



Faculté : Technologie
Département : Electrotechnique
Domaine : Science et Technologie
Filière : Electrotechnique
Spécialité : Electrotechnique Industriel

MEMOIRE DE MASTER

Présenté en vue de l'obtention du diplôme
Master

Thème :

**Contrôle de la génératrice asynchrone à double
alimentation dans le system éolien**

Présenté par :

- ❖ BENHAMOUCHE REDA
- ❖ KHOUALDIA AMIN

Jury de soutenances :

Pr. BAHI Tahar	professeur	BADJI MOKHTAR ANNABA	Président
Dr. ZERZOURI Nora	MCA	BADJI MOKHTAR ANNABA	Encadrant
Dr. LAKHDARA Amira	MCB	BADJI MOKHTAR ANNABA	Examinateur

Année universitaire :
2024/2025

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à toutes celles et ceux qui ont, de près ou de loin, contribué à la réalisation de ce projet de fin d'études.

Mes remerciements vont à mon encadrante, Madame **Zerouri Noura**, pour sa disponibilité, ses conseils avisés, son accompagnement constant et son soutien précieux tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique, sa pédagogie et sa passion pour le domaine ont été pour moi une véritable source de motivation et d'inspiration.

Je tiens à remercier du fond du cœur mes parents, mon père et ma mère, pour leur soutien constant et leur patience, malgré toutes les difficultés que j'ai rencontrées depuis mon tout premier jour à l'école primaire. **Alhamdoullah**, j'ai pu surmonter ces épreuves, une à une. Mon parcours a été particulier : du primaire au collège, du lycée à l'enseignement supérieur, entre le département d'électronique puis celui d'électrotechnique, le chemin n'a jamais été simple. Mais grâce à la volonté, à la foi, et au soutien de mes proches, j'ai pu avancer et persévérer.

"أَنْتَ تُرِيدُ وَ أَنَا أُرِيدُ وَ يَفْعَلُ اللَّهُ مَا يُرِيدُ" — Nous faisons des plans, mais c'est la volonté de Dieu qui s'accomplit. Et pour cela, je remercie Dieu de m'avoir permis d'arriver jusqu'ici.

ملخص :

يتناول هذا العمل دراسة نظام التحكم في آلة غير متزامنة مزدوجة التغذية (DFIG) المدمجة ضمن نظام تحويل طاقة الرياح. الهدف الرئيسي هو تحسين الأداء الديناميكي للآلة، خاصة من حيث الاستقرار، وتنظيم السرعة، وتعظيم معامل القدرة C_p ، وذلك في ظل تغيرات سرعة الرياح. لتحقيق ذلك، تم اعتماد تقنيتين للتحكم: التحكم الكلاسيكي، والتحكم الذكي باستخدام الشبكات العصبية الاصطناعية.

تم بناء نموذج كامل للنظام باستخدام برنامج MATLAB/Simulink ، يتضمن السلوك الديناميكي للتوربين الهوائي، والمعادلات الرياضية للآلة، بالإضافة إلى كتل التحكم. تم التركيز بشكل خاص على تأثير التغيرات المفاجئة في سرعة الرياح، والتي تعد من أبرز التحديات في أنظمة الطاقات المتجدددة. يسمح التحكم المتجهي بفصل التحكم في التدفق والتيار، مما يوفر تحكماً جيداً في العزم والسرعة، بينما يوفر التحكم بالشبكات العصبية قدرة أكبر على التكيف مع الظروف المتغيرة وتحسين الاستجابة الديناميكية للنظام.

أظهرت نتائج المحاكاة فعالية كلا الطريقتين، حيث يضمن التحكم المتجهي استقراراً وأداءً جيداً، في حين يعزز التحكم بالشبكات العصبية أداء النظام في الحالات غير المثلية. يبرز هذا العمل أهمية اعتماد تقنيات تحكم متقدمة لضمان تكامل أكثر كفاءة وموثوقية لطاقة الرياح ضمن الشبكة الكهربائية.

Résumé :

Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à la commande d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) utilisée dans un système de conversion éolienne. L'objectif principal est d'améliorer les performances dynamiques de la machine, notamment en termes de stabilité, de régulation de la vitesse et d'optimisation du coefficient de puissance C_p , en particulier dans des conditions de fonctionnement variables. Pour cela, deux approches de commande ont été étudiées : la commande vectorielle classique et une commande intelligente basée sur les réseaux de neurones.

La modélisation complète du système a été réalisée sous MATLAB/Simulink. Elle inclut les caractéristiques aérodynamiques de l'éolienne, les équations de la MADA, ainsi que les blocs de commande. Une attention particulière a été portée à la variation de la vitesse du vent, qui constitue l'un des principaux défis dans l'exploitation des énergies renouvelables. La commande vectorielle permet de découpler les flux et les courants, assurant un bon contrôle du couple et de la vitesse. Quant à la commande par réseau de neurones, elle offre une

capacité d'adaptation aux conditions changeantes du système et améliore la réponse dynamique.

Les résultats de simulation confirment l'intérêt de ces deux techniques. La commande vectorielle garantit un fonctionnement stable et performant, tandis que l'ajout des réseaux de neurones permet d'affiner le contrôle et de mieux faire face aux incertitudes du système. Ce mémoire met ainsi en évidence l'apport des méthodes avancées de commande pour une exploitation plus efficace et plus fiable de l'énergie éolienne.

Abstract:

This work focuses on the control of a Doubly-Fed Induction Generator (DFIG) used in wind energy conversion systems. The main objective is to enhance the dynamic performance of the machine, particularly in terms of stability, speed regulation, and optimization of the power coefficient C_p , under varying wind conditions. To achieve this, two control strategies were investigated: conventional vector control and an intelligent control approach based on neural networks.

A complete system model was developed using MATLAB/Simulink, incorporating the aerodynamic behavior of the wind turbine, the dynamic equations of the DFIG, and the control blocks. Special attention was given to the impact of wind speed fluctuations, which represent a major challenge in renewable energy systems. Vector control allows for decoupled control of flux and current, ensuring good torque and speed regulation. On the other hand, the neural network-based control offers adaptability to changing operating conditions and improves dynamic response.

Simulation results confirm the relevance of both methods. While vector control ensures stable and efficient operation, the addition of neural networks enhances control performance and robustness under uncertainty. This study highlights the potential of advanced control techniques for more effective and reliable wind energy integration.

