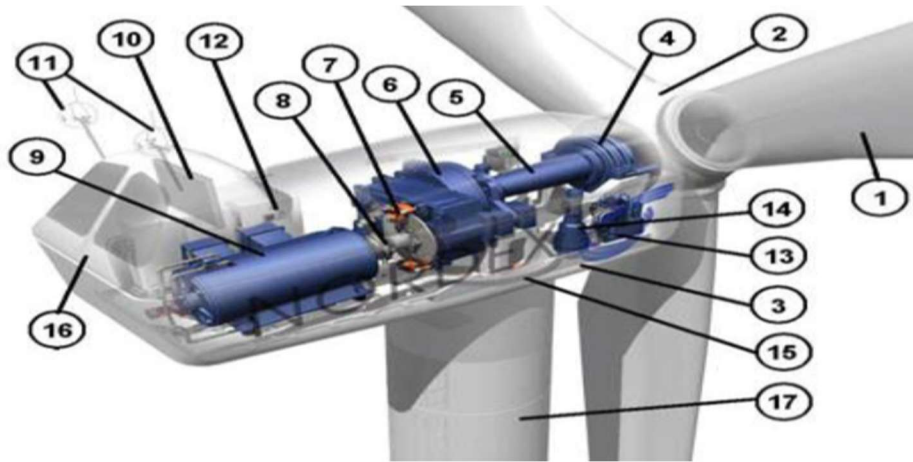


Figure I.16: Principales composantes de l'éolienne.

- 1 : Pales** en composite fibre de verre. Pas fixe, profil de type stall (décrochage aérodynamique).
- 2 : Moyeu** du rotor en fonte.
- 3 : Structure de la turbine** en fonte ductile ou en acier soudé galvanisé à chaud.
- 4 : Paliers** du rotor à double rangée de billes.
- 5 : Arbre lent** du rotor en acier haute résistance.
- 6 : Multiplicateur** de vitesse.
- 7 : Frein à disque** sur l'arbre rapide avec témoin d'usure.
- 8 : Accouplement** avec la génératrice de type flexible.
- 9 : Génératrice** asynchrone.
- 10 : Radiateur de refroidissement** intégré au système multiplicateur-génératrice.
- 11 : Système de mesure de vent** (anémomètre et girouette).
- 12 : Système de contrôle** surveille et pilote la turbine.
- 13 : Système hydraulique** pour les freins d'extrémité de la pale et le système d'orientation.
- 14 : Entraînement d'orientation** de la tourelle à deux trains d'engrenages.
- 15 : Paliers du système d'orientation** équipés d'un frein à disque.
- 16 : Capot de la nacelle** en structure acier recouvert de composite fibre de verre.
- 17 : Tour** en acier tubulaire (plusieurs hauteurs possibles).

I.5.9 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne :**I.5.9.1 Systèmes à décrochage aérodynamique « Stall » :**

Il s'agit d'un régulateur basé sur un décrochage aérodynamique, c'est-à-dire que les pales peuvent évoluer géométriquement selon le rapport entre la vitesse du vent et la vitesse des turbines. C'est cette évolution qui permet le décrochage au-delà d'une certaine vitesse du vent, ce qui dépend principalement de l'angle de calage des pales elles-mêmes, qui peuvent avoir un pas variable le long de leur profil et jusqu'à incorporer un frein en extrémité. Pour récupérer de l'énergie de façon optimale selon le contrôle par décrochage (Stall Control), on peut l'associer à une machine à double vitesse de rotation, ce qui élargit la plage de production tout en lui donnant le même aspect que celui obtenu avec le contrôle par orientation (Pitch Control). Or certaines éoliennes sont équipées d'un dispositif hybride, le stall actif, qui combine les avantages de ces deux types des régulateurs, le décrochage aérodynamique s'obtient alors de façon progressive grâce à une légère orientation des pales, nécessitant des organes de réglage beaucoup moins onéreux et sensibles que ceux exigés par le contrôle Pitch Control [13].

I.5.9.2 Système d'orientation des pales (Pitch Control) :

Le dispositif de réglage de l'angle de calage des pales a pour but de réguler la puissance générée. Au-delà de la vitesse nominale, un mécanisme de commande appelé contrôle d'angle de calage d'orientation des pales. En ajustant l'angle β , il réduit le coefficient de puissance afin de limiter l'énergie qui peut être captée [13].

I.6 Type des systèmes :

Les systèmes de production d'énergie se divisent en deux catégories : autonomes et connectés au réseau [14].

I.6.1 Systèmes autonomes :

Ces installations fonctionnent indépendamment de toute autre source d'énergie et fournissent de l'électricité sans connexion au réseau. Elles nécessitent généralement un dispositif de stockage. Employées principalement pour alimenter des sites isolés (maisons, îles, zones montagneuses) ou des applications spécifiques (surveillance à distance, pompage d'eau), elles sont déployées lorsque leur coût constitue l'option la plus économique [14].

I.6.2 Systèmes connectés au réseau :

Ces systèmes sont raccordés au réseau électrique via des convertisseurs de puissance. L'énergie étant stockée dans le réseau lui-même, des accumulateurs ne sont requis que pour assurer une autonomie en cas de coupure. L'électricité produite est d'abord consommée

localement, tout sur plus étant injecté dans le réseau, lequel prend le relais en l'absence de soleil ou de vent [14].

I.7 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

Tableau I.1: Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne [15] [16] :

Avantages	Inconvénients
Énergie naturelle, renouvelable et durable.	L'impact visuel et l'impact sonore.
Énergie propre et non polluante.	La qualité de la puissance produite n'est pas toujours très bonne.
C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelable.	La puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante.
Le cout d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.	Le bruit, il a nettement diminué, surtout le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur.
Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.	Les pales d'éoliennes représentent un danger pour les oiseaux.

I.8 Conclusion :

Dans ce chapitre, on a présenté une description générale des cinq familles d'énergies renouvelables. À travers cette étude, nous avons montré que l'importance accordée à ces sources d'énergie devient de plus en plus grande au niveau mondial, en raison de leurs avantages environnementaux et économiques.

Comme notre travail porte sur un système éolien, une attention particulière a été consacrée à l'énergie éolienne, en présentant son principe de fonctionnement, ses différents types de turbines, ses composants ainsi que ses systèmes de régulation. Finalement on a terminé ce chapitre par les avantages et désavantages de l'énergie l'éolienne.

Le deuxième chapitre de nos travaux, est consacré à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne.

Chapitre II :

*Modélisation de la
turbine éolienne*

II.1 Introduction :

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne est une étape primordiale dans la compréhension du système éolien. Cette étape permet, dans un premier lieu, de comprendre le comportement dynamique et l'interaction entre les forces aérodynamiques et la structure mécanique de la turbine. Avec un modèle approprié de la ressource éolienne et de la capture de puissance, nous pouvons nous orienter plus facilement vers une stratégie de commande optimale.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement à la modélisation de la turbine éolienne de 10 Kw. Dans un premier temps, les différentes composantes constituant l'éolienne seront modélisées mathématiquement, incluant le modèle du vent, le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$, ainsi que le multiplicateur de vitesse de gain G qui lie la turbine à l'arbre de transmission.

En deuxième étape, ce travail est consacré à l'étude et simulation de la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking). L'objectif est de contrôler la puissance mécanique délivrée par la turbine afin d'extraire le maximum d'énergie, quel que soit le profil de vent appliqué. Nous explorerons deux approches distinctes pour cette régulation : l'une sans asservissement de vitesse et l'autre avec asservissement de vitesse mécanique utilisant un régulateur classique Proportional-Integral (RC-PI).

Cette modélisation aérodynamique rigoureuse permet de maximiser le rendement de la turbine en maintenant le rapport de vitesse λ à sa valeur optimale. L'ensemble des éléments de cette chaîne de conversion a été simulé sous l'environnement MATLAB/SIMULINKTM afin de valider les performances du système et sa capacité à s'adapter aux variations de la vitesse du vent.

II.2 Description de Système de conversion éolienne à base de la GADA :

Le système de conversion d'énergie éolienne à vitesse variable, intégrant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Cette étude porte sur une éolienne d'une puissance nominale de 10 Kw, constituée de trois pales de longueur R , fixées sur un arbre rotatif et couplées à un multiplicateur G qui entraîne une génératrice électrique, Comme l'illustre la figure II.1.

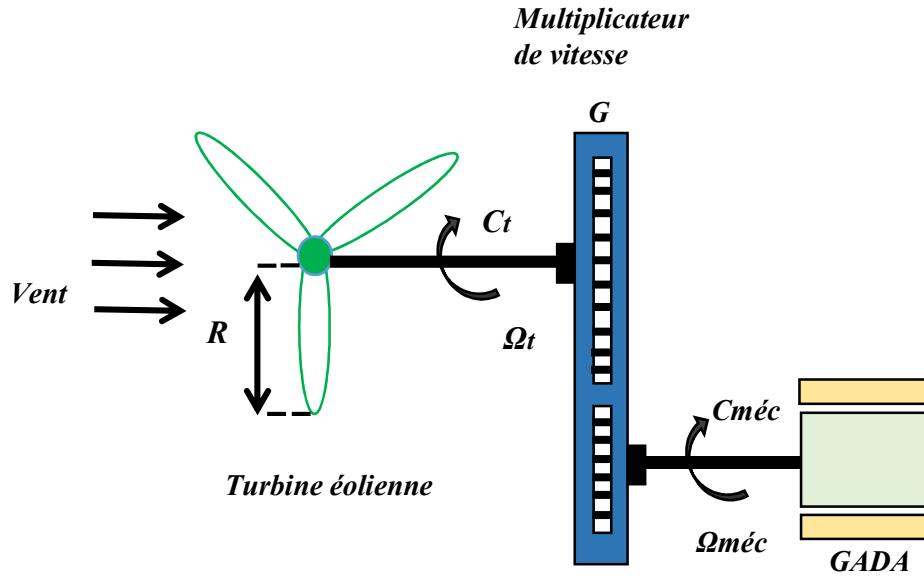


Figure II.1: Système de conversion éolienne.

II.3 Modélisation mathématique de la turbine éolienne :

II.3.1 Modèle du vent :

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [18].

La modélisation du vent est essentielle que ce soit pour [18] :

- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- Evaluer le potentiel d'énergie utilisable.
- Fournir une aide pour l'implantation des machines.

La définition du modèle nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an (saison) concernée par l'étude. A titre d'exemple, le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui le présente comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques, il est donné par l'équation suivant [18] :

$$V(t) = A + \sum_{k=1}^i a_K \sin(\omega_k t) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

A : La valeur moyenne de la vitesse du vent ;

a_k : Amplitude de l'harmonique de l'ordre k ;

ω_k : Pulsation de l'harmonique de l'ordre k ;

i : Le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

Dans le cadre de cette étude, l'évolution de la vitesse du vent est représentée par une fonction scalaire dépendante du temps. Cette modélisation déterministe s'appuie sur une somme de plusieurs harmoniques, en accord avec [19] :

$$v(t) = 8.2 + 2 \sin(\omega t) - 1.75 \sin(3\omega t) + 1.5 \sin(5\omega t) - 1.25 \sin(10\omega t) + \sin(30\omega t) + 0.5 \sin(50\omega t) + 0.25 \sin(100\omega t) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

$$\omega = 2\pi/10$$

ω : C'est la pulsation.

II.3.2 Modélisation de la chaîne de conversion :

La compréhension du comportement de la turbine requiert un modèle dynamique intégrant l'ensemble de ces paramètres. Le recours à la modélisation s'impose désormais comme une nécessité pour maîtriser ses performances et garantir les caractéristiques opérationnelles souhaitées [20].

II.3.3 Modélisation de la turbine :

Une éolienne constitue un mécanisme convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Cette conversion s'effectue à partir de l'énergie cinétique des particules d'air en mouvement traversant la section de la surface active S du rotor [20].

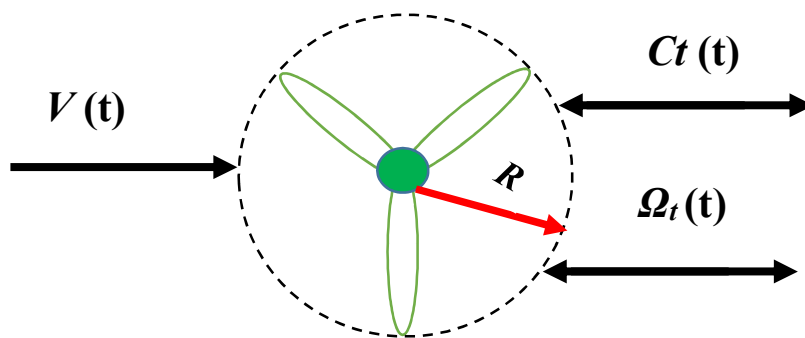


Figure II.2: Modèle de la turbine éolienne.

Pour modéliser la turbine, nous nous basons sur plusieurs hypothèses simplificatrices couramment admises. Ainsi, nous considérons que [27] :

- Les trois pales sont identiques en conception, présentant ainsi la même inertie, la même élasticité et le même coefficient de frottement vis-à-vis de l'air.

- Les trois pales sont orientables et possèdent un coefficient de frottement identique par rapport au support.
- La distribution de la vitesse du vent est uniforme sur l'ensemble des pales, ce qui entraîne une égalité des forces de poussée.
- Le coefficient de frottement des pales par rapport à l'air est négligeable.
- La vitesse de rotation de la turbine étant très faible, les pertes par frottement au niveau de la turbine sont négligeables comparées à celles de la génératrice.

II.3.3.1 Puissance du vent :

La puissance cinétique du vent à travers un disque éolien de rayon R , est donnée par l'équation suivante [19] :

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

Avec :

P_v : La puissance du vent (W) ;

ρ : Masse volumique de l'air (1.225 Kg/m³ en atmosphère normale) ;

S : C'est la surface circulaire balayée par la turbine, le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale ;

R : La longueur de la pale ;

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

II.3.3.2 Puissance aérodynamique :

Toutefois, toute l'énergie ne peut être captée, car la vitesse du vent n'est pas nulle après l'éolienne. On introduit alors un coefficient C_p appelé coefficient de performance ou de puissance, qui dépend des caractéristiques aérodynamiques des pales. Ce coefficient correspond au rendement du rotor de l'éolienne. La puissance sur l'arbre du rotor ou la puissance aérodynamique P_t apparaissant au niveau du rotor de la turbine s'écrit [19] :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p (\lambda, \beta) \quad (\text{II.4})$$

II.3.3.3 Coefficient de puissance C_p :

Le coefficient de puissance C_p est déterminé par le nombre de pales du rotor ainsi que par leurs caractéristiques géométriques et aérodynamiques, telles que la longueur et le profil

des sections. Ces éléments sont définis en tenant compte des spécificités du site d'implantation, de la puissance nominale visée, du mode de régulation (par orientation des pales ou par décrochage aérodynamique) et du régime de fonctionnement (à vitesse constante ou variable) [23].

La littérature scientifique propose diverses approximations numériques pour modéliser le coefficient C_p , parmi lesquelles plusieurs formulations ont été avancées [14]. Dans le cadre de cette étude, nous retenons une expression approchée du coefficient de puissance, fonction de la vitesse relative λ et de l'angle de calage β [24].

Cette expression est définie comme suit :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left(116 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - 0.4\beta - 5 \right) \exp \left(-21 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) + 0.0068\lambda \right) \quad (\text{II.5})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R}{v} \quad (\text{II.6})$$

λ : est le ratio de vitesse défini comme étant le rapport entre la vitesse linéaire des pales

$(\Omega_t \cdot R)$ et la vitesse du vent v .

β : angle d'orientation des pales ;

Ω_t : est la vitesse de la turbine en (rad/s).

II.3.3.4 Le couple aérodynamique :

Le couple aérodynamique (C_t) représente le couple mécanique produit par les pales de l'éolienne sous l'action du vent. Il assure la rotation du rotor et la transmission de l'énergie mécanique vers le générateur. Est déterminé par la relation suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 v^3 C_p(\lambda, \beta) \frac{1}{\Omega_t} = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 v^2 C_c(\lambda, \beta) \quad (\text{II.7})$$

Où :

C_c : Représente le coefficient du couple avec :

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{II.8})$$

II.3.4 Modélisation de Multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur constitue l'élément de liaison entre la turbine et la génératrice, permettant d'adapter la vitesse de rotation de la turbine (arbre lent) à celle requise par la génératrice (arbre rapide). En effet, la vitesse de la turbine éolienne, qui se situe entre 5 et 25 tours par minute, nécessite l'ajout d'un multiplicateur de vitesse afin d'atteindre les régimes de rotation de la génératrice asynchrone, lesquels varient généralement entre 1000 et 2000 tours par minute [25].



Figure II.3: Multiplicateur de vitesse.

En considérant que le multiplicateur est idéal, c'est-à-dire que les pertes mécaniques sont négligeables, Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les deux équations suivantes :

$$C_{méc} = \frac{C_t}{G} \quad (II.9)$$

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (II.10)$$

Avec :

$C_{méc}$: Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;

$\Omega_{méc}$: Vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice ;

C_t : Couple de la turbine (aérodynamique) ;

Ω_t : Vitesse de la turbine ;

G : Gain du multiplicateur.