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralité sur les énergies renouvelable

Introduction.....	3
1. Définition de l'Energie renouvelable	3
1.1. Les types des énergies renouvelables.....	3
2. L'Energie éolienne	9
2.1. Généralité	10
2.1.1. Historique.....	10
2.1.2. Les petites éoliennes.....	11
2.1.3. Les grandes éoliennes	13
2.2. Les différents types d'éoliennes.....	15
2.2.1. Eolienne à axe vertical.....	15
2.2.2. Éoliennes à axe horizontal (HAWT).....	15
2.2.3. Comparaison des performances.....	16
2.2.4. Domaines d'application	17
2.3. Les composants principaux d'une éolienne à axe horizontal	17
Le rotor.....	18
2.3.1. La nacelle.....	18
2.3.2. Le mat (La tour)	23
2.4. Principe de fonctionnement	24
3. Génératerices et convertisseurs utilisés dans les éoliennes :	25
3.1. Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'Energie éolienne :.....	25
3.1.1. Les types des machines électrique.....	25
3.1.2. Système à vitesse fixe - Machine asynchrone à cage (MAS).....	25
3.1.3. Système à vitesse variable - Machine asynchrone a cage (MAS)	26
3.1.4. Système à vitesse variable - Machine synchrone à aimant permanent (MSAP).....	27
3.1.5. Système à vitesse variable - Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	28
4. L'intérêt de la vitesse variable	30
5. Conclusion	30

Chapitre II : Modélisation de la turbine éolienne

Introduction :	32
1. Le principe de conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique	32
1.1. La puissance cinétique	32
1.2. Le coefficient de puissance Cp	33
1.3. La limite de Betz	35
1.4. Zones de fonctionnement d'une éolienne	37
1.4.1. Classification des zones de fonctionnement d'une éolienne	38
2. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	39
3. Modélisation de la turbine	39
3.1. Modèle de multiplicateur	39
3.2. Modèle de l'arbre de transmission	40
4. Méthode de recherche du point maximum de puissance	40
4.1. Maximisation de la puissance sans asservissement	41
4.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :	43
4.3. MPPT avec asservissement (Un réseau de neurone)	46
4.3.1. Les réseaux de neurones artificiels : fondements, architectures et applications	46
4.3.2. Inspiration biologique et fondements théoriques	46
4.3.3. Architecture des réseaux de neurones	47
4.3.4. Principaux types de réseaux neuronaux	47
4.3.5. Processus d'apprentissage et optimisation	47
5. Simulation	51
5.2. MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique V=11 m/s pendant 100s	52
5.3. MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique (vitesse du vent variable)pendant 100s	52
5.4. MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique (vitesse du vent variable) pendant 100s	53
5.5. Interprétation des résultats	54
Conclusion	55

Chapitre III :Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

Introduction.....	57
1. Description de la machine asynchrone à double alimentation de type rotor bobiné	57
2. Principe de fonctionnement de la MADA	59
2.1. Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone	59
2.2. Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone	59
2.3. Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone	59
2.4. Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone	60
3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation	61
3.1. Hypothèses simplificatrices.....	61
3.2. Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation	61
3.2.1. Equation électrique	61
3.2.2. Equation mécanique de la machine :	63
3.3. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan dq.....	63
3.3.1. La transformation de Park	63
3.3.2. Modélisation de la MADA dans le repère de Park.....	64
3.3.3. Equation mécaniques	65
3.4. Modèle d'état de la machine	65
4. Commande vectorielle de la MADA	67
4.1. Modèle de la MADA avec orientation de flux statorique.....	67
4.2. Choix du référentiel pour le modèle diphasé :.....	68
4.3. Courants statoriques en fonction des courants rotoriques.....	69
4.4. Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques.....	69
4.5. Relations entre flux et courants	69
4.6. Types de commande vectorielle	71
4.6.1. Commande vectorielle directe :	71
4.6.2. Commande indirecte des puissances active et réactive	72
5. Modélisation et commande de l'onduleur	74
5.1. Commande MLI de l'onduleur.....	77
5.2. Technique MLI sinus triangle.....	77
6. Résultats de simulation.....	79
6.1. Les résultats de la simulation pour le cas sans asservissement de la vitesse mécanique au niveau de la turbine éolienne.....	79
6.2. Les résultats de la simulation pour le cas avec asservissement de la vitesse mécanique au niveau de la turbine éolienne (Réseau de neurone)	81
7. Conclusion	83
Conclusion générale.....	84
Annexe.....	86
Bibliographie.....	88

Table des figures

Chapitre I

Figure I. 1 : une ferme des turbines éolienne	4
Figure I. 2 : les composants d'une turbine éolienne	4
Figure I. 3 : Le 1er Site des panneaux solaire en Algérie	5
Figure I. 4 : Une centrale Biomasse	7
Figure I. 5 : Le principe de fonctionnement de la production de l'Energie électrique avec la biomasse	7
Figure I. 6 : Fonctionnement de l'Energie hydraulique.....	7
Figure I. 7 : génération de l'électricité dans un centre d'hydro power.....	7
Figure I. 8 : schéma simplifiée du fonctionnement de la géothermie	8
Figure I. 9 : centre de production de l'Energie électrique avec de la géothermie.....	9
Figure I. 10 : Le principe de fonctionnement d'une turbine éolienne.....	10
Figure I. 11 : l'un des premiers moulins dans l'Europe de West.....	11
Figure I. 12 : dessin 3D pour une petite éolienne de 20kw	12
Figure I. 13 : éolienne à domicile a 5kw	12
Figure I. 14 : la taille des éoliennes selon la capacité énergétique	13
Figure I. 15 : La plus grande ferme éolienne dans l'Afrique (Ethiopie)	14
Figure I. 16 : réalisation 3D avec logiciel pour Une ferme des éoliennes dans le nordique (offshore).....	14
Figure I. 17 : Éoliennes à axe vertical (VAWT).....	15
Figure I. 18 : Éoliennes à axe horizontal (HAWT)	16
Figure I. 19 : structure 3D fait par logiciel explique la différence dans la structure entre le HAWT et le VAWT ...	16
Figure I. 20 : Conception 3D fait par logiciel pour les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal ..	17
Figure I. 21 : Un moyeu	18
Figure I. 22 : La nacelle	18
Figure I. 23 : Modelé d'un multiplicateur de vitesse éolien	19
Figure I. 24 : un schéma technique pour les arbres de l'éolienne face un arbre réelle	19
Figure I. 25 : Une Conception 3D d'une génératrice (MADA).....	20
Figure I. 26 : Une génératrice de LABO	20
Figure I. 27 : Conception 3D du système de refroidissement Dans une éolienne	20
Figure I. 28 : schéma du montage de système de refroidissement dans une éolienne.....	20
Figure I. 29 : Armoire de commande d'une éolienne	21
Figure I. 30 : Dispositif de commande de calage de pale d'une éolienne	22
Figure I. 31 : anémomètre associe à une girouette	22
Figure I. 32 : Les diffèrent structure pour les tours Eolienne	23
Figure I. 33 : schéma explicatif du principe de fonctionnement d'une éolienne	24
Figure I. 34 : la structure d'une machine asynchrone a cage (MAS) à vitesse fixe	25
Figure I. 35 : Système éolien base sur une Machine asynchrone à cage (MAS) à vitesse variable	26
Figure I. 36 : Les deux différentes structures de la Machine synchrone à aimant permanent.....	27
Figure I. 37 : Caractéristique de la puissance générer en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent	30

Chapitre II

Figure II. 1 Caractéristique de coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ	34
Figure II. 2 Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p	35
Figure II. 3 Variation de la vitesse du vent avant et après de passer par une turbine éolienne	35
Figure II. 4 Variation du coefficient de puissance en fonction de différente vitesse	37
Figure II. 5 Zone de fonctionnement de l'éolienne selon la vitesse du vent	38
Figure II. 6 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse	43
Figure II. 7 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse	44
Figure II. 8 Schema de fonctionnement d un réseau de neurone	47
Figure II. 9 Interface de l'entraînement du réseau de neurone sur Deep Learning toolbox (Matlab).....	49
Figure II. 10 Performance de l'adaptation	50
Figure II. 11 Bloc de réseau de neurone entraînée	50
Figure II. 12 La vitesse du vent de la zone ou on a simulé la turbine éolienne	51