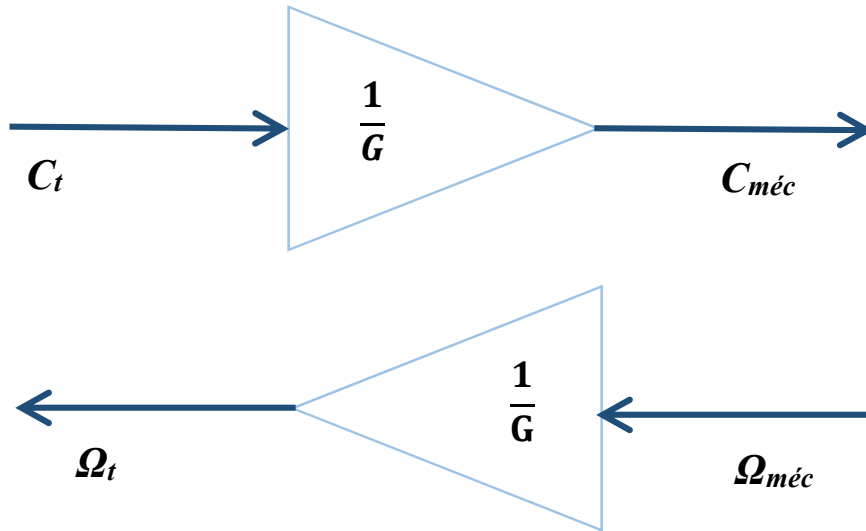


Figure II.4: Model d'un multiplicateur.

II.3.5 Modèle de la partie mécanique :

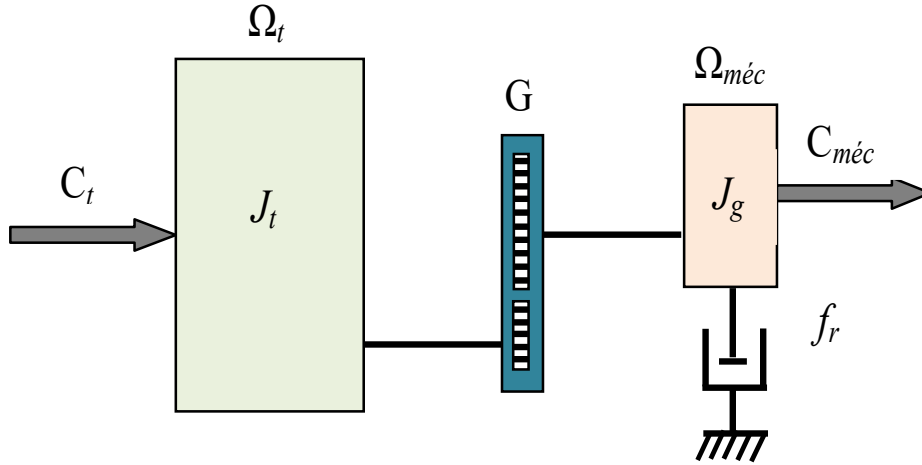


Figure II.5: Modèle mécanique de la turbine éolienne.

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J_t et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale J_T constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice J_g [19] :

$$J_T = \frac{J_t}{G^2} + J_g \quad (\text{II.11})$$

D'après la figure II.5, nous pouvons écrire l'équation fondamentale de la dynamique du système mécanique sur l'arbre mécanique de la génératrice par

$$J_T \frac{d\Omega_{méc}}{dt} + C_f = C_{méc} - C_{em} \quad (\text{II.12})$$

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

$$C_f = f_r \Omega_{méc} \quad (II.13)$$

Avec :

f_r : Le coefficient dû aux frottements visqueux de la génératrice.

II.4 Schéma bloc du modèle de la turbine :

Le schéma bloc de la figure II.6 correspond aux modélisations aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc montre que la vitesse de rotation $\Omega_{méc}$ de la génératrice, donc de la turbine, peut être contrôlée par action soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} de la GADA. La vitesse du vent v est considérée comme une entrée perturbatrice au système.

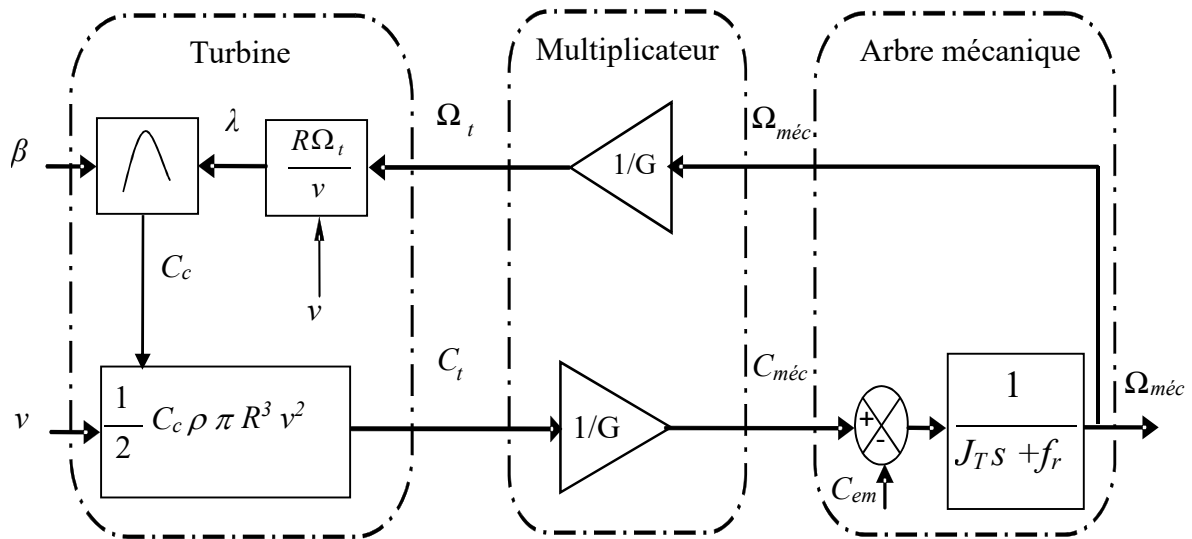


Figure II.6: Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

II.5 Stratégie de commande de la turbine éolienne :

Aujourd'hui, les énergies éoliennes jouent un rôle très important dans la production d'électricité, surtout avec la diminution des ressources classiques et la protection de l'environnement.

L'énergie éolienne est largement utilisée grâce à sa disponibilité et son faible impact sur la nature. Cependant, la vitesse du vent change tout le temps, ce qui rend l'exploitation de cette énergie plus difficile.

Pour résoudre ce problème, on utilise des techniques de commande comme le MPPT. Cette méthode permet de récupérer le maximum de puissance possible en ajustant le fonctionnement de la turbine selon les conditions du vent.

Trois zones principales de fonctionnement peuvent être distinguées [21] :

- ❖ **Zone 1** : la vitesse du vent est faible, insuffisante pour permettre de démarrer l'éolienne ; la vitesse de rotation et la puissance mécanique sont alors égales à zéro.
- ❖ **Zone 2** : le vent atteint une vitesse minimale v_{min} pour permettre le démarrage. Une fois ce démarrage effectué, l'éolienne va fonctionner de manière à extraire le maximum de puissance disponible pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne la vitesse nominale v_n correspondant aux valeurs nominales de la puissance mécanique P_n et de la vitesse de rotation Ω_n .
- ❖ **Zone 3** : le vent atteint des vitesses élevées supérieures à la vitesse nominale, la vitesse de rotation et la puissance mécanique doivent être maintenues à leur valeurs nominales afin de ne pas détériorer l'éolienne. Ces limitations peuvent s'effectuer, par exemple, en orientant les pales de l'éolienne afin de dégrader le rendement de l'éolienne (augmentation de l'angle de calage des pales β). Dès que le vent a atteint sa valeur maximale v_{max} , une procédure d'arrêt de l'éolienne est effectuée afin d'éviter toute destruction de celle-ci.

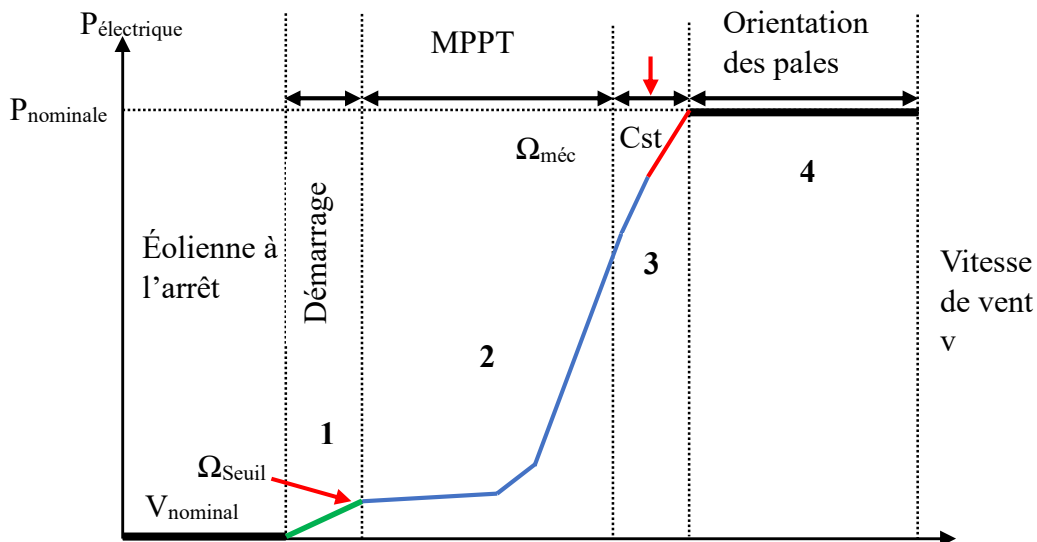


Figure II.7: Zones de fonctionnement de la turbine éolienne.

Nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2. En effet, dans cette zone, nous considérerons que l'angle de calage des pales β est constant. Un fonctionnement en zone 3 aurait uniquement pour

conséquence une modification de cet angle afin de limiter la puissance mécanique pour éviter toute destruction de l'éolienne [21].

Dans la Zone 2, il existe différentes stratégies de commande pour contrôler le couple électromagnétique de la GADA afin de régler la vitesse de rotation de manière à maximiser la puissance électrique produite. Ce principe est connu sous la terminologie MPPT. On peut distinguer deux modes de contrôle [21] :

- Le contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique ;
- Le contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique.

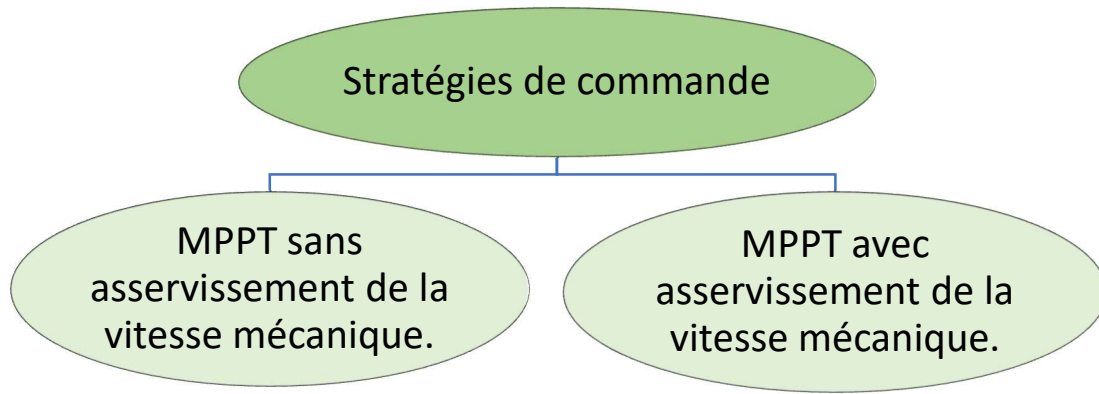


Figure II.8: Stratégies de commande MPPT.

II.5.1 Contrôle sans asservissement de la vitesse mécanique :

Ce principe de régulation s'appuie sur la supposition qu'en régime établi, la variation de la vitesse du vent est négligeable devant les constantes de temps électriques du système éolien. Cette hypothèse conduit à considérer le couple d'accélération de la turbine comme nul. Dans ce cas, l'équation dynamique de la turbine permet d'établir la relation suivante [19] :

$$J_T \frac{d\Omega_{méc}}{dt} = C_{méc} - C_{em} - C_f = 0 \quad (II.14)$$

De plus, en considérant que le couple induit par les frottements visqueux ($C_f = f_r \Omega_{méc} = 0$) est négligeable devant le couple mécanique C_{em} , l'expression peut se simplifier comme suit :

$$C_{méc} = C_{em} \quad (II.15)$$

La vitesse mécanique de la turbine, désignée par $\hat{\Omega}_t$, est estimée à partir de la mesure de la vitesse mécanique du groupe GADA :

$$\hat{\Omega}_t = \frac{\Omega_{méc}}{G} \quad (II.16)$$

Étant donné la difficulté d'obtenir une mesure précise de la vitesse du vent, celle-ci est estimée, notée $\hat{v}$, à partir de l'évaluation de la vitesse mécanique de la turbine :

$$\hat{v} = \frac{\hat{\Omega}_t R}{\lambda_{opt}} \quad (II.17)$$

Le couple de la turbine éolienne peut être déterminé à partir des estimations de la vitesse du vent et de la vitesse mécanique de la turbine. Il est exprimé par la relation suivante :

$$\hat{C}_t = \frac{1}{2} C_{c-max} \rho \pi R^3 \hat{v}^2 \quad (II.18)$$

Remplaçant maintenant (II.17) dans (II.18), on obtient la formulation suivante pour le couple de la turbine de référence :

$$\hat{C}_t^* = \frac{1}{2 \lambda_{opt}^2} C_{c-max} \rho \pi R^5 \hat{\Omega}_t^2 \quad (II.19)$$

Le couple électromagnétique de référence est ensuite déterminé sur la base de l'estimation du couple généré par la turbine éolienne :

$$\hat{C}_{em}^* = \hat{C}_{méc}^* = \frac{\hat{C}_t^*}{G} = \frac{1}{2 G \lambda_{opt}^2} C_{c-max} \rho \pi R^5 \hat{\Omega}_t^2 \quad (II.20)$$

Le schéma de principe du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique est montré à la figure II.9.

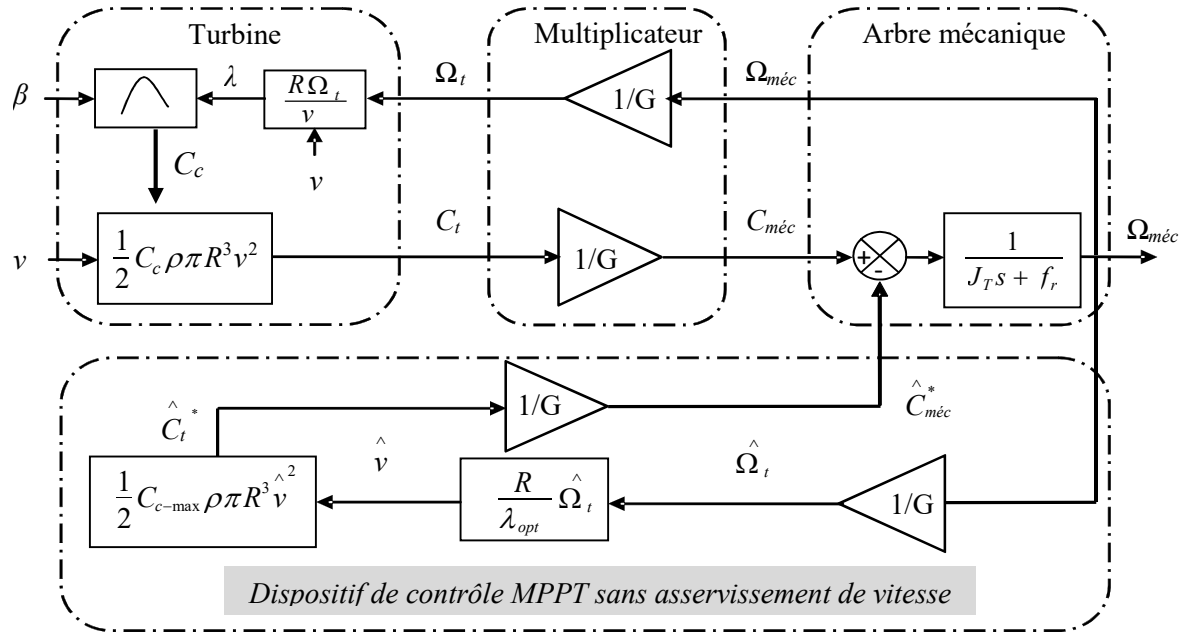


Figure II.9: Contrôle MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.

II.5.2 Contrôle avec asservissement de la vitesse mécanique :

Cette stratégie vise à maintenir l'éolienne à son point de fonctionnement optimal. L'asservissement de la vitesse permet de réguler la vitesse de la génératrice sur sa valeur de référence, afin de maximiser la puissance produite par le contrôle du couple électromagnétique. La prise en compte du gain du multiplicateur est donc nécessaire [19].

La vitesse mécanique de référence de la GADA est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\Omega_{méc}^* = G \Omega_t^* \quad (II.21)$$

Avec :

$$\Omega_t^* = \frac{\lambda_{opt} v}{R} \quad (II.22)$$

Le couple électromagnétique de référence $C_{méc}^*$ permettent d'obtenir une vitesse mécanique de la génératrice égale à la vitesse de référence $\Omega_{méc}^*$ est obtenu par une relation inverse indirecte :

$$C_{méc}^* = R(\Omega_{méc}) (\Omega_{méc}^* - \Omega_{méc}) \quad (II.23)$$

Avec :

$R(\Omega_{méc})$: C'est le régulateur classique de vitesse (RC-PI).

Le schéma de principe du contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique est montré à la figure II.10.