Chapitre III

Figure III. 1 Conception 3D par logiciel pour la MADA	57
Figure III. 2 Schéma de la MADA	57
Figure III. 3 MADA 150KW dans l'entreprise de mon stage (FERTIAL ANNABA).....	58
Figure III. 4 Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté par un seul convertisseur statique	58
Figure III. 5 Le fonctionnement de la MADA dans les différents modes.....	60
Figure III. 6 Inductance du stator et du rotor d'une machine asynchrone à double alimentation	62
Figure III. 7 Modèle de Park de la MADA.....	64
Figure III. 8 Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances	70
Figure III. 9 Schéma bloc de la commande directe de la Puissance active et réactive de la MADA	71
Figure III. 10 Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle des Puissances du MADA	72
Figure III. 11 Schéma de régulation des courants I_{dr} et I_{qr}	73
Figure III. 12 Schéma onduleur triphasé associe à 2 niveaux	75
Figure III. 13 Schéma de principe de la commande MLI.....	78
Figure III. 14 La tension générer par un onduleur de 2 niveaux	78
Figure III. 15 Bloc de simulation MADA + turbine éolienne (Système complet).....	79

Liste des tableaux

Tableau

Tableau I. 1 : Comparaison des performances de les éoliens à axe horizontal et vertical.....	17
Tableau I. 2 : Les avantages et les inconvénients de la MAS	27
Tableau I. 3 : Les avantages et les inconvénients de la MSAP	28
Tableau I. 4 : Le rôle des composants principaux de la MADA	28
Tableau I. 5 : Avantages de la MADA dans les systèmes à vitesse variable	29
Tableau I. 6 : Inconvénients de la MADA dans les systèmes à vitesse variable	29
Tableau I. 7 : Comparaison entre les différentes machines MAS et MSAP et MADA	30

Introduction générale

La question énergétique se trouve aujourd’hui au cœur des préoccupations globales, tant sur le plan environnemental qu’économique. L’urgence climatique, conjuguée à la raréfaction progressive des ressources fossiles, impose un changement profond dans nos modes de production et de consommation d’énergie. Ce contexte donne aux énergies renouvelables une importance stratégique sans précédent. Parmi elles, l’énergie éolienne occupe une place croissante, tant pour son potentiel technique que pour sa compatibilité avec les objectifs de développement durable.

Les énergies renouvelables représentent aujourd’hui 29 % de la production électrique mondiale, avec une croissance annuelle moyenne de 8 % depuis 2010. Cette dynamique s’explique par leur capacité à réduire les émissions de gaz à effet de serre tout en limitant la dépendance aux combustibles fossiles. L’énergie éolienne, en particulier, connaît un essor remarquable avec une capacité installée globale dépassant 743 GW en 2023, soit l’équivalent de 700 réacteurs nucléaires. Son développement s’accompagne cependant de défis techniques majeurs, notamment liés à l’intermittence de la ressource et à l’intégration au réseau électrique.

Parallèlement, l’énergie électrique s’impose comme la forme d’énergie la plus utilisée et la plus polyvalente. Elle est indispensable à la quasi-totalité des secteurs d’activité, depuis les infrastructures industrielles jusqu’aux usages domestiques. Sa production, sa qualité et sa gestion conditionnent le bon fonctionnement des systèmes modernes. Assurer une production électrique fiable, propre et efficiente est donc un enjeu majeur de notre époque.

Dans ce contexte, les systèmes de conversion d’énergie éolienne font l’objet de recherches soutenues. La Machine Asynchrone à Double Alimentation (MADA) s’est imposée comme une solution particulièrement intéressante pour les éoliennes de moyenne et grande puissance. Ce type de machine présente plusieurs avantages : elle permet une exploitation à vitesse variable, améliore le rendement global du système, et autorise une gestion souple de la puissance réactive injectée dans le réseau. Son architecture, combinant un stator connecté directement au réseau et un rotor alimenté par un convertisseur à faible dimensionnement, en fait une option économiquement et techniquement pertinente.

Cependant, pour exploiter pleinement les avantages de la MADA dans un contexte éolien, il est nécessaire de mettre en œuvre des stratégies de commande avancées. Ces dernières doivent non seulement optimiser l’extraction de l’énergie, mais également garantir la stabilité du système face aux variations de vent et aux exigences du réseau électrique. C’est précisément dans cette optique que s’inscrit ce travail.

Ce mémoire vise à développer une modélisation rigoureuse et une stratégie de commande adaptée pour une chaîne de conversion éolienne à base de MADA. L’approche proposée s’appuie à la fois sur les équations électromagnétiques de la machine, sur une représentation dynamique du système, et sur des techniques de commande éprouvées. L’objectif est d’aboutir à un fonctionnement stable, efficace et conforme aux critères de performance requis par les réseaux modernes.

Dans ce cadre, il est essentiel de disposer d'outils de modélisation précis et de dispositifs de commande robustes permettant de simuler, analyser et optimiser le comportement de l'ensemble du système, depuis la captation de l'énergie mécanique par la turbine jusqu'à l'injection de la puissance électrique dans le réseau. La maîtrise de ces aspects techniques est indispensable pour garantir une exploitation efficace de l'énergie éolienne, tout en respectant les contraintes de stabilité, de qualité de l'énergie et de continuité de service. C'est donc dans ce cadre que nous allons développer notre étude à travers les chapitres suivants :

Dans le premier chapitre, on commencera par présenter les énergies renouvelables, leurs différentes sources. On parlera ensuite plus en détail des éoliennes : leur structure, les différents types qu'on rencontre, et comment elles fonctionnent. On expliquera aussi les différentes zones de fonctionnement et les types de générateurs utilisés, ainsi que les systèmes de régulation mécanique qui permettent de contrôler tout ça.

Le deuxième chapitre sera dédié à la modélisation de la turbine éolienne. On mettra en équations les principaux paramètres comme le coefficient de puissance C_p , le rapport de vitesse lambda λ , et l'angle de calage des pales beta β . On détaillera aussi les modèles de l'arbre de transmission et du multiplicateur. Enfin, on présentera différentes méthodes de commande, en insistant sur une méthode innovante basée sur les réseaux de neurones, qui montre un vrai potentiel pour améliorer la performance.

Le troisième chapitre portera sur la modélisation et la commande du générateur asynchrone à double alimentation (MADA). On commencera par les équations de la machine, puis on présentera la commande vectorielle orientée flux. Une petite étude sur les onduleurs à modulation de largeur d'impulsion (MLI) viendra compléter ce chapitre, car ils jouent un rôle essentiel dans le pilotage du rotor.

Pour finir, on fera la simulation complète de la chaîne éolienne, avec la turbine, la génératrice et le convertisseur, pour vérifier que tout fonctionne bien ensemble.

Enfin, on conclura par une synthèse générale du travail, en mettant en avant les résultats importants et en proposant des pistes pour continuer à améliorer cette étude.

Chapitre I :

**Généralité sur les énergies
renouvelable**

Introduction

Les énergies renouvelables, issues de sources naturelles inépuisables ou rapidement renouvelables, s'imposent aujourd'hui comme une réponse incontournable aux défis climatiques, énergétiques et socio-économiques du XXI^e siècle. Selon l'Agence internationale de l'énergie (AIE, 2023), leur déploiement accéléré constitue un pilier central de la transition énergétique mondiale, visant à réduire de 43 % les émissions de gaz à effet de serre d'ici 2030, conformément aux scénarios de l'Accord de Paris (GIEC, 2023). Portées par des avancées technologiques majeures et une baisse significative des coûts (IRENA, 2023), ces énergies – solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et biomasse – représentent désormais 30 % de la production électrique mondiale (AIE, 2023), tout en offrant des perspectives de croissance inclusive et de résilience territoriale. Leur essor s'inscrit dans un contexte d'urgence climatique, où le dernier rapport du GIEC (2023) souligne la nécessité de limiter le réchauffement à 1,5 °C, impliquant un abandon progressif des énergies fossiles. Parallèlement, les énergies renouvelables répondent à des enjeux de sécurité énergétique et d'accès à l'électricité pour près de 760 millions de personnes privées de services de base (ONU, Objectif 7 des ODD, 2023). Toutefois, leur intégration à grande échelle soulève des défis techniques, tels que l'intermittence des sources ou l'adaptation des réseaux, ainsi que des questions socio-politiques liées à l'acceptabilité et à la justice transitionnelle [1].

1. Définition de l'Energie renouvelable

Les énergies renouvelables, parfois abrégées EnR, se définissent comme des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est suffisamment rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. Elles tirent leur origine de phénomènes naturels cycliques ou constants induits par les astres : principalement le Soleil pour la chaleur et la lumière qu'il produit, mais également l'attraction de la Lune générant les marées, et la chaleur produite par la Terre à travers la géothermie. Le caractère renouvelable de ces énergies repose essentiellement sur deux facteurs interdépendants : la vitesse à laquelle la source est consommée et la vitesse à laquelle elle se renouvelle. Le concept d'énergies renouvelables s'oppose directement aux énergies fossiles, dont les stocks diminuent progressivement et dont l'exploitation s'accompagne généralement d'émissions polluantes significatives. Cette distinction fondamentale explique pourquoi les énergies renouvelables sont aujourd'hui au cœur des stratégies de transition énergétique développées à l'échelle internationale [1].

1.1.Les types des énergies renouvelables

➤ L'énergie éolienne

Une source d'énergie renouvelable qui transforme l'énergie cinétique du vent en électricité grâce à des turbines installées sur des éoliennes. Ces dernières, composées de pales reliées à un rotor et à un générateur, exploitent les mouvements des masses d'air créés par les différences de pression atmosphérique. L'éolien se décline en deux types principaux

onshore (terrestre) et offshore (en mer), ce dernier bénéficiant de vents plus constants et puissants [3].



Figure I. 1: une ferme des turbines éolienne

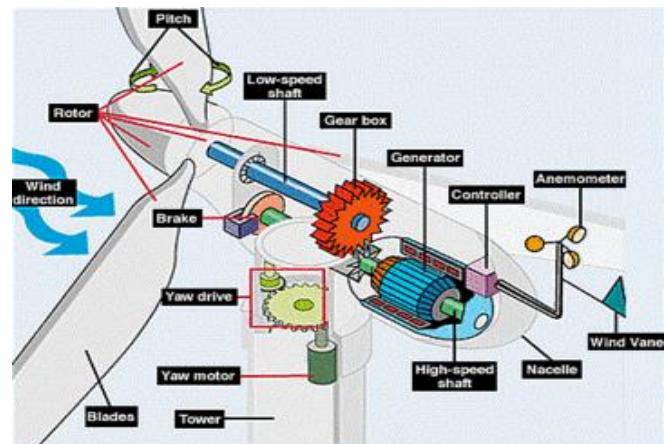


Figure I. 2: les composants d'une turbine éolienne

Avantages techniques

Haute efficacité énergétique

Les éoliennes modernes convertissent jusqu'à 50 % de l'énergie cinétique du vent en électricité, grâce à des pales aérodynamiques et des générateurs à aimants permanents (AIE, 2023) [2].

Évolutivité et modularité

Les parcs éoliens peuvent être adaptés à différentes échelles, de la turbine individuelle (pour l'autoconsommation) aux fermes géantes de plusieurs GW [7].

Intégration avec les réseaux intelligents

Les systèmes de prévision météo et de contrôle en temps réel optimisent la production et réduisent les pertes. Les convertisseurs électroniques de puissance améliorent la stabilité des réseaux.

Faibles émissions opérationnelles

Aucune combustion ni émission directe de polluants (SO_2 , NO_x) ou de particules fines durant la phase de production.

Innovation technologique continue

Les éoliennes de dernière génération (pales de 100+ mètres, turbines de 15+ MW) augmentent le rendement. Les matériaux composites (fibre de carbone) réduisent le poids et augmentent la durabilité.

Inconvénients techniques

Intermittence et variabilité

La production dépend de la vitesse et de la régularité du vent, nécessitant des solutions de stockage (batteries lithium-ion, hydrogène vert) ou des centrales d'appoint pour équilibrer le réseau.

Défis de stabilité du réseau

L'injection d'énergie variable peut causer des fluctuations de fréquence et de tension, exigeant des investissements dans des systèmes de régulation et des lignes haute tension.

Limites matérielles et recyclage

Les pales en composites (fibre de verre, résine époxy) sont difficiles à recycler. Seuls 10 à 15 % des matériaux d'une pale sont actuellement réutilisables, malgré des progrès en pyrolyse ou broyage.

Dépendance aux conditions géographiques

Les zones à faible vent ou à turbulences (reliefs accidentés) limitent la rentabilité. Les modèles de prévision restent imparfaits, avec des marges d'erreur de 10 à 20 % [1].

Faible densité énergétique

Comparé au nucléaire ou au gaz, l'éolien nécessite de vastes surfaces pour produire des quantités équivalentes d'électricité (environ 3 à 5 km² par GW en onshore) [1].

➤ Energie solaire

L'énergie solaire se décline principalement en trois technologies : photovoltaïque, thermique et thermodynamique. Ces technologies permettent la production d'électricité et de chaleur en captant directement le rayonnement solaire. La baisse significative des coûts des panneaux photovoltaïques ces dernières années a considérablement accéléré leur déploiement [12].



Figure I. 3 : Le 1er Site des panneaux solaire en Algérie

Avantages techniques

Haute modularité et flexibilité

Les systèmes photovoltaïques (PV) peuvent être déployés à toutes les échelles : des panneaux résidentiels (toits) aux centrales solaires de plusieurs gigawatts [13].

Rendement croissant des cellules PV

Les cellules à pérovskite ou en tandem (couches multiples) atteignent des rendements de laboratoire dépassant 33 %, contre 15-22 % pour le silicium cristallin standard. Les panneaux commerciaux approchent 24 % d'efficacité [14].

Intégration avec le stockage et les smart grids

Les systèmes hybrides (solaires + batteries lithium-ion) réduisent l'intermittence. Les onduleurs intelligents améliorent la stabilité du réseau en ajustant la tension et la fréquence en temps réel.