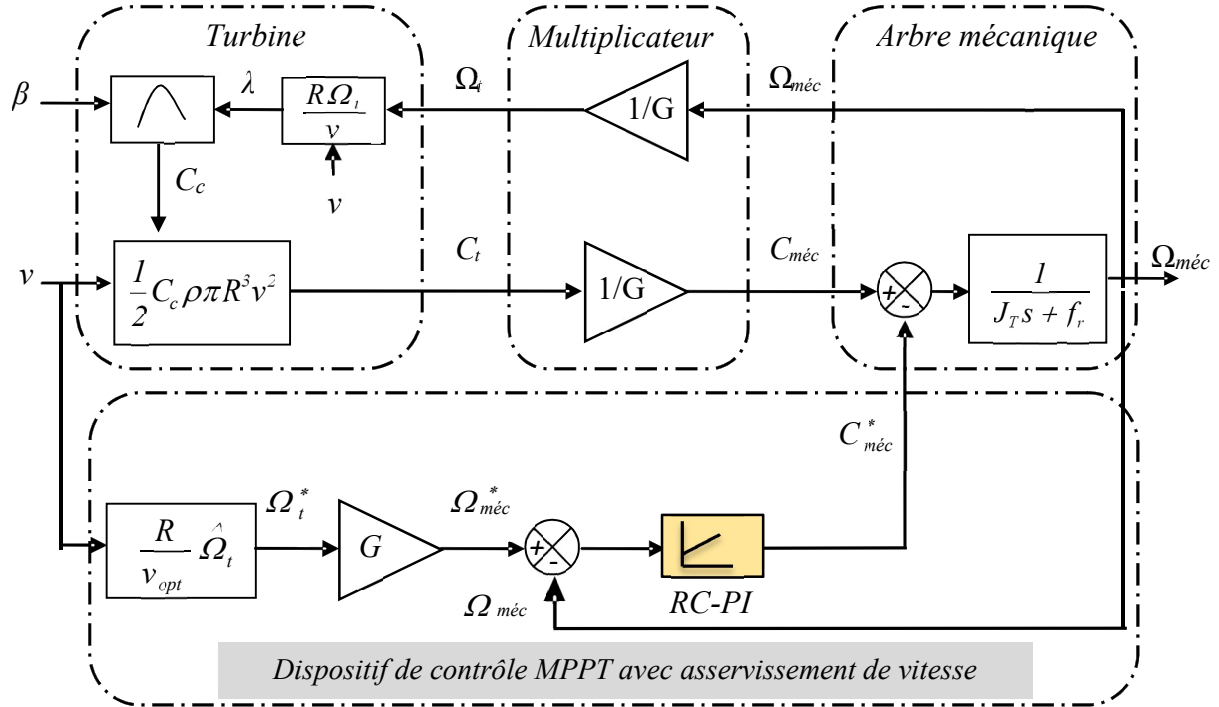


Figure II.10: Contrôle MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

II.6 Présentation De L'environnement MATLAB Simulink™ :

Simulink™ est un logiciel utilisé pour la modélisation, la simulation et l'analyse des systèmes dynamiques, dont le comportement change avec le temps. Développé par The MathWorks Inc (une société américaine spécialisée dans le développement de logiciels de calcul scientifique et d'ingénierie, notamment MATLAB et Simulink), il est intégré à MATLAB et permet de représenter les systèmes à l'aide de schémas à blocs. Il dispose également d'un outil de simulation adapté aux systèmes décrits par des équations différentielles. Grâce à son interface graphique simple, Simulink facilite l'étude et l'analyse des systèmes dans le domaine temporel et fréquentiel [20].

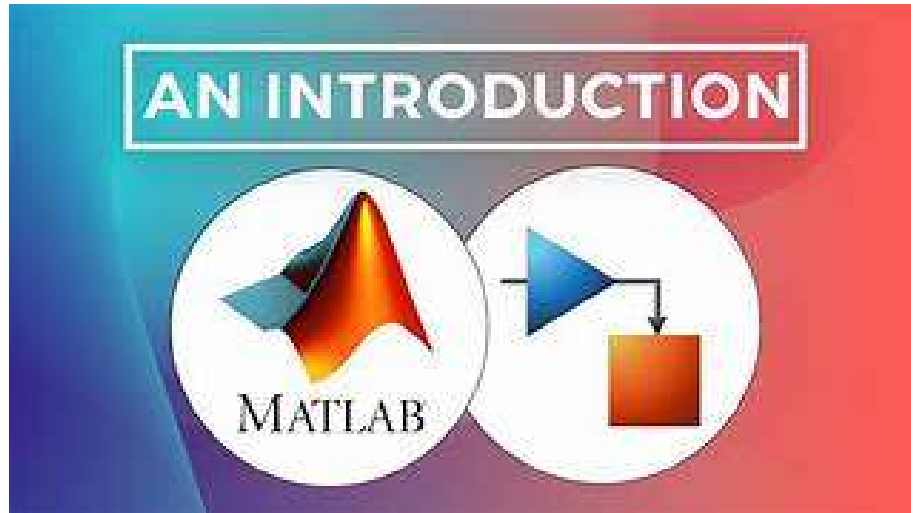


Figure II.11: Présentation de l'environnement MATLAB-Simulink™.

II.7 Résultats de simulation et interprétation :

II.7.1 Profil du vent appliqué au système étudié :

Afin d'analyser les performances des deux stratégies de commande MPPT étudiées, nous avons appliqué le profil de vitesse du vent présenté sur la figure II.12 :

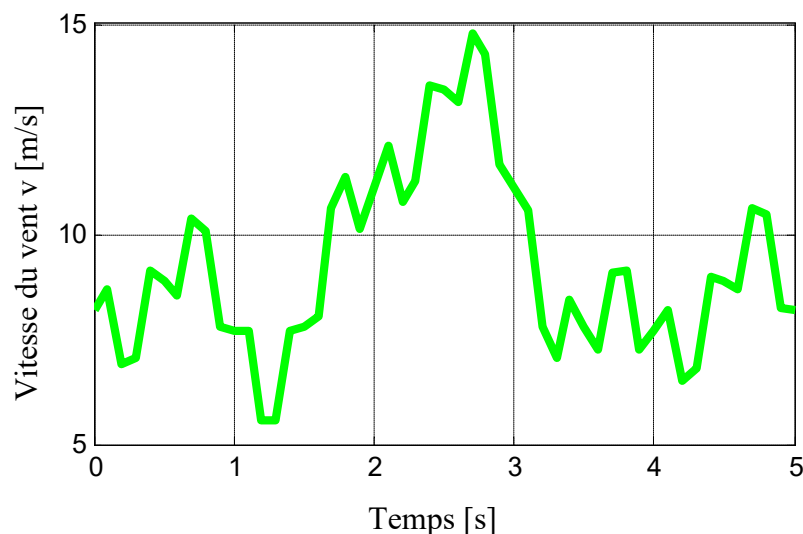


Figure II.12: Simulation du profil du vent appliqué.

La figure II.12 montre l'évolution de la vitesse du vent en fonction de la variation du temps ($t=5s$), où celle-ci varie entre 5,2 m/s et 15 m/s. Cela donne un reflet d'un véritable profil du vent.

II.7.2 Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β :

La figure II.13 présente l'évolution du coefficient de puissance (C_p) de la turbine en fonction de λ et β :

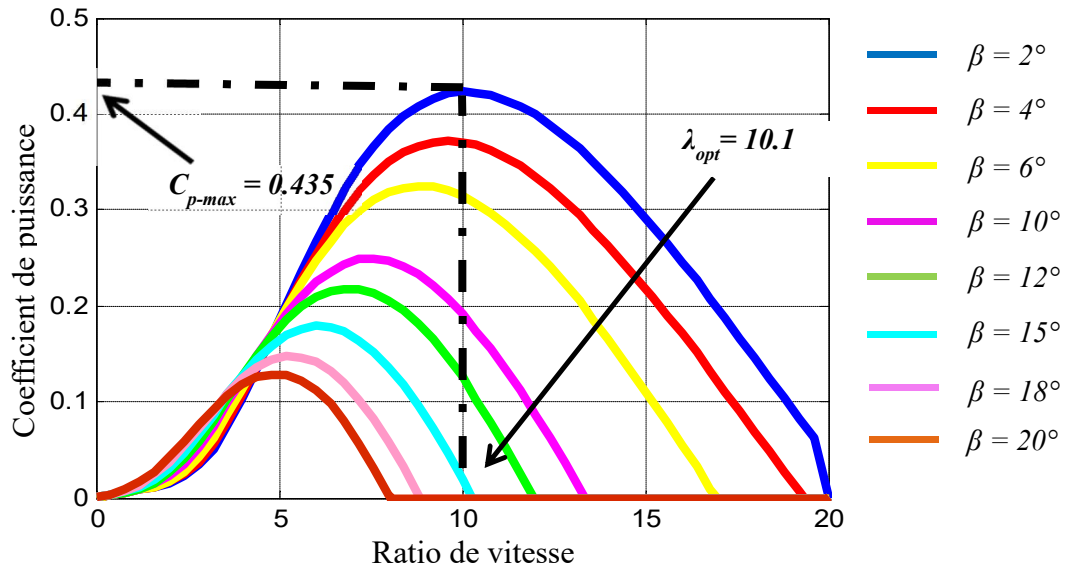


Figure II.13: Coefficient de puissance C_p en fonction de λ et β .

Le résultat de simulation montre que le pic le plus élevé ($\beta = 2^\circ$). Cette courbe est définie par le point optimal ($\lambda_{opt} = 10,1$; $C_{pmax} = 0,435$), lequel correspond au maximum du coefficient de puissance C_p et, par conséquent, au maximum de la puissance mécanique récupérée. On observe qu'une augmentation de β entraîne une réduction du coefficient C_p , ce qui se traduit par une diminution de la puissance mécanique extraite au niveau de l'axe de la turbine éolienne.

II.7.3 Coefficient de couple C_c en fonction de λ et β :

La figure II.14 présente l'évolution du coefficient de puissance (C_c) de la turbine en fonction de λ et β :

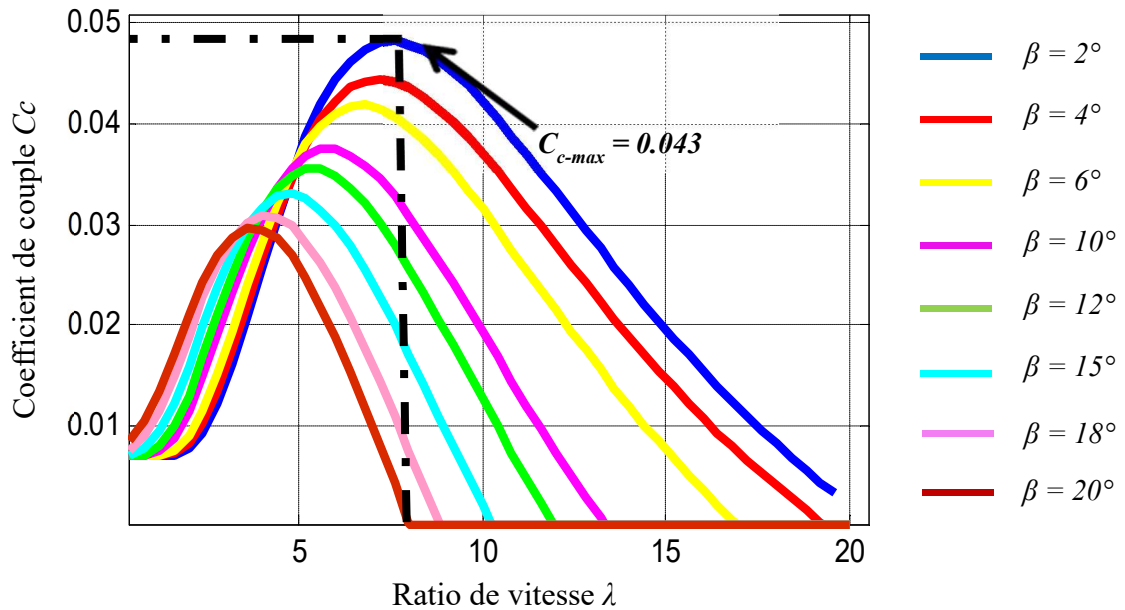


Figure II.14: Coefficient de couple C_c en fonction de λ et β .

Le résultat de simulation représente l'évolution du coefficient de couple C_c , déterminé à partir de l'équation correspondante, en fonction du rapport de vitesse λ pour plusieurs angles de calage des pales. On observe que la variation du coefficient C_c présente une allure caractéristique similaire à celle du coefficient de puissance C_p , en fonction du paramètre λ et selon différentes valeurs de l'angle d'inclinaison β .

II.7.4 Puissance de la turbine en fonction de la vitesse mécanique :

Les résultats de simulation de la puissance de la turbine, en fonction de la vitesse mécanique de la génératrice et pour différentes vitesses du vent, sont illustrés par la figure II.15 :

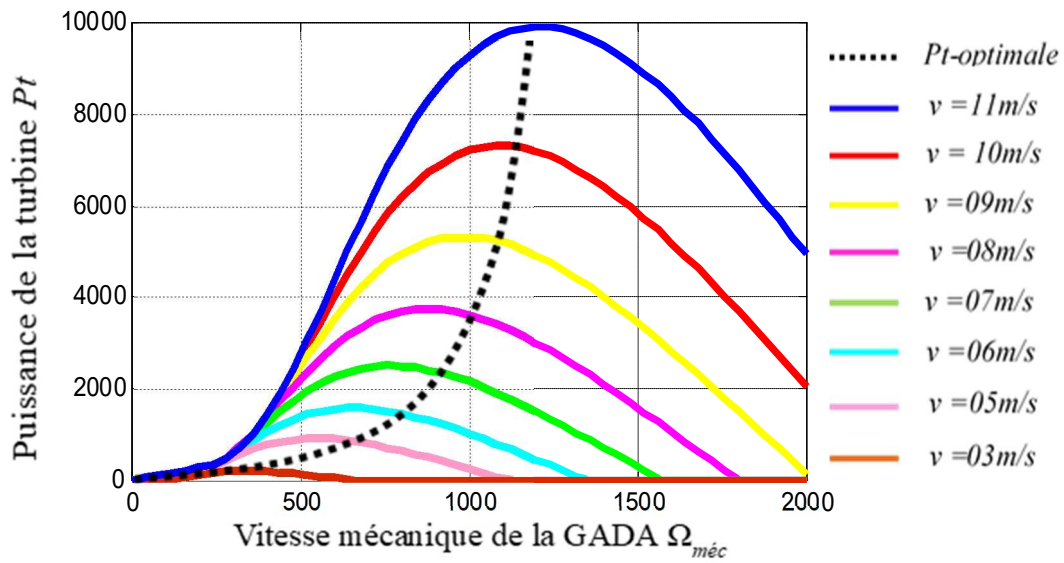


Figure II.15: Puissance de la turbine en fonction de la vitesse mécanique.

La figure II.15 illustre l'évolution de la puissance mécanique de la turbine en fonction de la vitesse mécanique. Les résultats montrent une augmentation progressive de la puissance jusqu'à l'atteinte d'une valeur maximale correspondant au point de fonctionnement optimal. Au-delà de ce point, une diminution de la puissance est observée malgré l'accroissement de la vitesse mécanique. Ce phénomène traduit les limites aérodynamiques de la turbine et l'influence de ses paramètres de fonctionnement. Cette analyse met ainsi en évidence l'existence d'un régime optimal permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système.

II.7.5 Couple de la turbine en fonction de la vitesse mécanique :

Les résultats de simulation du couple de la turbine, en fonction de la vitesse mécanique de la génératrice et pour différentes vitesses du vent, sont illustrés par la figure II.16 :

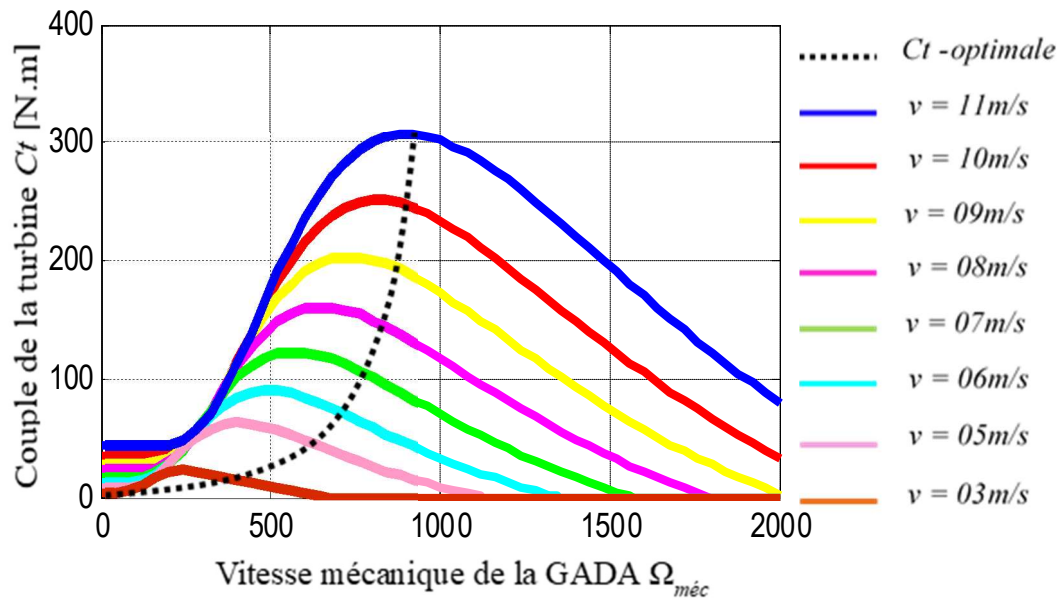


Figure II.16: Couple de la turbine en fonction de la vitesse mécanique.

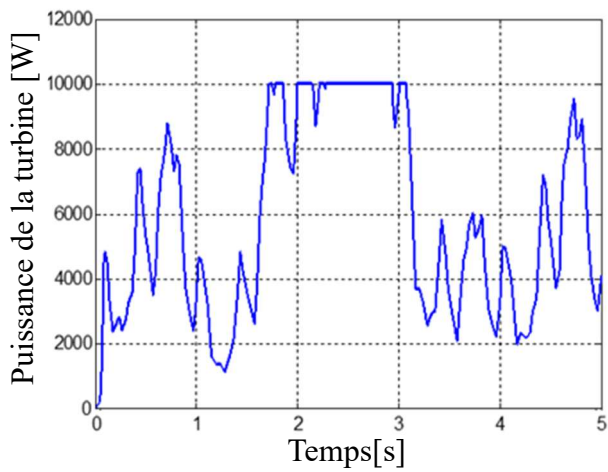
La figure II.16 montre que le couple varie avec la vitesse du vent : quand le vent augmente, le couple augmente aussi. Cela montre que même avec un vent faible, l'éolienne peut produire de l'énergie grâce à son fonctionnement à vitesse variable. Pour atteindre les meilleures performances (couple maximum), on utilise la technique MPPT.

II.7.6 MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique :

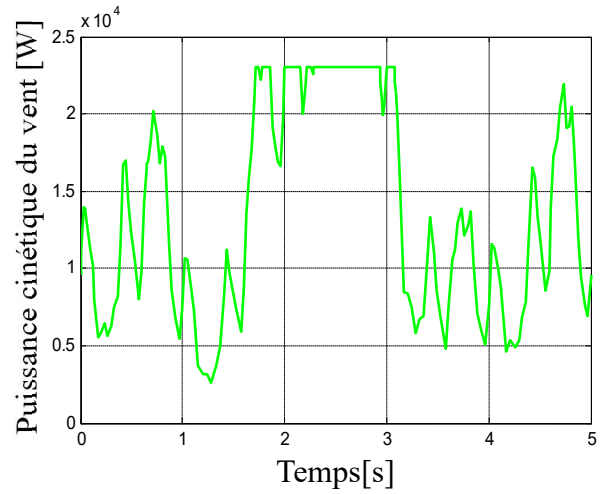
La figure II.17 illustre les résultats de simulation obtenus pour la stratégie MPPT, mise en œuvre sans régulation de la vitesse mécanique de la génératrice.

Les figures (de **a** jusqu'à **j**) présentent respectivement les grandeurs suivantes :

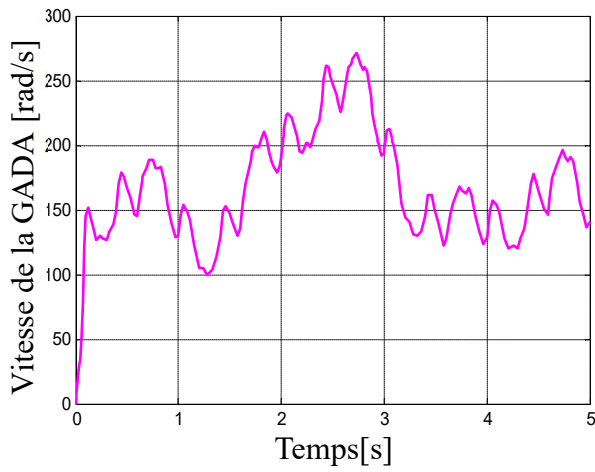
- la puissance cinétique du vent P_v , la puissance maximale extractible de la turbine (puissance aérodynamique) P_t , la vitesse mécanique de la génératrice $\Omega_{méc}$, la vitesse mécanique de la turbine éolienne Ω_t , le couple électromagnétique réel de la GADA ainsi que son couple de référence estimé, l'erreur sur le couple, le coefficient de puissance C_p , le coefficient de couple C_c , le rapport de vitesse (ou vitesse spécifique) λ et enfin l'angle de calage β .



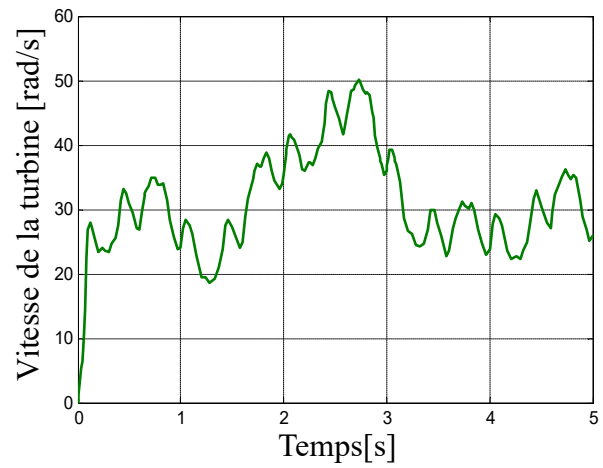
-a-



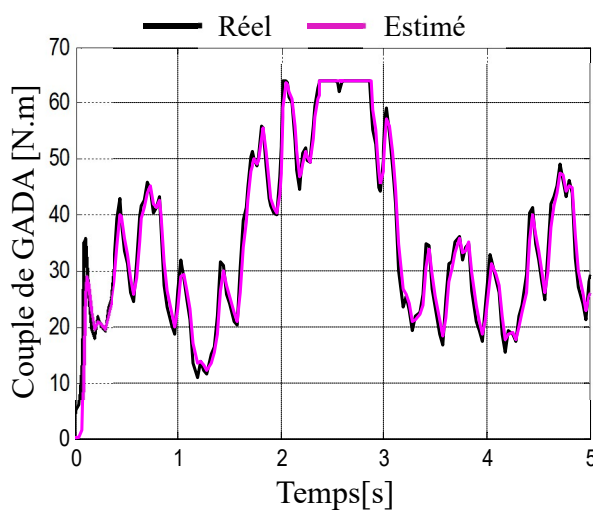
-b-



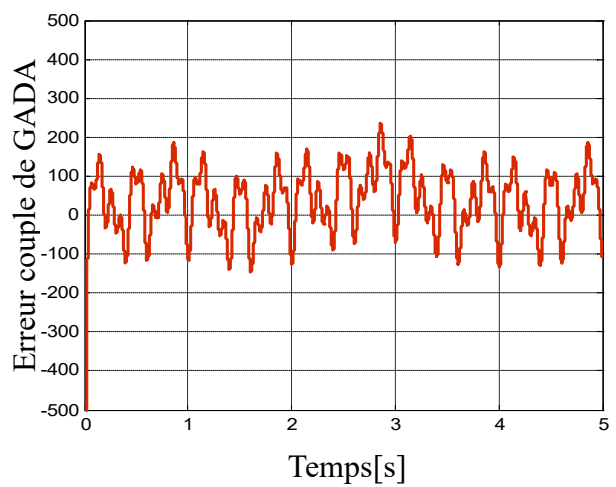
-c-



-d-



-e-



-f-

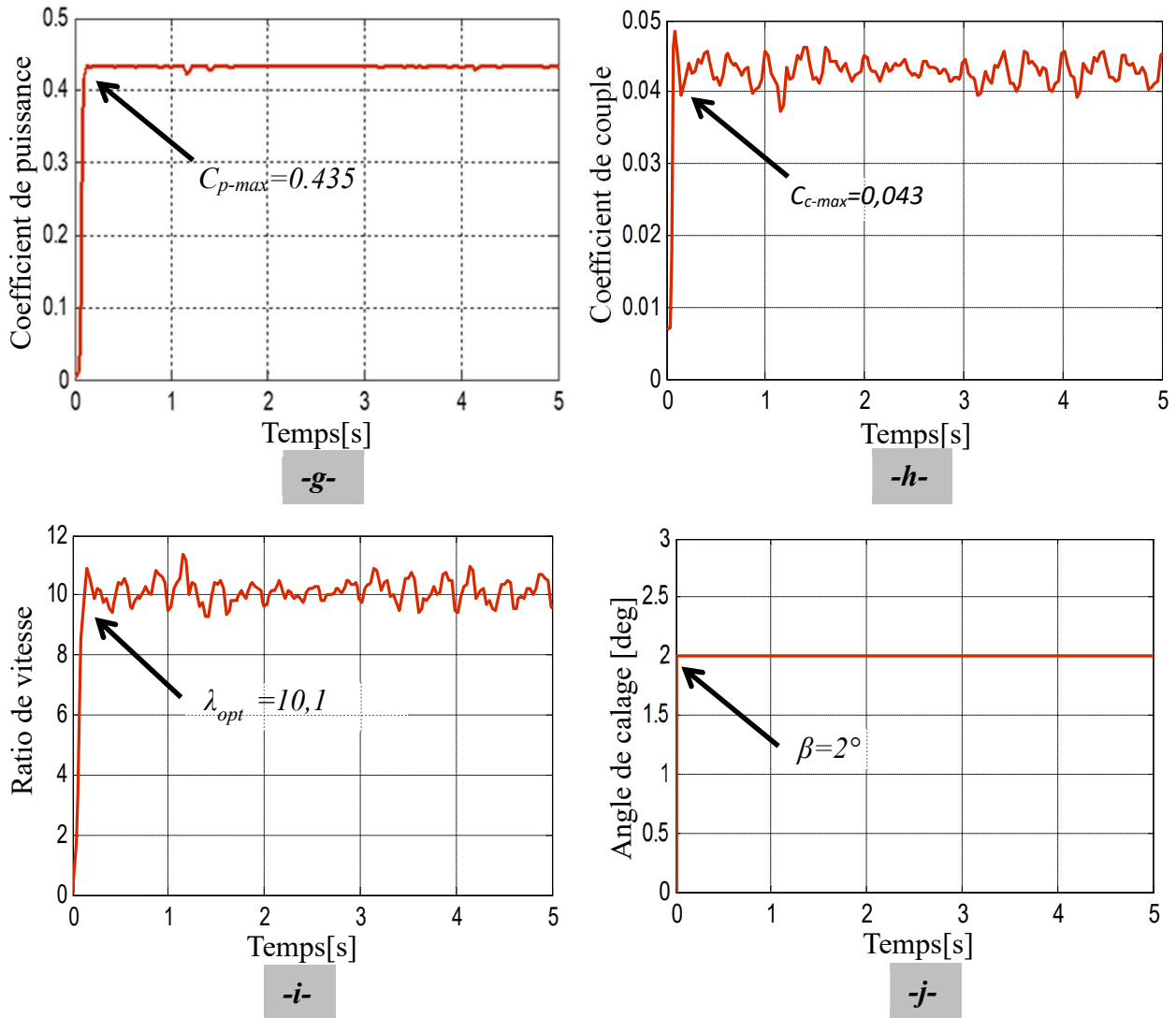


Figure II.17: Résultats de simulation du MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique.

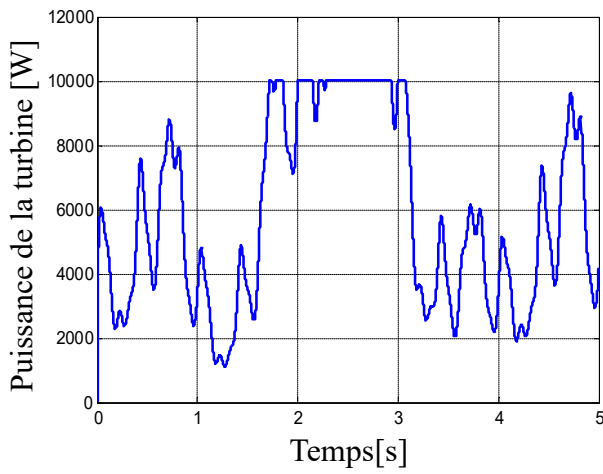
Les simulations effectuées sur cette configuration démontrent que l'évolution de la vitesse mécanique (ou du couple) du générateur suit effectivement les fluctuations de la vitesse du vent, bien qu'avec une réponse dynamique caractérisée par une certaine inertie.

II.7.7 MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique :

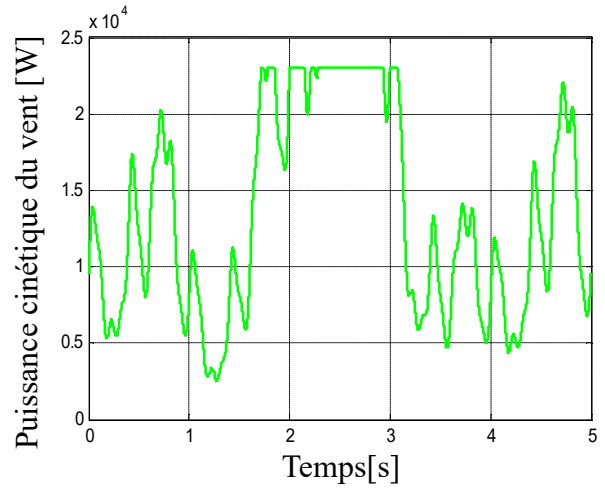
Cet algorithme met en œuvre un asservissement de vitesse par l'intermédiaire d'un régulateur classique Proportional-Integral (RC-PI) conventionnel. Les figures II.18 (de **a** jusqu'à **j**) présentent respectivement les grandeurs suivantes :

- La puissance cinétique du vent P_v , la puissance maximale extractible de la turbine aérodynamique P_t , le couple de la turbine C_t , le couple mécanique de la génératrice $C_{méc}$, la vitesse mécanique de la génératrice $\Omega_{méc}$ et sa consigne, l'erreur de vitesse, la vitesse mécanique de la turbine éolienne Ω_t , le coefficient

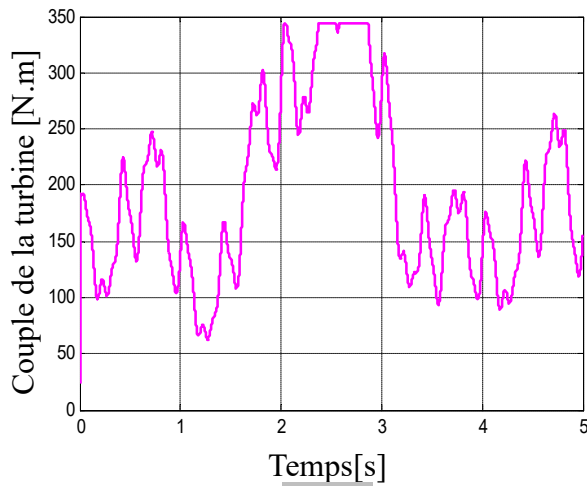
de puissance C_p , le coefficient de couple C_c , le rapport de vitesse λ ainsi que l'angle de calage β .



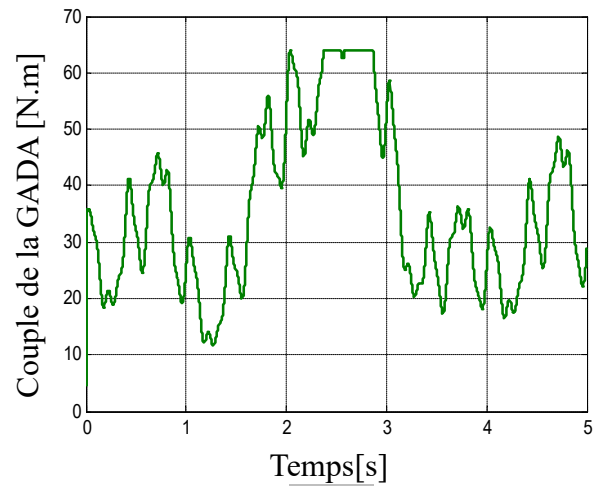
-a-



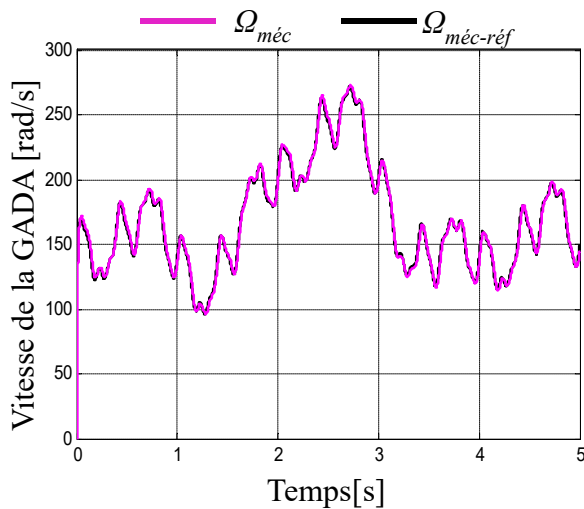
-b-



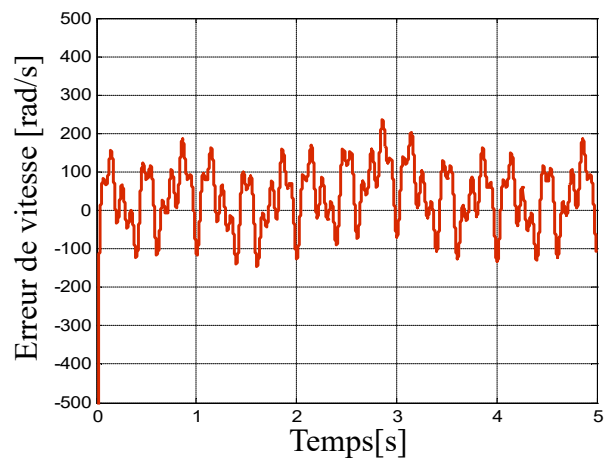
-c-



-d-



-e-



-f-

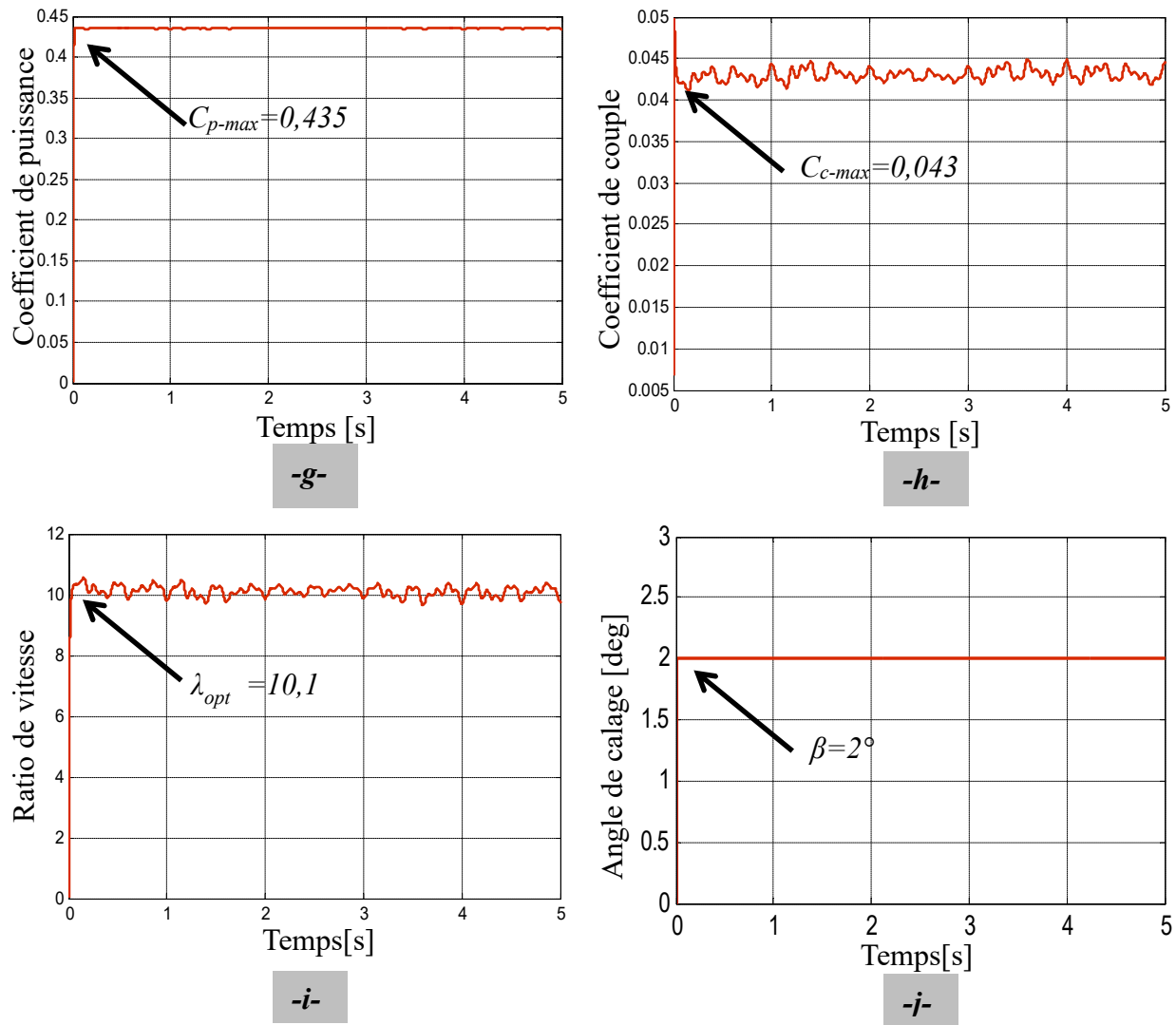


Figure II.18: Résultats de simulation du MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique.