Faible maintenance opérationnelle

Aucune pièce mécanique mobile (hors trackers), limitant les pannes. Les panneaux PV nécessitent uniquement un nettoyage périodique et une inspection des connexions.

Adaptabilité aux environnement divers

Fonctionne dans des zones isolées (électrification rurale) ou hostiles (déserts), avec des

solutions hors-réseau (microgrids). Les panneaux résistent à des températures extrêmes (-40°C à +85°C).

Technologies complémentaires (CSP)

Le solaire thermodynamique (CSP) intègre un stockage thermique (sels fondus) pour produire de l'électricité même la nuit, avec des durées de stockage allant jusqu'à 15 heures.

Inconvénients techniques

Intermittence et dépendance météorologique

La production varie selon l'ensoleillement (cycles jour/nuit, nuages). Les systèmes PV ne génèrent que 10-25 % de leur capacité nominale en hiver sous les latitudes tempérées [13].

Besoins massifs de stockage

Pour un réseau 100 % solaire, des batteries à grande échelle sont nécessaires, avec des pertes énergétiques (rendement cycle : 80-90 % pour le lithium-ion) et des coûts élevés (100-150 \$/kWh en 2023) [2].

Dégradation des panneaux PV

Les cellules perdent 0,5 à 1 % de rendement par an en raison de l'humidité, des UV et des cycles thermiques. Après 25 ans, leur efficacité chute à 80-85 % de la valeur initiale [13].

Utilisation de terres et matériaux critiques

Une centrale PV nécessite environ 2,5 à 5 km² par GW (onshore). Les cellules à haut rendement dépendent de l'argent, du tellure ou de l'indium, des matériaux rares.

Limites physiques des cellules PV

La limite théorique de Shockley-Queisser pour le silicium est de 33,7 %, imposant une barrière physique aux gains futurs d'efficacité sans rupture technologique.

Déchets et recyclage complexe

Les panneaux contiennent du verre, de l'aluminium et des plastiques, mais aussi des métaux lourds (plomb, cadmium). Seuls 10 % des panneaux sont recyclés en 2023, faute de filières industrielles matures.

Challenges thermiques (CSP)

Les centrales CSP nécessitent des températures très élevées (500-1000°C) et consomment de l'eau pour le refroidissement, limitant leur déploiement en zones arides.

➤ Biomasse

La biomasse englobe l'exploitation énergétique des matières organiques, notamment pour le chauffage via le bois-énergie. Cette ressource présente l'avantage d'être stockable et mobilisable selon les besoins [15].



Figure I. 4 : Une centrale Biomasse

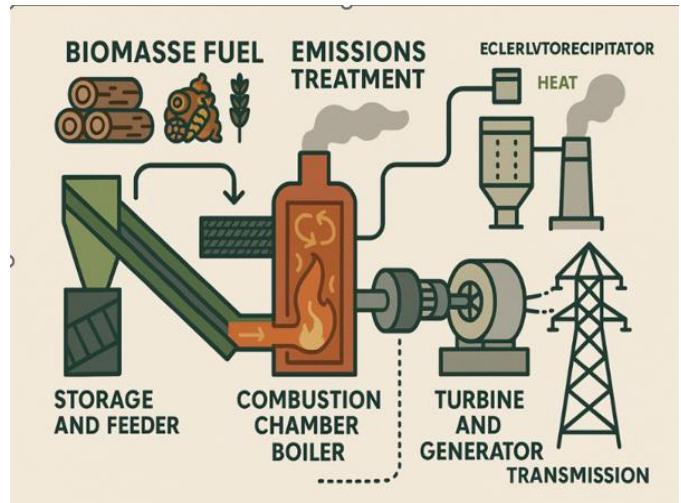


Figure I. 5 : Le principe de fonctionnement de la production de l'Energie électrique avec la biomasse

Avantages techniques

Polyvalence : Combustion, gazéification, méthanisation, biocarburants.

Stockage facile : Ressource disponible à la demande.

Valorisation des déchets : Réduction des déchets organiques.

Compatibilité infrastructures : Conversion de centrales à charbon.

Inconvénients techniques

Faible densité énergétique : Logistique lourde (transport, volume).

Émissions polluantes : Particules fines, NO_x (nécessite filtres).

Dégénération des sols : Risques liés aux cultures énergétiques intensives.

Efficacité limitée : Rendement médiocre en petite échelle (ex. poêles à bois).

➤ Energie hydraulique

L'énergie hydraulique, exploitant les chutes d'eau et les cours d'eau, permet la production d'électricité. Elle constitue historiquement la première des énergies renouvelables exploitées à grande échelle et reste aujourd'hui la principale source d'électricité renouvelable mondiale [16].

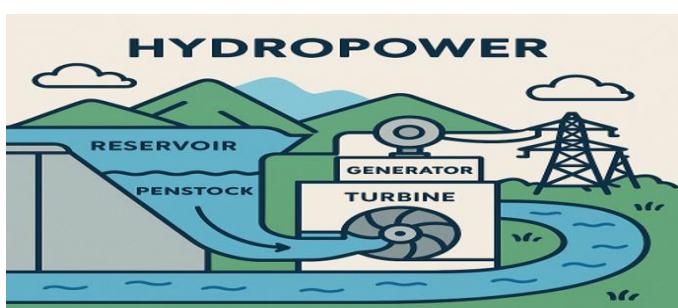


Figure I. 6 : Principe de Fonctionnement de l'Energie hydraulique

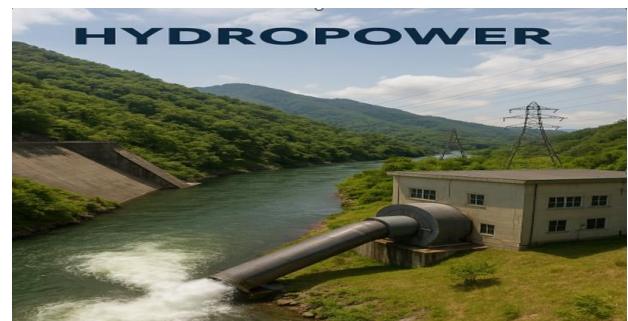


Figure I. 7 : génération de l'électricité dans un centre d'hydro power

Avantages techniques

Rendement élevé : Jusqu'à 90 % de conversion énergie/électricité (turbines optimisées).

Stockage (STEP) : Pompage-turbinage (70-85 % de rendement cyclique).

Pilotable : Réponse rapide aux pics de demande, stabilisation des réseaux.

Longévité : Durée de vie de 50 à 100 ans.

Faibles émissions : Aucun CO₂ direct (sauf CH₄ en zones tropicales).

Inconvénients techniques

Dépendance géographique : Sites viables limités (reliefs, débits stables).

Impacts écologiques : Perturbation des écosystèmes aquatiques, sédimentation.

Risques structurels : Ruptures de barrages (séismes, vieillissement).

Émissions de CH₄ : Importantes en réservoirs tropicaux.

Coûts initiaux élevés : 1 à 5 milliards \$/GW, délais longs (5-10 ans).

➤ Géothermie

Enfin, la géothermie exploite la chaleur interne de la Terre pour produire de l'énergie. Plusieurs recherches académiques, notamment en Algérie, explorent actuellement le potentiel de cette ressource prometteuse, comme l'illustrent les travaux présentés lors de la journée d'étude à l'Université Larbi Ben M'Hidi Oum El Bouaghi [16].