Ces résultats de simulation montrent que l'approche de commande MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique par le régulateur classique RC-PI s'adapte efficacement aux variations de la vitesse du vent. Cette capacité d'adaptation légitime le choix de cette méthode pour la régulation des aérogénérateurs.

II.8 Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à la modélisation et la simulation d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne d'une puissance de 10 Kw, utilisant une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA).

Tout d'abord, nous avons établi les modèles mathématiques des composants fondamentaux du système, notamment le profil du vent, la turbine aérodynamique ainsi que le multiplicateur de vitesse. Cette modélisation a permis d'identifier les paramètres clés pour l'extraction de puissance, tels que le coefficient de puissance (C_p) et le ratio de vitesse (λ).

Ensuite, nous avons analysé deux stratégies de commande MPPT : l'une sans asservissement de la vitesse et l'autre avec asservissement de la vitesse mécanique via un régulateur classique Proportional-Integral (RC-PI).

Les résultats de simulation obtenus montrent que l'utilisation d'une commande adaptée permet de maintenir le système à son point de fonctionnement optimal, garantissant ainsi une extraction maximale de l'énergie éolienne disponible.

Dans le but d'améliorer la précision (l'écart de vitesse mécanique remarquable) de la poursuite du point de puissance maximale et d'assurer une meilleure stabilité du système face aux incertitudes, on a recours à l'intelligence artificielle. L'étude de la **commande MPPT avec régulateur intelligent flou de la turbine éolienne**, qui permet un contrôle intelligent, fera l'objet du chapitre suivant.

=

Chapitre III :

*Commande MPPT
avec régulateur flou
de la turbine éolienne*

III.1 Introduction :

Les régulateurs classiques, sont souvent utilisés dans ce type de système. Ils donnent des résultats acceptables, mais ils présentent des limites, surtout lorsque les conditions changent rapidement. C'est pour cela que des techniques plus avancées ont été développées, parmi elles, la technique de commande par la logique floue. Cette technique est inspirée du raisonnement humain et permet de mieux gérer les incertitudes et les variations du système.

Dans ce chapitre, on va présenter une commande MPPT basée sur un régulateur Intelligent flou (RI-Floue) appliqué à une turbine éolienne. On commencera par expliquer les bases de la logique floue, puis on présentera le fonctionnement du système. Ensuite, des résultats de simulation seront analysés. Enfin, une comparaison avec le régulateur classique RC-PI sera faite pour montrer les avantages de la commande floue.

III.2 Généralités sur les systèmes de commande par logique floue :

III.2.1 Historique de la logique floue :

Les origines de la logique floue se trouvent dans le principe de l'incertitude de Heisenberg. Dans les années 20, les physiciens ont introduit la troisième valeur $\frac{1}{2}$ dans le système logique bivalent $\{0, 1\}$. Au début des années 30, le logicien polonais Jan Lukasiewicz a développé le système logique avec trois valeurs [28].

Il a fallu attendre 1965, pour que le concept des sous-ensembles flous soit proposé par Lotfi Zadeh, automaticien de réputation internationale, qui a contribué à la modélisation de phénomènes sous forme floue, en vue de pallier les limitations dues aux incertitudes des modèles classiques à équation différentielle. Il publia un article intitulé (Fuzzy sets) ou (Ensembles flous). En 1974, M. Mamdani expérimentait la théorie énoncée par Zadeh sur une chaudière à vapeur, ce qui introduisait la commande floue dans la régulation des processus industriels. Plusieurs applications ont alors vu le jour en Europe, pour des systèmes parfois très complexes, telle que la régulation de fours de cimenterie réalisée par la société Smidt-Fuller en 1978 [28].

C'est la première véritable application industrielle de la logique floue. Grâce au chercheur japonais Sugeno, la logique floue était introduite au Japon dès 1985. Les sociétés japonaises comprirent l'avantage à la fois technique et commercial de la logique floue [28].

III.2.2 Principe de la logique floue :

La logique floue traduit le raisonnement humain basé sur des données imprécises ou incomplètes ; c'est une logique qui substitue à la logique binaire une logique fondée sur des variables pouvant prendre, outre les valeurs « vrai » ou « faux », les valeurs intermédiaires « vrai

» ou « faux » avec certains degrés. La formulation mathématique de la logique floue donne naissance à une théorie dite théorie des ensembles flous. Cette théorie n'est qu'une extension de la théorie classique des ensembles, sauf que la logique floue est caractérisée par la notion des valeurs intermédiaires, d'où la nécessité de mettre en évidence certaines notions de cette théorie. La logique floue permet de traiter des variables linguistiques dont les valeurs sont des mots ou expressions du langage naturel [30].

III.2.3 Domaine d'application :

Les systèmes flous trouvent des applications dans des nombreux domaines industriels, de gestion et médicaux. Parmi ces applications, on peut notamment mentionner [29] :

- Systèmes audio-visuels (appareils de photos autofocus, caméscope à stabilisateur d'images, photocopieurs, ...) ;
- Appareils électroménagers (lave-linge, aspirateurs, autocuiseurs, ...etc.) ;
- Systèmes autonomes mobiles ;
- Système de transport (train, métro, ascenseur, ...) ;
- Système de contrôle/commande dans la plupart des domaines industriels de production, transformation, traitement de produit et déchet ;
- Systèmes d'autoroutes automatisés : direction automatique, freinage et contrôle de la manette des gaz pour les véhicules ;
- Robotique : Contrôle de la place et organisation de chemin.

III.2.4 Concepts fondamentaux de la théorie des ensembles flous :

III.2.4.1 Théorie des ensembles flous :

Sur un univers de discours U , un sous-ensemble flou A est défini par la donnée d'une fonction $\mu_A(x)$ [19] :

$$\begin{aligned} \mu_A : U &\rightarrow [0, 1] \\ x &\rightarrow \mu_A(x) \end{aligned} \tag{III.1}$$

On définit le sous-ensemble flou A comme suivant : $A = \{(x, \mu_A(x)) / x \in U\}$, où : $\mu_A(x)$ est une fonction caractéristique d'appartenance qui prend ces valeurs dans l'intervalle $[0,1]$. Elle indique le degré d'appartenance de l'élément x à A , ainsi x au U pourrait :

- Ne pas appartenir à A $\mu_A(x) = 0$.
- Appartenir un peu à A $\mu_A(x)$ est voisin de 0.

- Appartenir assez à A entre 0 et 1.
- Appartenir fortement à A est voisin de 1.
- Appartenir à A $\mu_A(x) = 1$.

$$A = \sum_{i=1}^n \frac{\mu_A(x_i)}{x} \quad (III.2)$$

$$A = \int_x \frac{\mu_A(x_i)}{x}$$

Si U est discret, on peut représenter l'ensemble A par :

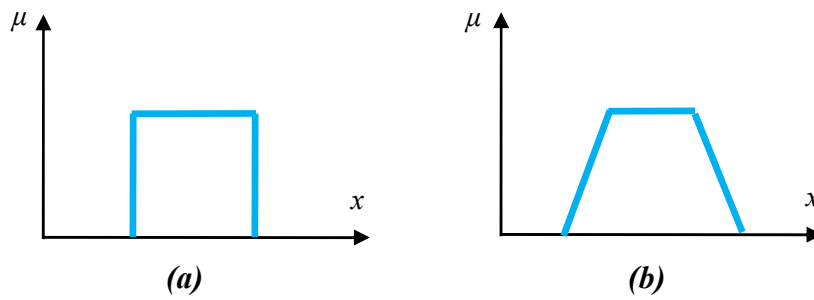


Figure III.1 : Exemple de fonction d'appartenance :(a) Logique classique, (b) Logique Floue.

III.2.4.2 Variable linguistique :

Lorsqu'on décrit une situation, un phénomène ou un procédé, on emploie des termes linguistiques tels que grand, petit, chaud, froid, rapide, lent, etc. Ces termes constituent les variables de la logique floue, désignées sous le nom de « variables linguistiques » [31].

Une variable linguistique se décompose généralement en un ensemble de termes couvrant l'intégralité de son domaine de variation. Elle est représentée par un triplé $(X, T(X), U)$, où [31] :

- X : Désigne le nom de la variable linguistique ;
- $T(X)$: Représente l'ensemble des termes de la variable linguistique ;
- U : Correspond à l'univers du discours.

III.2.4.3 Fonction d'appartenance :

Pour permettre un traitement numérique des variables linguistiques, il est nécessaire de les définir mathématiquement à l'aide de fonctions d'appartenances. Ces fonctions indiquent le degré auquel ces variables vérifient les différents sous-ensembles considérés [21].

Les représentations graphiques des fonctions d'appartenance les plus utilisées sont illustrées dans la figure III.2, leurs expressions analytiques sont définies de la manière suivante [21] :

- **La fonction triangulaire** : Définie par trois paramètres a , b et c , soit :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{III.3})$$

- **La fonction trapézoïdale** : Définie par quatre paramètres a , b , c et d soit :

$$\mu(x) = \max\left(\min\left(\frac{x-a}{b-a}, 1, \frac{c-x}{c-b}\right), 0\right) \quad (\text{III.4})$$

- **La fonction en cloche** : Définie par deux paramètres, x_0 qui détermine la position du sommet ($\mu=1$) et a qui impose la largeur du domaine, soit :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \left(\frac{x-x_0}{a}\right)^2} \quad (\text{III.5})$$

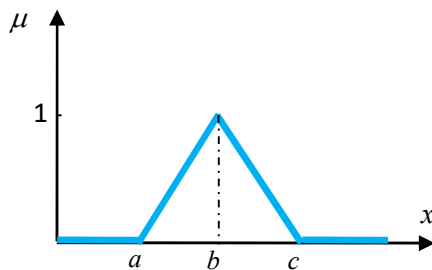
- **La fonction gaussienne** : Définie par deux paramètres σ , x_0 , soit :

$$\mu(x) = \exp\left(-\frac{(x-x_0)^2}{2 \cdot \sigma^2}\right) \quad (\text{III.6})$$

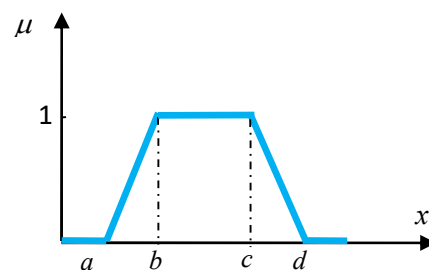
- **La fonction sigmoïde** : Définie par deux paramètres a , x_0 , soit :

$$\mu(x) = \frac{1}{1 + \exp(-a \cdot (x-x_0))} \quad (\text{III.7})$$

Il convient de souligner que la forme rectangulaire s'inscrit parfaitement dans le cadre de la logique classique, tandis que le triangle peut être envisagé comme un cas particulier du trapèze, lorsque les deux sommets correspondant aux valeurs a et c se coïncident.



a- forme triangulaire



b- forme trapézoïdale

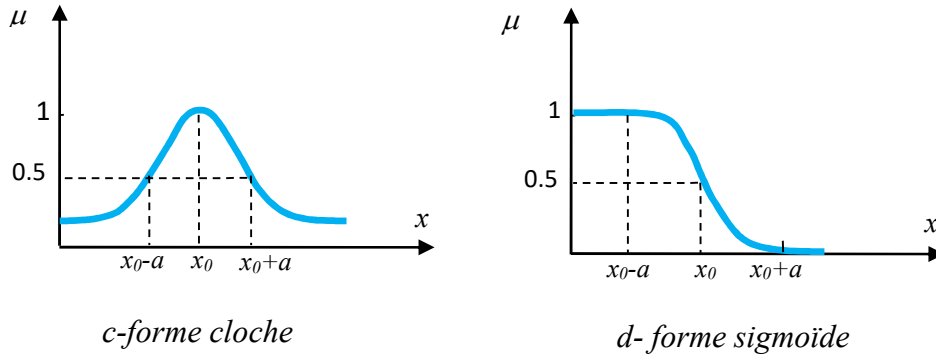


Figure III.2: Formes usuelles des fonctions d'appartenance.

III.2.4.4 Opérations sur les ensembles flous :

Soient A et B deux ensembles flous définis sur un univers U , caractérisés respectivement par leurs fonctions d'appartenance μ_A et μ_B . Les opérations d'union, d'intersection et de complémentation de ces ensembles flous sont établies à partir de ces fonctions d'appartenance [21].

➤ *Union (Disjonction) :*

L'union de deux ensembles flous A et B de U est l'ensemble flou constitué des éléments du U affectés de plus grand de leurs deux degrés d'appartenance, elle est définie comme l'ensemble flou : $C = A \cup B$ (A ou B), tel que :

$$\forall x \in U \quad \mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.8})$$

L'opérateur max est commutatif et associatif :

$$\begin{aligned} \mu_C(x) &= \max[\mu_A, \mu_B, \mu_C] \\ \mu_C(x) &= \max[\max[\mu_A, \mu_B], \mu_C] \\ \mu_C(x) &= \max[\mu_A, \max[\mu_B, \mu_C]] \\ \mu_C(x) &= \max[\max[\mu_A, \mu_C], \mu_B] \end{aligned} \quad (\text{III.9})$$

➤ *Intersection (Conjonction) :*

L'intersection de deux ensembles flous A et B de U est l'ensemble flou constitué des éléments U affectés du plus petit de leurs deux degrés d'appartenance. Elle est définie comme l'ensemble flou : $D = A \cap B$ (A et B), tel que :

$$\forall x \in U \quad \mu_D(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) \quad (\text{III.10})$$

L'opérateur min est commutatif :

$$\mu_D(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x)) = \min(\mu_B(x), \mu_A(x)) \quad (\text{III.11})$$

➤ **Complémentation :**

La fonction d'appartenance $\mu_{\bar{A}}$ du complément d'un ensemble flou A est définie tel que :

$$\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x) \quad (\text{III.12})$$

➤ **Produit cartésien :**

Soient $A_1, A_2, A_3, \dots, A_n$ des ensembles flous dans $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ respectivement le produit cartésien de $A_1, A_2, \dots, A_n$, est un ensemble flou dans l'espace produit de $x_1, x_2, \dots, x_n$ ayant pour fonction d'appartenance :

$$\mu_{A_1 \times A_2 \times \dots \times A_n} = \min(\mu_{A_1}(x_1), \mu_{A_2}(x_2), \dots, \mu_{A_n}(x_n)) \quad (\text{III.13})$$

➤ **Egalité :**

On dit que A et B sont égaux si et seulement si :

$$\mu_B(x) = \mu_A(x) \quad (\text{III.14})$$

➤ **Inclusion :**

On dit que $A \subset B$ si et seulement si :

$$\mu_B(x) \leq \mu_A(x) \quad (\text{III.15})$$

➤ **Relation floue :**

Soient $U_1, U_2, \dots, U_n$ des univers de discours, une relation floue est un ensemble flou dans $U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n$ exprimé comme suit :

$$R_{U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n} = \{(x_1, x_2, \dots, x_n), \mu_R(x_1, x_2, \dots, x_n) / (x_1, x_2, \dots, x_n) \in U_1 \times U_2 \times \dots \times U_n\} \quad (\text{III.16})$$

➤ **Composition de deux relations floues :**

Soient les deux relations floues R_1 dans $U_1 \times U_2$ et R_2 dans $U_2 \times U_3$. On définit la composition ($\sup^*$) de R_1 et R_2 notée $R_1 \circ R_2$ par $*$:

$$R_1 \circ R_2 = \left\{ (U_1, U_3) \sup \left(\mu_{R_1}(U_1, U_2) * \mu_{R_2}(U_2, U_3) \right) \mid u_i \in U_i \right\} \quad (\text{III.17})$$

Où $(*)$ représente une loi de composition pouvant être min, produit, ...etc.

III.2.5 Structure générale d'un contrôleur flou :

Les techniques des modifications traditionnelles reposent sur l'utilisation des formules ou des relations mathématiques, tandis que la logique floue emploie plusieurs règles floues, fondées sur des opérateurs flous (OU, ET, etc.), appliqués à des variables linguistiques [32].

De manière classique, le fonctionnement interne d'un système flou repose sur la structure présentée par la figure III.3. Qui inclut quatre blocs [33] :

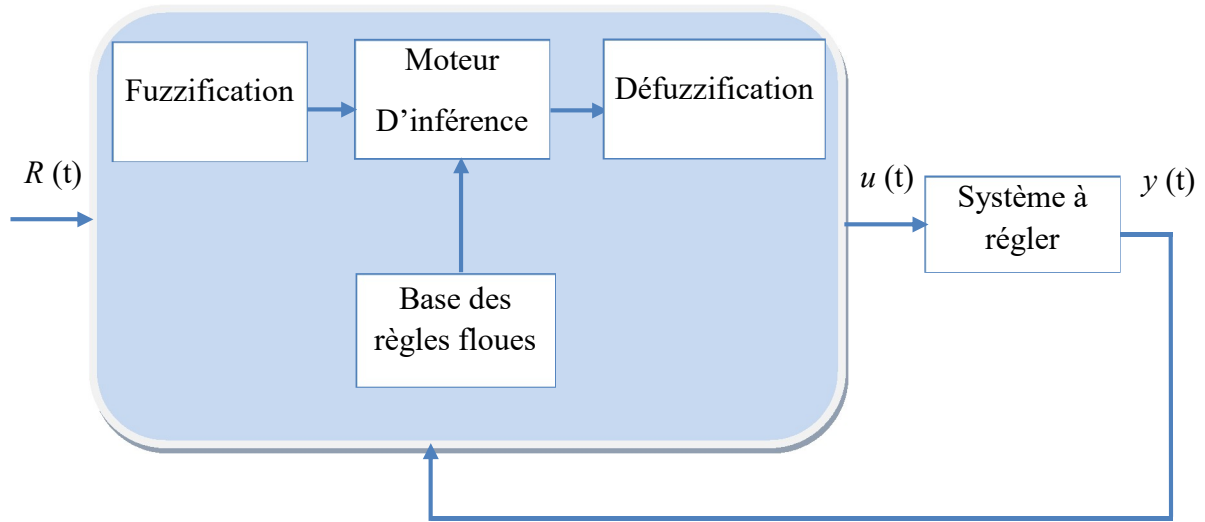


Figure III.3: Structure interne d'un système flou.

- La base des règles ou des connaissances.
- La fuzzification des variables d'entrées, avec éventuellement un prétraitement de l'information.
- L'inférence à partir d'une base de connaissance.
- La défuzzification, avec éventuellement un post-traitement de l'information.

Avec :

$R(t)$: Le signal de référence ;

$u(t)$: La commande ;

$y(t)$: La sortie du système à commander.

III.2.5.1 Interface de fuzzification :

La fuzzification transforme les valeurs numériques d'entrée en valeur linguistiques est formé à :

- L'univers de discours, la plage de variation possibles des entrées et des sorties.
- Une répartition en classe floue de cet univers.
- Les fonctions d'appartenance de chacune de ces classes.

III.2.5.2 Base des règles floues :

Les règles floues constituent le fondement du régulateur, permettant d'exprimer la variable d'entrée de ce dernier comme la variable de commande du système sous une forme linguistique, symboliquement ou bien par matrice d'inférence.

➤ Description linguistiquement :

D'un point de vue linguistique, dans ce cas, les règles sont formulées de manière explicite, comme dans l'exemple suivant :

- SI (la température est élevée ET la vitesse est faible) ALORS la tension est fortement positive.

OU

- SI (la température est moyenne ET la vitesse est faible) ALORS la tension est positive.

➤ Description symbolique :

Il s'agit, dans ce cas, d'une représentation linguistique où la désignation des ensembles flous est substituée par des symboles tels que (GP, P, ..., etc.), correspondant respectivement à (Grand Positif, Positif, ..., etc.).

➤ La description par matrice d'inférence :

Consiste à regrouper l'ensemble des règles, représentées de manière symbolique, dans un tableau nommé « matrice d'inférence ». Dans le cas d'un tableau bidimensionnel, les entrées de ce dernier correspondent aux ensembles flous des variables d'entrée.

III.2.6 Moteur d'inférence floue :

Il s'agit d'un mécanisme décisionnel qui, à partir d'un fait observé dans une base des règles floues, permet de prendre une décision en exploitant le raisonnement approximatif. Dans le cadre des inférences d'un régulateur avancé floue, les opérateurs ET et OU interviennent. L'opérateur ET s'applique aux variables au sein d'une même règle, tandis que l'opérateur OU

relie les différentes règles entre elles. Plusieurs méthodes existent pour implémenter ces opérateurs lors d'une inférence, lesquelles s'appliquent aux fonctions d'appartenance [34].

- Méthode d'inférence max-min (Mamdani).
- Méthode d'inférence max-produit (Larsen).
- Méthode d'inférence somme-produit (Sugeno).

III.2.6.1 Méthode d'inférence max-min :

La méthode d'inférence max-min applique, au niveau de la condition, l'opérateur OU en prenant le maximum et l'opérateur ET en prenant le minimum, tandis que l'implication "Alors" est réalisée par la formation du minimum.

III.2.6.2 Méthode d'inférence max-produit :

La méthode d'inférence max-produit applique généralement, au niveau de la condition, l'opérateur OU en prenant le maximum et l'opérateur ET en prenant le minimum, tandis que l'implication Alors est réalisée par le calcul du produit.

III.2.6.3 Méthode d'inférence somme-produit :

À la différence des méthodes d'inférences antérieures, la Méthode d'inférence somme-produit effectue, au niveau de la condition, l'opération OU par le biais de la somme, plus exactement par la valeur moyenne, tandis que l'opération ET est réalisée par la formation du produit, et l'implication Alors est effectuée par la formation du produit.

III.2.7 Interface de Défuzzification :

La phase terminale du processus de commande floue est la défuzzification, qui convertit la commande exprimée sous forme d'ensembles flous en une commande réelle. Cette opération vise à transformer l'information floue issue des mécanismes de raisonnement en grandeurs physiques ou en valeurs permettant de définir la loi de commande du procédé. Plusieurs méthodes ont été développées à cet effet, notamment [34] :

- Méthode de Maximum.
- Méthode de la moyenne des maximums.
- Méthode du centre de gravité.

III.2.7.1 La méthode du maximum :

Cette méthode se limite à considérer uniquement les valeurs présentant le degré d'appartenance le plus élevé à l'ensemble flou agrégé. Bien que cette approche soit facile à mettre en œuvre, elle est rarement utilisée car elle repose sur l'opérateur maximum, qui favorise une seule règle parmi l'ensemble des règles disponibles.

$$U = \max (A(x), B(x)) \quad (\text{III.18})$$

Avec :

h : la sortie du système flou, c'est-à-dire, la valeur numérique de la sortie floue.

III.2.7.2 La méthode de la moyenne pondérée :

(Méthode des hauteurs pondérées ou méthode de la moyenne des maximums), Cette approche retient comme valeur de sortie la moyenne des valeurs suggérées par chaque règle, pondérées par leur degré respectif de validité.

III.2.7.3 La méthode du centre de gravité :

Cette méthode permet de calculer le centre de gravité de la surface produite par la fonction d'appartenance de l'ensemble flou agrégé. L'abscisse de ce centre de gravité peut être obtenue au moyen de la relation ci-après.

$$\Delta u = \frac{\int x \mu (x) dx}{\int \mu (x) dx} \quad (\text{III.19})$$

III.2.8 Efficacité de la commande floue :

Parmi ses avantages, on mentionne [35] :

- Facilité de mise en œuvre.
- Solution de problèmes multi variables complexes.
- Robustesse face aux incertitudes.
- Capacité d'intégration du savoir de l'expert.
- Possibilités de commande auto-adaptative aux variations du procédé.

Le contrôleur flou est caractérisé par une entrée $e(x)$ et une sortie $u(x)$, la base de règles permettant d'établir une relation entre ces deux grandeurs. Cette relation est exprimée au moyen de règles de type « SI ... ALORS » :

R1 : SI e est **N** ALORS $u(x)$ est **N**.

R2 : SI e est **Z** ALORS $u(x)$ est **Z**.

R3 : SI e est **P** ALORS $u(x)$ est **P**.

Avec :

N : Négatif.

Z : Zéro.

P : Positif.

Les fonctions floues employées pour la régulation de vitesse de la turbine éolienne, caractérisées par une entrée $e(x)$ et une sortie $u(x)$ composée de trois fonctions d'appartenance, sont illustrées respectivement dans les figures III.4 et III.5.

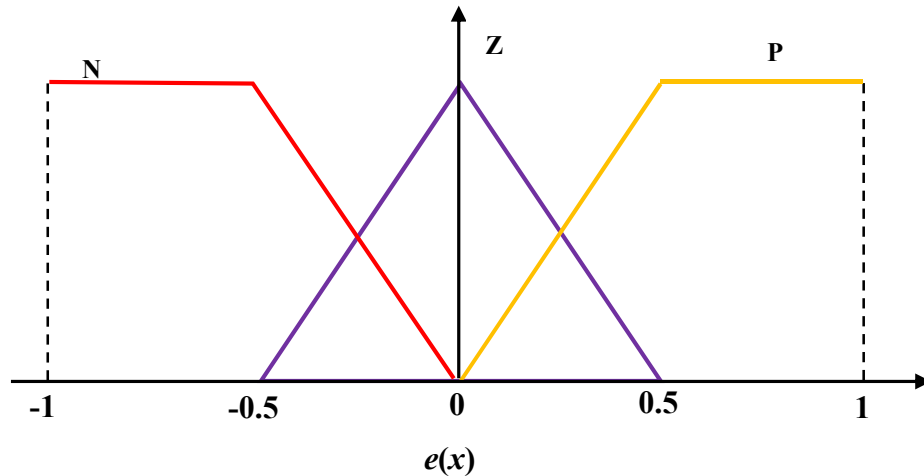


Figure III.4: Fonctions d'appartenance de l'entrée de la fonction floue.

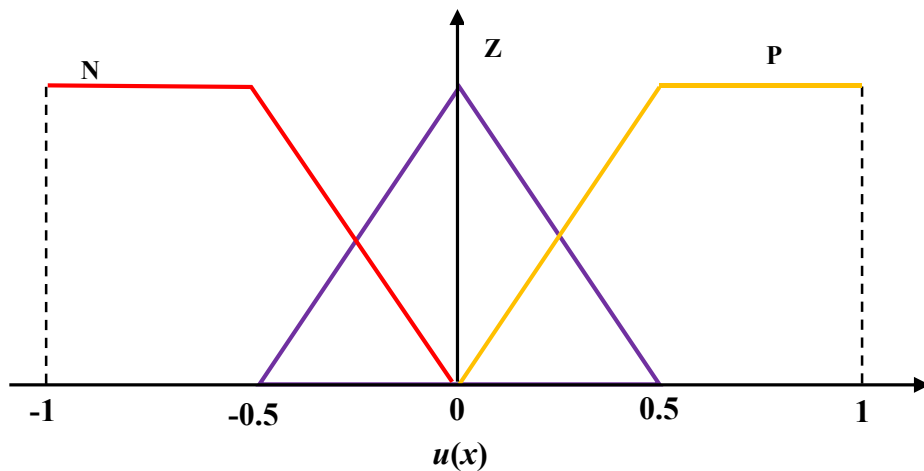


Figure III.5: Fonctions d'appartenance de la sortie de la fonction floue.

III.3 Optimisation de l'Extraction d'Éolienne par Commande MPPT à Logique Floue :

Ce schéma représente la commande MPPT d'une turbine éolienne basée sur un régulateur intelligent flou. La turbine convertit l'énergie du vent en énergie mécanique, transmise à travers un système mécanique (arbre et multiplicateur).

La stratégie MPPT permet de maintenir la turbine à une vitesse optimale afin de maximiser la puissance extraite. Le régulateur intelligent flou (RI-Flou) utilise l'erreur entre la vitesse réelle et la vitesse de référence pour générer une commande adaptée.

Ainsi, ce système assure une extraction optimale de l'énergie malgré les variations de la vitesse du vent.

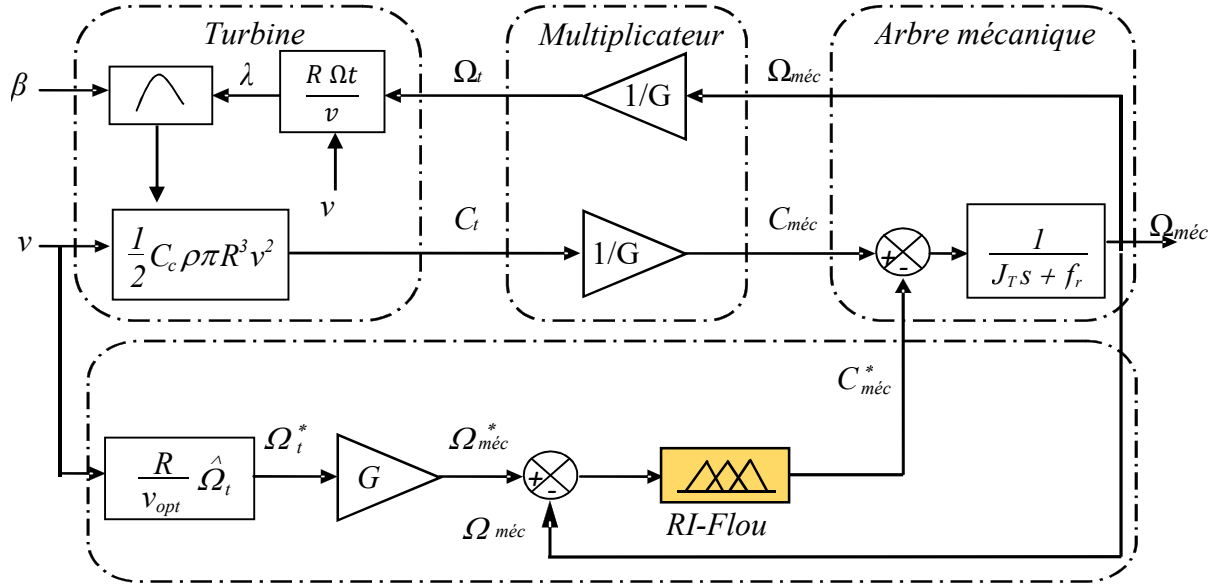
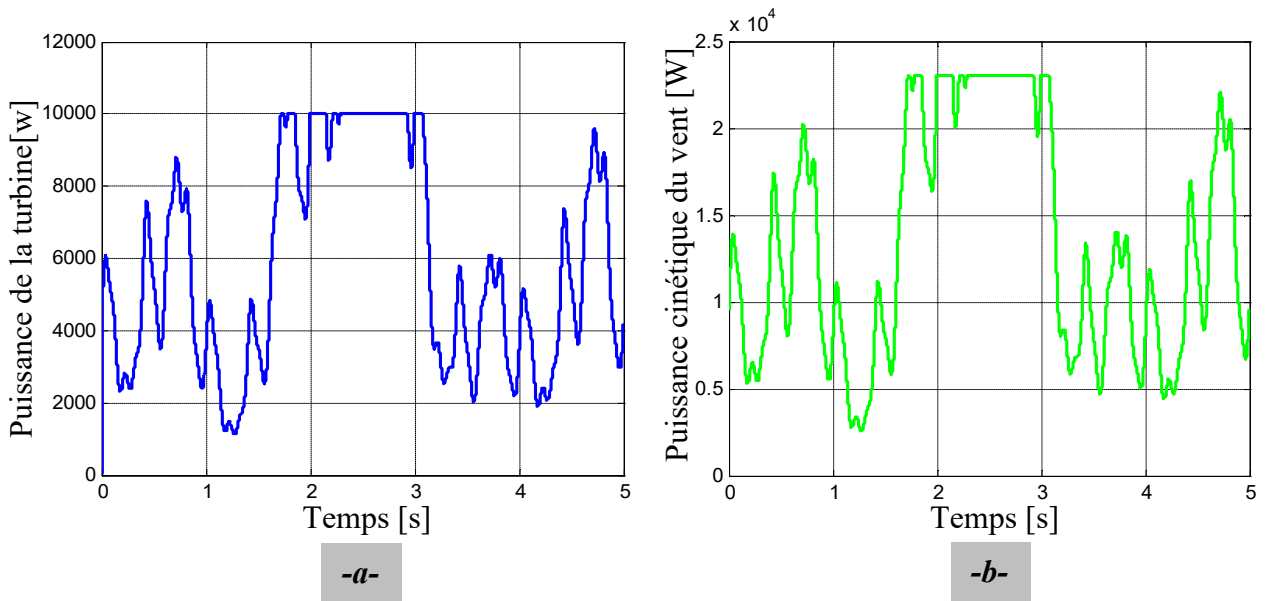
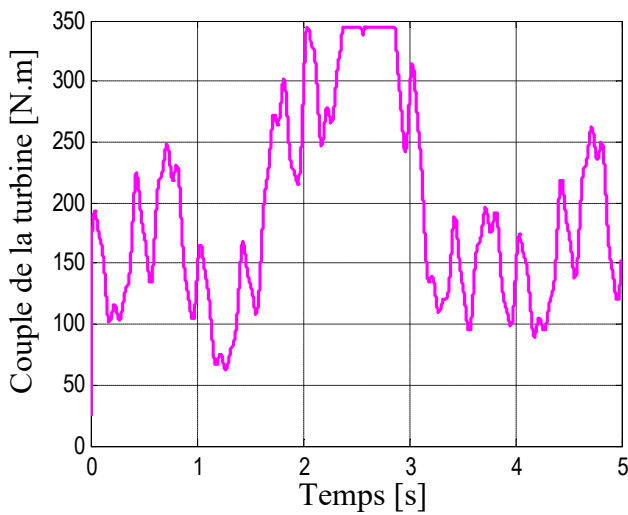


Figure III.6: Commande MPPT avec Régulateur intelligent Flou.