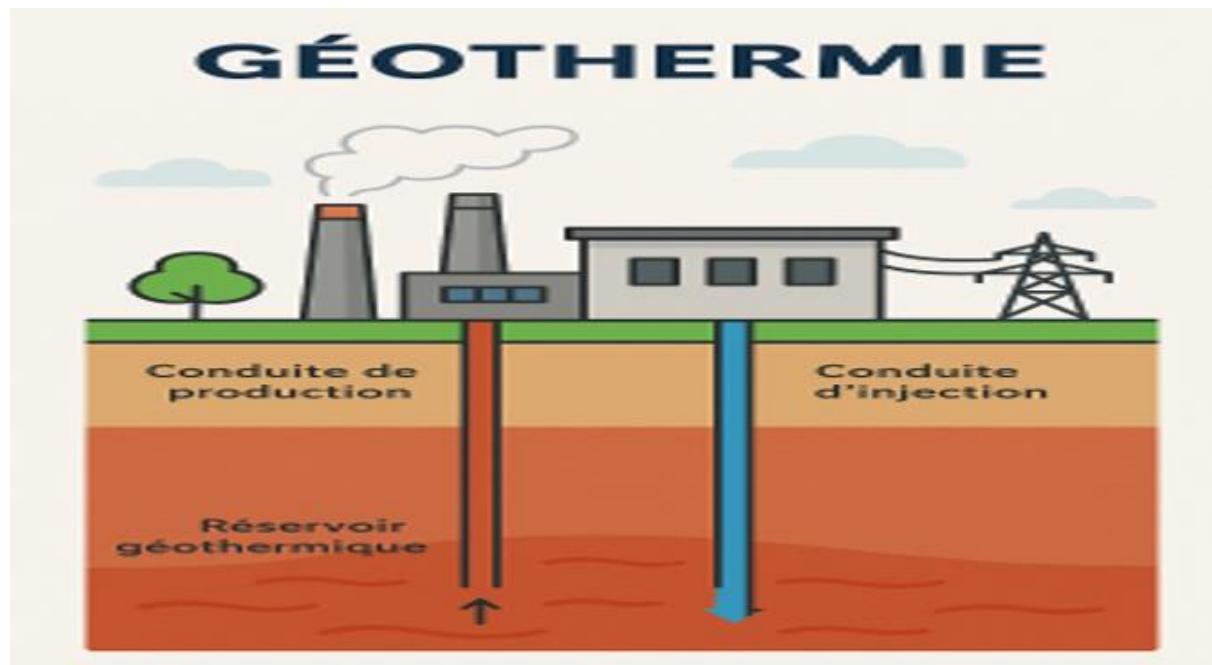


Figure I. 8 : schéma simplifiée du fonctionnement de la géothermie



Figure I. 9 : centre de production de l'Energie électrique avec de la géothermie

Avantages techniques

Production continue : Facteur de capacité élevé (70-95 %).

Rendement élevé : Jusqu'à 50 % en cogénération.

Faible empreinte spatiale : 0,1-0,3 km² pour 100 MW.

Ressource durable : Recharge naturelle des réservoirs.

Inconvénients techniques

Dépendance géologique : Sites viables rares (zones volcaniques, bassins).

Risques sismiques : Micro-séismes induits par injection de fluides.

Corrosion : Dégâts causés par les fluides géothermaux (sels, H₂S).

Coûts de forage : 5 à 10 M\$ par puits, avec risques d'échec.

2. L'Energie éolienne

Un aérogénérateur est un dispositif qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Il se compose généralement des éléments suivants :

Pales : Captent la force du vent et entraînent un rotor.

Rotor : Transforme l'énergie mécanique des pales en rotation.

Générateur (situé dans une **nacelle**) : Convertit l'énergie rotationnelle en électricité.

Tour : Supporte la structure et élève les pales pour capter des vents plus forts.

Fonctionnement :

Le vent fait tourner les pales, actionnant un arbre relié à un générateur (via un multiplicateur

de vitesse). Le générateur produit ensuite de l'électricité, souvent injectée dans un réseau électrique après conversion par un onduleur [3].



Figure I. 10 : Le principe de fonctionnement d'une turbine éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui exploite la force du vent pour produire de l'énergie, généralement mécanique ou électrique. Cette conversion s'effectue à l'aide de dispositifs appelés éoliennes ou aérogénérateurs, dont les pales tournent sous l'effet du vent, entraînant un générateur qui produit de l'électricité. Classée parmi les énergies propres, l'énergie éolienne a l'avantage majeur de ne pas émettre de gaz à effet de serre lors de son fonctionnement, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. En plus de son faible impact environnemental, cette source d'énergie est inépuisable à l'échelle humaine, ce qui en fait une solution durable pour répondre à la demande croissante en électricité. Elle peut être exploitée à différentes échelles, allant des parcs éoliens terrestres et maritimes (offshore) aux petites installations domestiques [4].

2.1.Généralité

2.1.1. Historique

L'histoire des éoliennes commence il y a plus de 3 000 ans en Perse antique, où les premiers moulins à vent verticaux, appelés *Panemones*, émergent pour moudre le grain et irriguer les cultures. Constitués de pales en roseau ou en bois fixées à un axe vertical, ces systèmes rudimentaires exploitaient des vents multidirectionnels, marquant la première tentative humaine de domestication de l'énergie éolienne. En parallèle, la Chine développe dès le 1^e siècle des moulins à axe vertical en bambou, tandis qu'en Europe médiévale, le moulin à vent horizontal s'impose à partir du XII^e siècle, symbolisé par les moulins-tours hollandais du XIV^e siècle, capables de pomper l'eau des polders et de transformer les paysages agricoles. Ces innovations préindustrielles, bien qu'efficaces pour leur époque, sont progressivement

supplantées par la machine à vapeur au XVIII^e siècle, reléguant les moulins à vent au statut de curiosités historiques.

La renaissance de l'énergie éolienne comme source d'électricité débute à la fin du XIX^e siècle, dans un contexte de révolution industrielle. En 1887, l'Écossais James Blyth construit la première éolienne génératrice d'électricité, une turbine de 12 kW alimentant sa résidence,



Tandis qu'aux États-Unis, Charles F. Brush perfectionne en 1888 une éolienne à 144 pales en cèdre produisant 12 kW pour charger des batteries. Ces prototypes, bien que marginaux, posent les bases technologiques : Poul la Cour, pionnier danois, utilise dès 1891 l'électricité éolienne pour électrolyser l'eau et stocker de l'hydrogène, anticipant les enjeux modernes de stockage. Le XX^e siècle voit des expérimentations audacieuses, comme la turbine soviétique Balaclava (1931), première éolienne connectée à un réseau électrique, ou la Smith-Putnam (1941), turbine américaine de 1,25 MW aux pales d'acier de 53 m, dont l'échec technique freine temporairement l'enthousiasme.

Les chocs pétroliers des années 1970 relancent l'intérêt pour l'éolien, catalysant des avancées majeures. Le Danemark devient l'épicentre de cette révolution : en 1978, la turbine activiste TVind (2 MW) défie les standards, tandis que Vestas industrialise dans les années 1980 les éoliennes tri-pales à axe horizontal (HAWT), modèle dominant aujourd'hui. Les années 1990 marquent l'essor des parcs offshore, symbolisé par le projet danois Vindeby (1991), 11 turbines de 450 kW ancrées en mer. Le XXI^e siècle consacre l'énergie éolienne comme pilier de la transition énergétique : la Chine, avec 281 GW de capacité installée en 2022, domine un marché mondialisé, tandis que des turbines comme la Haliade-X de GE (14 MW, 260 m de haut) repoussent les limites techniques, alimentant 18 000 foyers annuels.

Cependant, cette croissance fulgurante s'accompagne de défis complexes. Environnementalement, les éoliennes menacent les oiseaux (500 000 collisions annuelles estimées aux États-Unis) et peinent à recycler leurs pales en composites, seulement 85 % des matériaux étant réutilisables. Socialement, les conflits d'acceptation locale persistent, comme en France où des riverains attribuent aux infrasons des éoliennes des troubles sanitaires non scientifiquement validés. Techniquement, l'ère du gigantisme – avec des projets de turbines de 20 MW d'ici 2030 – questionne la durabilité des matériaux et l'accès aux métaux rares. Pourtant, l'innovation reste dynamique : éoliennes flottantes (projet écossais Hywind), hybridation avec l'hydrogène vert, ou micro-réseaux décentralisés en Afrique illustrent une quête d'adaptation aux enjeux climatiques et géopolitiques [5].

2.1.2. Les petites éoliennes

Les petites éoliennes, définies comme des générateurs éoliens de puissance inférieure à 100 kW, représentent une solution intéressante dans le contexte actuel de transition énergétique



Figure I. 12 : dessin 3D pour une petite éolienne de 20kw



Figure I. 13 : éolienne à domicile à 5kw

vers des sources renouvelables décentralisées. Contrairement aux grandes installations industrielles, elles sont destinées à une production d'électricité locale, souvent en autoconsommation ou dans des zones isolées non reliées au réseau. Elles se déclinent en plusieurs catégories : les micro-éoliennes (moins de 1 kW), les petites éoliennes (entre 1 et 10 kW) et les moyennes éoliennes (jusqu'à 100 kW), avec des architectures à axe horizontal ou vertical selon les contraintes environnementales. Leur fonctionnement repose sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis électrique, avec un rendement influencé par la vitesse moyenne du vent, la hauteur d'installation, les turbulences locales et le design aérodynamique. Le facteur de capacité, souvent compris entre 10 % et 25 %, reste inférieur à celui des grandes éoliennes en raison de conditions de vent moins favorables. Elles sont utilisées pour alimenter Des habitations, des fermes, des équipements techniques isolés, ou dans le cadre de micro-réseaux hybrides combinant éolien, solaire et stockage par batteries. Parmi leurs avantages, on note leur facilité d'installation, leur indépendance vis-à-vis du réseau, leur adaptabilité aux besoins locaux et leur rôle dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois, Elles présentent aussi des limitations telles qu'une production intermittente, un coût plus élevé au kilowattheure, une sensibilité aux turbulences en milieu urbain et des nuisances sonores potentielles. Les avancées récentes concernent l'amélioration de l'efficacité aérodynamique, l'intégration urbaine des éoliennes verticales, le contrôle intelligent des

systèmes et l'utilisation de technologies de fabrication locales comme l'impression 3D. En somme, les petites éoliennes constituent un levier stratégique pour la transition énergétique, en particulier dans les zones rurales ou les contextes insulaires et isolés, où elles permettent une production autonome, propre et complémentaire aux autres énergies renouvelables telles que le solaire [6].

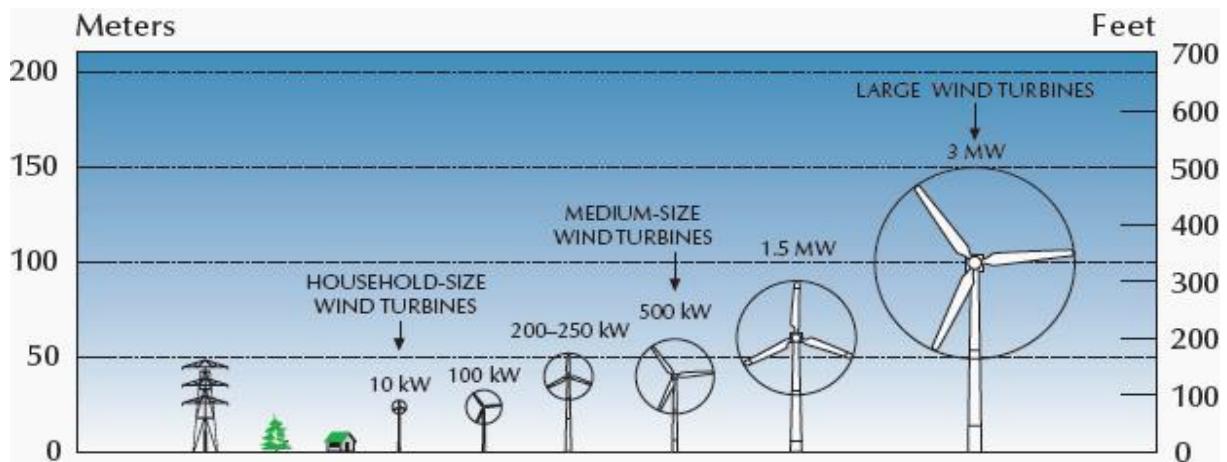


Figure I. 14 : la taille des éoliennes selon la capacité énergétique

Catégorie	Puissance nominale	Usage typique
Micro-éoliennes	< 1 kW	Applications portables, capteurs, etc.
Petites éoliennes	1 – 10 kW	Résidences, fermes, petites entreprises
Moyennes éoliennes	10 – 100 kW	Communautés, zones rurales

2.1.3. Les grandes éoliennes

Les grandes éoliennes modernes ont généralement une puissance comprise entre 2 MW et 15 MW, avec des diamètres de rotor atteignant 240 mètres pour les modèles offshore de dernière génération. Elles sont presque exclusivement à axe horizontal, avec trois pales montées sur un rotor entraînant une génératrice, via un multiplicateur (dans la plupart des cas) ou en entraînement direct (direct drive). Les hauteurs de moyeu dépassent souvent 100 mètres, permettant de capturer des vents plus stables et plus puissants [7].

1) Fonctionnement et rendement

Le principe de base repose sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis électrique. Le rendement théorique maximal est donné par la limite de Betz (~59,3 %). En pratique, les éoliennes modernes atteignent un coefficient de puissance C_p compris entre 0,4 et 0,5. Leur facteur de capacité varie entre 30 % et 55 %, bien supérieur à

celui des petites éoliennes. Les systèmes de régulation incluent des contrôles d'orientation (yaw) et de pas variable (pitch) pour maximiser la production et protéger les composants [8].