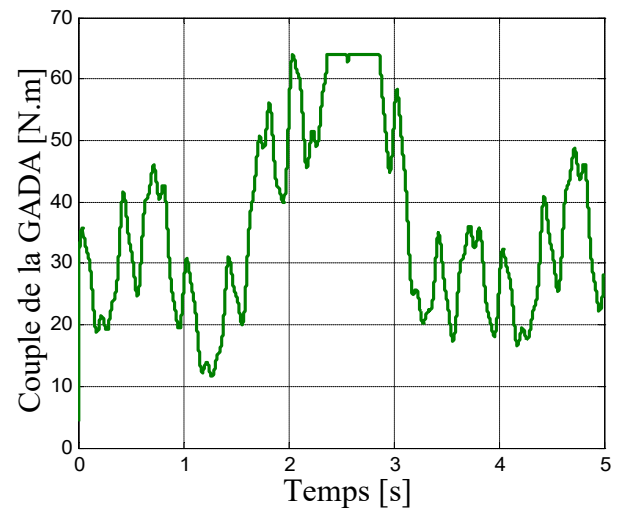
III.3.1 Résultats de simulation et interprétations :

Les résultats de simulation illustrés par les figures (a) jusqu'à (f) montrent le bon fonctionnement de la commande MPPT basée sur un régulateur intelligent flou.

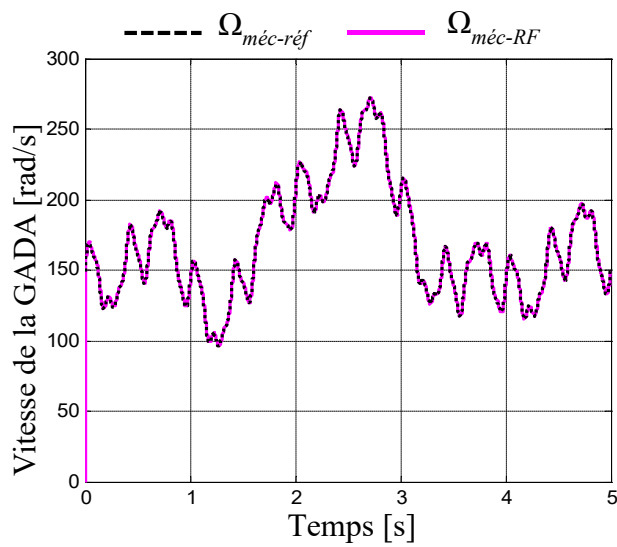




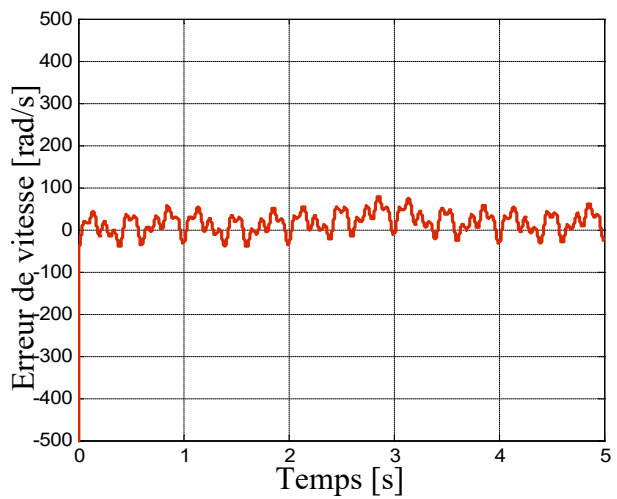
-c-



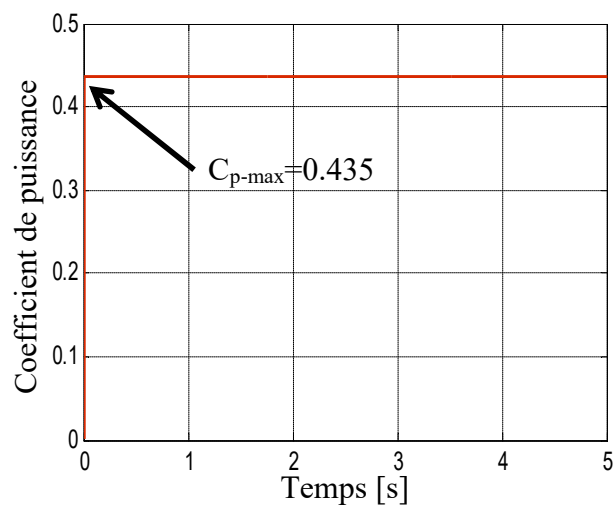
-d-



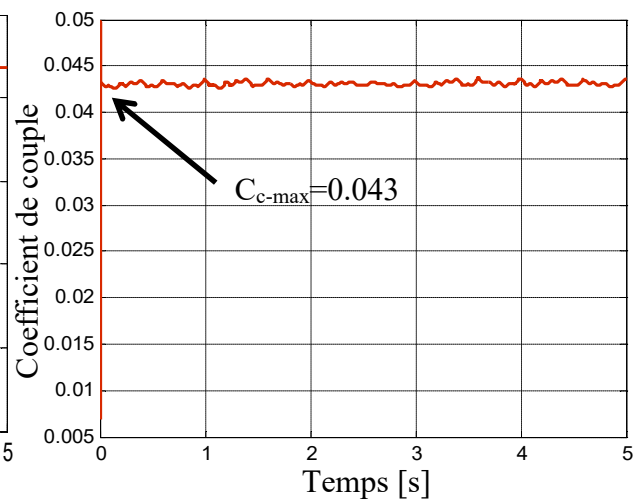
-e-



-f-



-g-



-h-

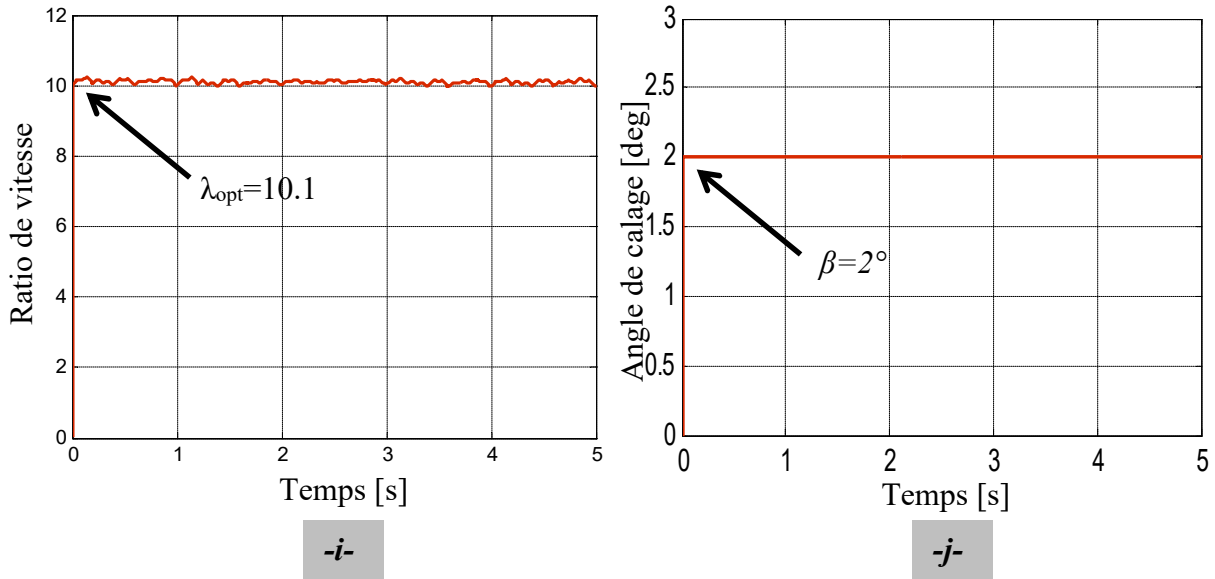


Figure III.7: Résultats de simulation du MPPT avec RI-Flou de la turbine éolienne.

On remarque que la puissance de la turbine augmente progressivement jusqu'à atteindre une valeur maximale puis se stabilise, ce qui confirme l'efficacité de la stratégie MPPT. Les courbes du couple de la turbine et de la génératrice (GADA) présentent un comportement cohérent et stable, traduisant une bonne conversion de l'énergie mécanique. La vitesse mécanique réelle suit fidèlement sa référence avec une erreur qui converge rapidement vers zéro, démontrant la performance du régulateur intelligent flou en termes de précision et de stabilité. Par ailleurs, le coefficient de puissance C_p atteint une valeur proche de son maximum, tandis que le ratio de vitesse λ se stabilise autour de sa valeur optimale, ce qui garantit une extraction maximale de l'énergie éolienne. Enfin, l'angle de calage β reste pratiquement constant, indiquant que le contrôle est principalement assuré par la régulation de vitesse.

Ces résultats confirment ainsi la robustesse et l'efficacité de la commande proposée face aux variations des conditions de fonctionnement.

III.4 Etude comparative du MPPT avec RC-PI et RI-Flou :

Nous présentons les résultats de simulation obtenus pour l'étude du système de commande MPPT appliqué à la turbine éolienne. L'objectif principal est d'évaluer les performances des deux approches utilisées, à savoir le régulateur classique (RC-PI) et le régulateur intelligent flou (RI-Flou).

Les simulations ont été réalisées sous différentes conditions de fonctionnement afin d'analyser le comportement dynamique du système, notamment en termes de rapidité, stabilité et précision dans la poursuite du point de puissance maximale.

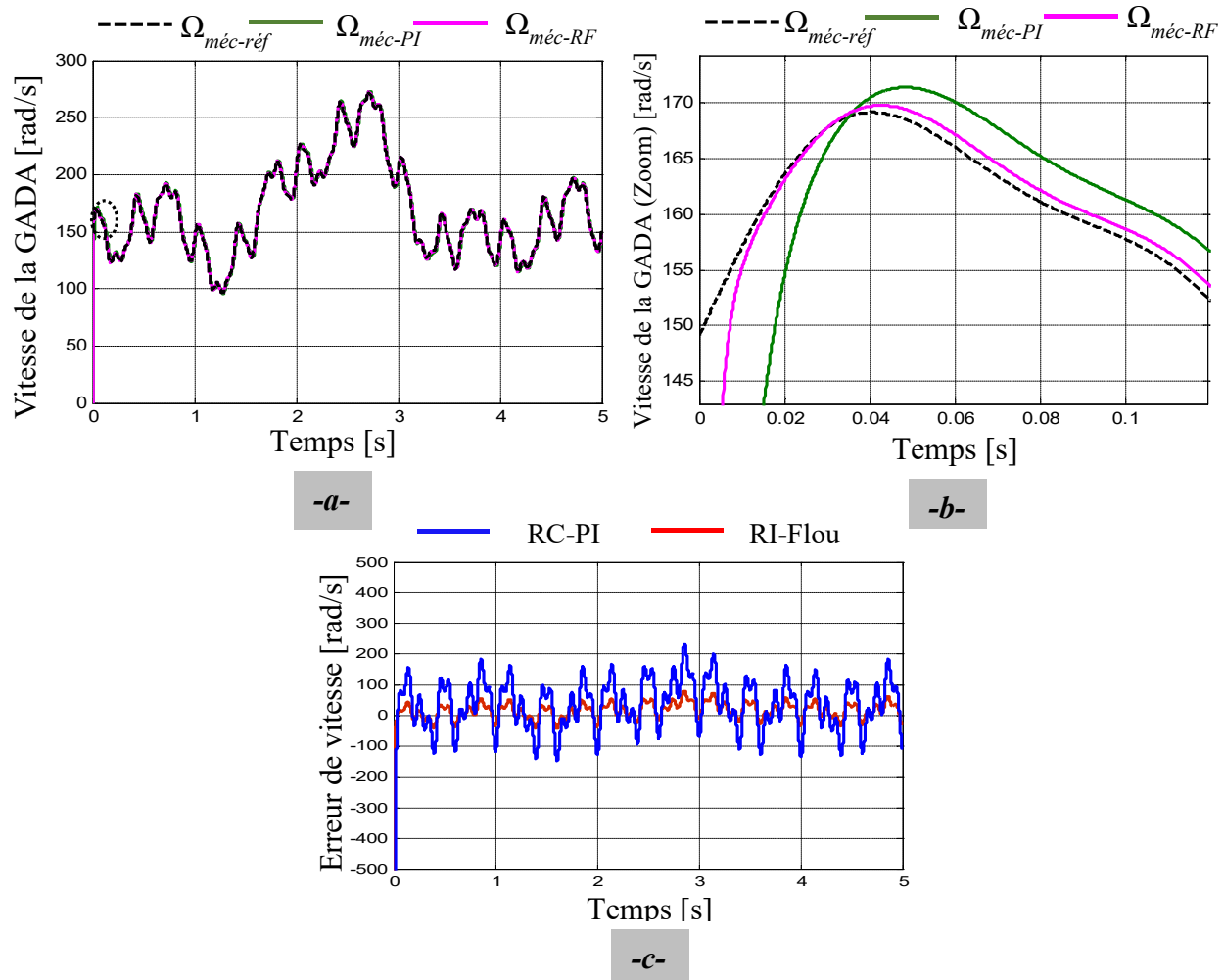


Figure III.8: Comparaison des résultats de simulation du MPPT avec RC-PI et RI-Flou.

Le tableau III.1 : représente une comparaison détaillée est effectuée pour mettre en évidence les performances de chaque méthode.

Tableau III.1: Comparaison des performances entre le RC-PI et RI-Flou :

Critères de comparaison	RC-PI (Régulateur Classique PI)	RI-Flou (Régulateur Intelligent Flou)
Suivi de la vitesse de référence	Temps de réponse un peu plus lent	Atteint la consigne plus rapidement
Dépassement	Un léger dépassement au début	Dépassement très réduit
Temps de réponse	Plus lent	Plus rapide
Robustesse face aux variations du vent	Sensible aux perturbations et aux changements rapides	Très robuste face aux variations du vent
Performance MPPT	Performances satisfaisantes	Performances supérieures et meilleure efficacité énergétique

Le tableau III.2 : représente une comparaison entre RC-PI et RI-Flou en terme temps de réponse (t_r) et l'erreur statique (e).

Tableau III.2: Comparaison entre RC-PI et RI-Flou en terme (t_r) et (e) :

	Temps de réponse (t_r)	Erreur statique (e)
RC-PI	17.4 ms	303 W (3.03%)
RI-Flou	6.9 ms	101 W (1.01%)

D'après :

L'étude comparative réalisée entre les deux régulateurs, RC-PI et RI-Flou, assurent le suivi du point de puissance maximale dans le système MPPT. Toutefois, leurs performances sont différentes.

Ainsi, le régulateur intelligent flou représente une solution plus efficace pour optimiser le fonctionnement du MPPT, surtout dans des conditions variables.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, une stratégie de commande MPPT basée sur un régulateur intelligent flou (RI-Flou) appliquée à une turbine éolienne a été présentée. Cette commande a pour but d'optimiser l'extraction de puissance de la turbine éolienne, malgré les variations aléatoires de la vitesse du vent.

L'approche repose sur la capacité de la logique floue à traduire le raisonnement humain et à traiter des variables linguistiques pour pallier les limitations des modèles classiques face aux incertitudes. Plusieurs simulations et une étude comparative entre le régulateur classique (RC-PI) et le régulateur intelligent flou (RI-Flou) ont été présentées pour valider l'approche proposée.

En conclusion, le régulateur intelligent flou (RI-Flou) représente une solution plus efficace et robuste que le régulateur classique (RC-PI) pour l'optimisation du système MPPT, s'adaptant avec souplesse aux conditions variables du vent pour améliorer la stabilité globale du système.

Conclusion Générale

Dans le cadre de ce mémoire, nous avons réalisé une étude et commande d'une turbine éolienne par la technique MPPT à vitesse variable basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA). Ce type de génératrice est largement utilisé dans les systèmes éoliens à vitesse variable grâce à ses bonnes performances, sa capacité à fonctionner dans différentes conditions du vent et sa possibilité de contrôler la puissance produite.

Dans un premier temps, nous avons présenté des généralités sur les énergies renouvelables, avec un intérêt particulier pour l'énergie éolienne. Les différents types d'éoliennes, leurs composants, leurs modes de fonctionnement ainsi que leurs avantages et inconvénients ont été étudiés. Cette étude a montré l'importance croissante de l'énergie éolienne dans le monde et en Algérie, notamment dans le cadre du développement des énergies propres et durables.

Ensuite, nous avons développé la modélisation mathématique de la chaîne de conversion éolienne. Cette modélisation comprend le modèle du vent, la turbine aérodynamique, le multiplicateur de vitesse et la partie mécanique du système. L'objectif principal était de comprendre le comportement dynamique de l'éolienne et d'optimiser l'extraction de la puissance disponible du vent.

Dans cette étude, une stratégie MPPT a été appliquée afin d'assurer le fonctionnement de l'éolienne au point de puissance maximale. Deux méthodes de commande ont été étudiées : une commande MPPT avec régulateur classique PI et une commande MPPT avec régulateur intelligent flou. Les résultats de simulation ont montré que les deux méthodes permettent de suivre le point de puissance maximale malgré les variations de la vitesse du vent.

Cependant, l'étude comparative a montré que le régulateur intelligent flou offre des meilleures performances par rapport au régulateur classique PI. En effet, la commande floue présente un temps de réponse plus rapide, moins d'oscillations et une meilleure stabilité du système. Elle permet également une meilleure adaptation aux variations rapides du vent et aux incertitudes du système, grâce à son fonctionnement basé sur la logique floue et le raisonnement humain.

Les simulations obtenues sous MATLAB/SimulinkTM ont confirmé l'efficacité de la stratégie proposée pour améliorer les performances du système éolien et maximiser la puissance extraite. Les résultats obtenus démontrent que l'utilisation d'une commande intelligente contribue à augmenter la qualité et la stabilité de la production d'énergie électrique.

Malgré le fait que cette étude reste basée sur la simulation numérique, les résultats obtenus sont satisfaisants et constituent une base importante pour des travaux futurs dans le domaine des systèmes éoliens intelligents.

Afin d'améliorer les performances du système étudié, plusieurs perspectives peuvent être envisagées. Une validation expérimentale sur un banc d'essai réel permettrait de comparer les résultats de simulation aux conditions pratiques de fonctionnement. L'intégration des techniques de commande intelligentes basées sur l'intelligence artificielle, comme les réseaux de neurones ou les méthodes adaptatives, pourrait également renforcer la robustesse et les performances du système.

Par ailleurs, l'amélioration des stratégies MPPT contribuerait à optimiser l'extraction de la puissance maximale. L'intégration de systèmes de stockage d'énergie et le développement des systèmes hybrides éolien-photovoltaïque représentent aussi des solutions intéressantes pour améliorer la stabilité énergétique. Enfin, l'intégration du système dans les réseaux électriques intelligents permettrait une meilleure gestion et une meilleure qualité de l'énergie produite.

*Références
bibliographiques*

- [1] Archer, C.L., & Jacobson, M.Z. (2005). Evaluation of global wind power. *Journal of Geophysical Research : Atmospheres*, 110(D12).
- [2] S. Benichou, « Contribution à l'étude et conception d'une éolienne », Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, Ghardaïa, 2017.
- [3] <https://www.connaissancedesenergies.org/les-energies-renouvelables-produiront-plus-delectricite-que-le-charbon-en-2025-selon-laie-241104>
- [4] <https://portail.cder.dz/2019/02/17/le-mix-energetique/>
- [5] B. HADJ YAZID et Z. MOUFDI, « Modélisation et simulation par deux méthodes d'une centrale éolienne connectée au réseau située au sud d'algerie », Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah, Ourgla, 2023.
- [6] Extrait du rapport de synthèse ECRIN « L'Electronique de Puissance Vecteur d'Optimisation Pour les Energies Renouvelables », paru mai en 2002 1 ISBN 2-912154-8-1 ECRIN 32, bd de Vaugirard 75015 Paris - tel 01 42 79 50 99–ecrin@ecrin.asso.fr
- [7] C. BOUDJELIDA et Z. DERRADJ, « Commande MPPT pour les systèmes de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Master, Université El-Bachir-Ibrahimi, Bordj Bou Arreridj, 2025.
- [8] A. BOUHENNA, « Etude de l'impact des techniques de commande et des topologies des convertisseurs statiques avancées sur le comportement d'un réseau électrique décentralisé », Thèse de doctorat, Université de Relizene, 2022.
- [9] A. YOUNES, « Protection des éoliennes modernes contre la foudre », Thèse de doctorat, Université Ibn-Khaldoun, Tiaret, 2024.
- [10] E. BOUNADJA, «Commande d'une machine asynchrone à double alimentation en régime sature », Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Polytechnique, Algerie, Décembre 2017.
- [11] E. Hau et H. von Renouard, *Wind Turbines*. Berlin, Heidelberg : Springer, 2006.
doi : 10.1007/3-540-29284-5.
- [12] S. DJEMA et N. NASRI, « Modélisation et commande d'une machine asynchrone à double alimentation destinée à l'énergie éolienne », Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri, Tizi-Ouzou, 2015.
- [13] A. Chater, « Etude et commande d'une turbine éolienne utilisant une machine asynchrone à double alimentation », Mémoire de master, Higher school in applied sciences, Tlemcen, 2022.
- [14] Abdelhak Djellad, « Modelisation et optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque-éolienne », Thèse de doctorat, Université badji mokhtar, annaba, 2015.
- [15] B. CHABANI et I. LAIB, « Etude comparative des stratégies de controle pour le générateur asynchrone à double alimentation dans les systèmes de conversion éolienne », Mémoire de Master, Université Akli Mohand Oulhadj, Bouira, 2024.
- [16] L. HAFSI, A. HAMMI, et O. HAMMAR, « Etude et simulation des paramètres d'une éolienne à axe vertical type savonius », Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia, 2022.
- [17] M. BENTALHA et A. BELHAMRI, « Commande des puissances active et réactive d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) intégrée à un système de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib, Ain-Temouchent, 2024.
- [18] F. LOUAR, « Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2016.
- [19] M. ALLAM, « Contribution à la commande robuste du système d'énergie renouvelable », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbès, 2017.

- [20] K. BENKRAMA, « Commande robuste du système d'énergies renouvelables », Mémoire de Master, Université Belhadj Bouchaib, Ain-Temouchent, 2025.
- [21] Z. BOUDJEMA, « Etude et commande d'un système de production d'électricité renouvelable locale (énergie éolienne et photovoltaïque). », Thèse de doctorat, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbès, 2015.
- [22] Y. IZGHECHE, « Estimation de la vitesse de la machine d'une éolienne », Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2019.
- [23] T.GHANNAM, « 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, 2012.
- [24] B. Brice, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrice asynchrone double alimentation : on mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de doctorat, Université Brigande accidentelle, 2010.
- [25] B. Sorensen, Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects. Amsterdam : elsevier, 2004.
- [26] C. DARRAS, « Modélisation de systèmes hybrides photovoltaïque/hydrogène : applications site isolé, micro-réseau, et connexion au réseau électrique dans le cadre du projet PEPITE (ANR PAN-H) », Thèse de doctorat en énergétique et génie des procédés, Université de Corse, France, 2011.
- [27] N. KHENGAOUI, « Commande floue adaptative d'une machine asynchrone à double alimentation », Master académique, Université Kasdi Merbah, Ourgla, 2015.
- [28] A. BEGHNI, A. BELKHADEM, et A. ZOUDJI, « Commande par logique floue d'une éolienne à base de la génératrice asynchrone a double alimentation (GADA) », Mémoire de Master, Université SALHI AHMED, NAAMA, 2022.
- [29] Y. LAGGOUN et H. E. LIMANE, « Commande d'une machine asynchrone double étoile par logique floue », Master académique, Université Kasdi Merbah, Ourgla, 2017.
- [30] R. SADOUNI, « Commande par Mode Glissant Flou d'une Machine Asynchrone à Double Etoile », Mémoire de Magister, Université Djillali Liabes, Sidi-Bel-Abbès, 2010.
- [31] S. Bentouati, « Contribution à la Modélisation et à la Commande Neuro-Floue de la Machine Synchrone à Aimants Permanents à Commande Directe du Couple », Thèse de doctorat, Université école nationale polytechnique, Alger, 2016.
- [32] A. CHELLAOUA et A. CHIKH BOUBAKEUR, « Commande par mode glissant flou d'une machine asynchrone », Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2023.
- [33] A. CHEBEL, « Contribution à l'amélioration de l'efficacité d'une chaîne de conversion éolienne couplée à un réseau électrique », Thèse de doctorat, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2022.
- [34] H. BAOUCHI et S. DAGHOR, « Etude comparative des performances entre les régulateurs : PI, FL, FSM pour le réglage de la vitesse d'une MASDE commandée par la technique FOC », Mémoire de Master, Université de Ghardaïa, 2021.
- [35] W. BOUTANA et N. YKHELFOUNE, « Etude comparative en simulation entre un régulateur PID et un régulateur flou », Mémoire de Master, Université Mohammed Seddiki Benyahia, Jijel, 2019.

Annexes

Annexe -A-

Conception d'un régulateur PI pour la commande MPPT :

La méthode la plus conventionnelle adoptée dans notre étude repose sur le contrôle de la vitesse de rotation à l'aide d'un régulateur de type proportionnel-intégral (PI). Afin d'éliminer l'erreur statique et de diminuer le temps de réponse tout en maintenant la stabilité du système, un correcteur à action proportionnelle et intégrale est mis en œuvre. Les performances obtenues, notamment en termes de stabilité, de précision et de temps de réponse, s'avèrent satisfaisantes pour ce système électromécanique. Toutefois, le couple peut présenter un dépassement significatif, susceptible de compromettre le bon fonctionnement du système. Pour remédier à cet inconvénient, une limitation de la consigne de couple est appliquée en sortie du correcteur. La vitesse à régler est définie à partir de l'équation mécanique, et la structure du régulateur de vitesse est illustrée sur la figure A.1.

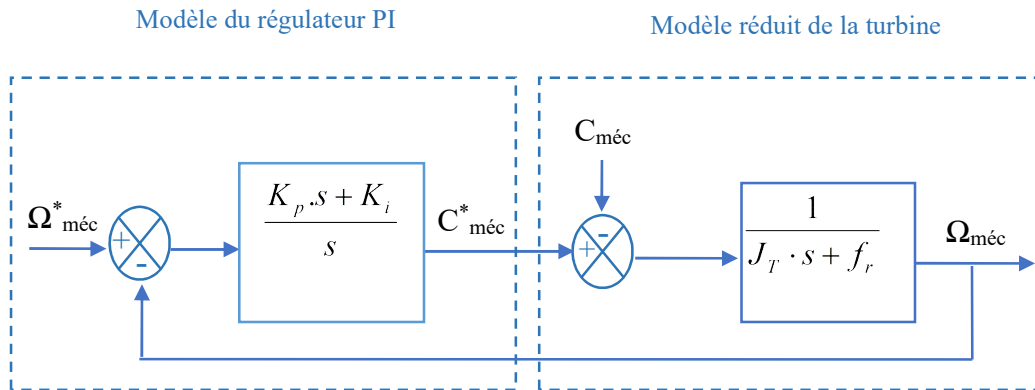


Figure A.1 : Schéma bloc du régulateur PI.

- Le régulateur PI est :
$$\frac{K_p \cdot s + K_i}{s}$$
- Le modèle mécanique de la turbine est :
$$\frac{1}{J_T \cdot s + f_r}$$

Avec :

J_T : Inertie totale.

fr : Coefficient de frottement.

Kp : Gain proportionnel.

Ki : Gain intégral.

- L'erreur est : $e(S) = \Omega_{\text{méc}}^*(S) - \Omega_{\text{méc}}(S)$

Ou :

$\Omega_{\text{méc}}^*$: Vitesse mécanique de référence.

$\Omega_{\text{méc}}$: Vitesse mécanique.

- Le couple de commande fourni par le PI est : $C_{\text{méc}}^*(S) = \frac{K_p \cdot S + K_i}{S} \cdot e(S)$
- En remplaçant le e (S) : $C_{\text{méc}}^*(S) = \frac{K_p \cdot S + K_i}{S} \cdot (\Omega_{\text{méc}}^*(S) - \Omega_{\text{méc}}(S))$
- A l'entrée du bloc mécanique : $C_{\text{tot}}(S) = C_{\text{méc}}^*(S) - C_{\text{méc}}(S)$
- Donc : $\Omega_{\text{méc}} = \frac{1}{J_T \cdot S + f_r} \cdot (C_{\text{méc}}^*(S) - C_{\text{méc}}(S))$
- En remplaçant $C_{\text{méc}}^*$: $\Omega_{\text{méc}} = \frac{1}{J_T \cdot S + f_r} \cdot \left[\frac{K_p \cdot S + K_i}{S} (\Omega_{\text{méc}}^*(s) - \Omega_{\text{méc}}(s)) - C_{\text{méc}}(s) \right]$
- En multiplier par $(J_T \cdot S + f_r)$:

$$(J_T \cdot S + f_r) \cdot \Omega_{\text{méc}} = \left[\left(\frac{K_p \cdot S + K_i}{S} (\Omega_{\text{méc}}^*(s) - \Omega_{\text{méc}}(s)) \right) - C_{\text{méc}}(s) \right]$$

$$(J_T \cdot S + f_r) \cdot \Omega_{\text{méc}} + \frac{K_p \cdot S + K_i}{S} \cdot \Omega_{\text{méc}} = \frac{K_p \cdot S + K_i}{S} \cdot \Omega_{\text{méc}}^* - C_{\text{méc}}$$

- Après simplification on trouve : $\Omega_{\text{méc}} = \frac{K_p \cdot S + K_i}{J_T \cdot S^2 + (K_p + f_r) \cdot S + K_i} \cdot \Omega_{\text{méc}}^* - \frac{S}{J_T \cdot S^2 + (K_p + f_r) \cdot S + K_i} \cdot C_{\text{méc}}$

❖ Identification :

- La forme générale : $\Omega_{\text{méc}} = F(s) \cdot \Omega_{\text{méc}}^* + G(s) \cdot C_{\text{méc}}$

- Donc : $F(s) = \frac{K_p \cdot s + K_i}{J_T \cdot s^2 + (K_p + f_r) \cdot s + K_i}$

$$G(s) = \frac{-s}{J_T \cdot s^2 + (K_p + f_r) \cdot s + K_i}$$

❖ Calculs des gains K_p et K_i :

- Le dénominateur est : $J_T \cdot s^2 + (K_p + f_r) \cdot s + K_i$
- On divise par J_T : $s^2 + \frac{f_r + K_p}{J_T} \cdot s + \frac{K_i}{J_T}$
- On compare avec le système standard : $s^2 + 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2$
- Après Identification on trouve : $2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n = \frac{f_r + K_p}{J_T}$; $\omega_n^2 = \frac{K_i}{J_T}$

❖ Les formules finales des gains :

- Pour K_i : $K_i = J_T \cdot \omega_n^2$
- Pour K_p : $K_p = 2 \cdot \varepsilon \cdot \omega_n \cdot J_T - f_r$

Annexe -B-

Tableau1 : Paramètres de la turbine éolienne :

Définition des paramètres et symbole	Valeur	Unité
Puissance nominale P_n	10	Kw
Gain du multiplicateur de vitesse G	5.4	-
Nombre des pales P	3	-
Moment d'inertie total J_T	0.2	kg.m ²
Coefficient de frottement f_r	0.0016	N.m/s
Masse volumique de l'air ρ	1.225	kg/m ³
Vitesse du vent nominale v_n	11	m/s
Vitesse du vent maximale v_m	25	m/s
Vitesse du vent de démarrage v_d	4	m/s
Vitesse nominale de la turbine	263	tr/min

Tableau 2 : Paramètres de la Génératrice Asynchrone à Double Alimentation :

Définition des paramètres et symbole	Valeur	Unité
Puissance nominale P_n	10	Kw
Tension nominale V_s	230/400	V
Courant nominale I_s	20/30	A
Vitesse nominale Ω_n	1420	tr/min
Fréquence nominale f	50	Hz
Nombre des paires des pôles	2	-

Résumé

Résumé :

Ce travail présente l'étude et la commande d'un système éolien à vitesse variable basé sur une génératrice asynchrone à double alimentation (GADA) de 10 Kw. L'objectif principal consiste à améliorer l'extraction de la puissance éolienne en utilisant la technique MPPT afin d'assurer un fonctionnement optimal de la turbine malgré les variations de la vitesse du vent.

Deux techniques de commande ont été étudiées, à savoir : la commande MPPT avec régulateur classique proportionnel intégral (PI) et la commande MPPT avec régulateur intelligent flou. La première méthode permet d'assurer le suivi de la vitesse de référence avec une structure simple, tandis que la commande floue offre des meilleures performances en termes de rapidités, stabilité et robustesse face aux perturbations.

Cette étude montre l'intérêt des techniques de commande intelligente pour améliorer les performances des systèmes éoliens à vitesse variable.

Mots-clés : MPPT, GADA, Énergie Éolienne, Vitesse variable, RI-Flou, RC-PI.

الملخص:

يقدم هذا العمل دراسة وتحكماً في نظام طاقة رياح ذي سرعة متغيرة يعتمد على مولد غير متزامن مزدوج التغذية (GADA) بقوة 10 كيلوواط. ويتمثل الهدف الرئيسي في تحسين استخراج القدرة الريحية باستعمال تقنية تتبع نقطة الاستطاعة العظمى (MPPT)، وذلك لضمان التشغيل الأمثل للتوربين رياح رغم التغيرات المستمرة في سرعة الرياح. تمت دراسة تقنيتين للتحكم، وهما: التحكم بتقنية MPPT باستخدام المنظم التقليدي التناسبي التكامل (RC-PI)، والتحكم بتقنية MPPT باستخدام المنظم الذكي الضبابي. تتيح الطريقة الأولى تتبع السرعة المرجعية ببنية بسيطة، في حين يوفر التحكم الضبابي أداءً أفضل من حيث سرعة الاستجابة، والاستقرار، والمتانة في مواجهة الاضطرابات. تُبرز هذه الدراسة أهمية تقنيات التحكم الذكية في تحسين أداء أنظمة طاقة الرياح ذات السرعة المتغيرة. **الكلمات المفتاحية:** MPPT، GADA، طاقة الرياح، السرعة المتغيرة، المنظم الضبابي (RI-Flou)، المنظم التناسبي التكامل (RC-PI).

Abstract :

This work presents the study and control of a variable-speed wind energy system based on a 10 Kw Doubly Fed Induction Generator (DFIG). The main objective is to improve wind power extraction using the Maximum Power Point Tracking (MPPT) technique in order to ensure optimal turbine operation despite variations in wind speed.

Two control techniques were studied, namely : MPPT control using a conventional Proportional-Integral controller (PI controller) and MPPT control using an intelligent Fuzzy Logic controller. The first method ensures reference speed tracking with a simple structure, while the fuzzy control provides better performance in terms of response speed, stability, and robustness against disturbances.

This study highlights the importance of intelligent control techniques in improving the performance of variable-speed wind energy systems.

Keywords : MPPT, DFIG, Wind Energy, Variable Speed, Fuzzy Logic Controller, PI Controller.