2) Onshore vs offshore

Les grandes éoliennes terrestres (onshore) sont plus simples à installer et entretenir, mais limitées en taille et soumises à des contraintes d'acceptabilité sociale. Les éoliennes offshore, installées en mer, bénéficient de vents plus réguliers et permettent l'installation de turbines



Figure I. 15 : La plus grande ferme éolienne dans l'Afrique (Ethiopie)



Figure I. 16 : réalisation 3D avec logiciel pour Une ferme des éoliennes dans le nordique (offshore)

plus grandes, mais nécessitent des fondations spécifiques (monopieux, jacket, flotteurs) et un Câblage sous-marin complexe. Le coût actualisé de l'énergie (LCOE) devient toutefois compétitif, notamment grâce aux économies d'échelle [9].

3) Enjeux économiques et environnementaux

Les grandes éoliennes contribuent fortement à la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Un parc de 1 GW peut éviter l'émission de plus d'un million de tonnes de CO₂ par an. Leur coût au kWh est en baisse continue depuis deux décennies. Toutefois, des défis persistent : intégration au réseau électrique, recyclage des matériaux (notamment les pales en composites), bruit, impact paysager, et effets sur la faune (oiseaux, chauves-souris). De nombreuses études environnementales accompagnent les projets d'installation [10].

4) Perspectives et innovations

Les fabricants développent actuellement des modèles de plus en plus puissants, comme la GE Haliade-X 14 MW ou la Siemens Gamesa SG 14-236 DD, avec une production annuelle dépassant les 70 GWh par turbine. Les innovations portent sur :

- Des matériaux plus légers et recyclables,
- L'aérodynamique optimisée des pales,
- Les systèmes de maintenance prédictive basés sur l'intelligence artificielle,

L'intégration dans des réseaux intelligents et hybrides (stockage, hydrogène vert). Des éoliennes flottantes sont aussi en cours de déploiement pour exploiter des zones maritimes plus profondes [10].

2.2. Les différents types d'éoliennes

2.2.1. Éolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont un axe de rotation perpendiculaire au sol. Contrairement, elles peuvent capter le vent quelle que soit sa direction, ce qui les rend particulièrement intéressantes en milieu urbain ou dans les zones où le vent est turbulent. Il existe plusieurs types de VAWT, notamment les modèles **Darrieus** (formes paraboliques ou hélicoïdales) et **Savonius** (pales en forme de semi-cylindres) [11].

Avantages :

- Fonctionnent sans avoir besoin d'un mécanisme d'orientation.
- Meilleure tolérance aux turbulences.
- Possibilité d'installation plus proche du sol.
- Intégration plus facile dans les environnements urbains ou architecturaux.



Figure I. 17 : Éoliennes à axe vertical (VAWT)

Inconvénients :

- Rendement énergétique généralement plus faible que les HAWT.
- Difficultés de démarrage automatique (surtout pour les Darrieus).
- Fatigue mécanique plus importante sur certains modèles.
- Moins de maturité technologique et de retour d'expérience.

2.2.2. Éoliennes à axe horizontal (HAWT)

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues dans les grands parcs éoliens terrestres et marins. Leur rotor est orienté face au vent et généralement monté au sommet d'un mât haut, ce qui permet de capturer des vents réguliers et puissants. Elles comportent trois pales aérodynamiques et un système de contrôle de l'orientation pour suivre la direction du vent [11].

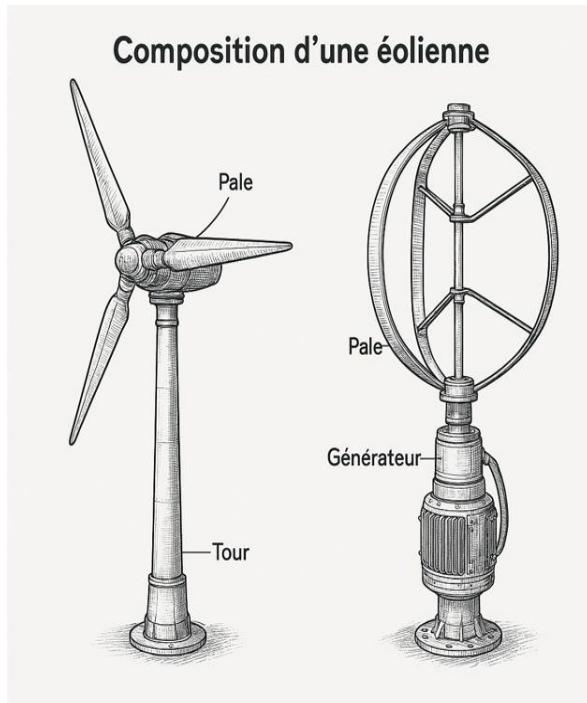


Figure I. 19 : structure 3D fait par logiciel explique la différence dans la structure entre le HAWT et le VAWT



Figure I. 18 : Éoliennes à axe horizontal (HAWT)

Avantages :

- Rendement élevé (jusqu'à 45–50 % du Cp théorique).
- Mieux adaptées aux vents forts et constants.
- Large gamme de tailles, jusqu'à plus de 15 MW.
- Parfaitement maîtrisées sur le plan technologique.

Inconvénients :

- Nécessitent une orientation constante face au vent.
- Moins efficaces dans des environnements turbulents (zones urbaines, collines).
- Coûts d'installation et de maintenance élevés.
- Niveau sonore plus important.

2.2.3. Comparaison des performances

Critère	HAWT (axe horizontal)	VAWT (axe vertical)
Orientation au vent	Nécessaire (mécanisme yaw)	Non requise
Rendement (Cp)	Élevé (jusqu'à 0,45)	Moyen (0,25 à 0,35)
Taille typique	Grande (jusqu'à 240 m de rotor)	Petite à moyenne
Bruit	Modéré à élevé	Faible à modéré
Maintenance	En hauteur, coûteuse	Au sol, plus simple
Vent turbulent	Moins adapté	Bien adapté

Applications courantes	Parcs éoliens, offshore (mer, ocean)	Zones urbaines, toits, zones isolées
------------------------	--------------------------------------	--------------------------------------

Tableau I. 1 : Comparaison des performances de les éoliens à axe horizontal et vertical

2.2.4. Domaines d'application

Les HAWT sont idéales pour les grandes centrales éoliennes, que ce soit onshore ou offshore, dans des zones bien exposées au vent. Les VAWT, en revanche, conviennent mieux aux environnements urbains ou aux zones où l'espace et la direction du vent sont limités ou variables. Leur design compact permet leur intégration dans l'architecture des bâtiments (façades, toits).

2.3. Les composants principaux d'une éolienne à axe horizontal

Dans la conception d'une éolienne, on peut identifier trois composantes principales qui assurent son fonctionnement global : le rotor, la nacelle et la tour. Le rotor, situé à l'avant de la nacelle, est constitué des pales et du moyeu ; il capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie mécanique par sa rotation. La nacelle abrite l'ensemble des systèmes mécaniques et électrotechniques de conversion, notamment l'arbre de transmission, le multiplicateur (dans le cas des éoliennes à vitesse variable), le générateur électrique, ainsi que les systèmes d'orientation (yaw system) et d'inclinaison des pales (pitch system). Enfin, la tour, généralement en acier ou en béton, supporte l'ensemble de la structure à une hauteur suffisante pour capter des vents plus stables et plus puissants. Elle intègre aussi l'accès aux équipements internes via des plateformes de maintenance, des échelles et parfois un ascenseur. L'interconnexion et la synergie entre ces trois composants assurent à la fois la captation optimale de l'énergie du vent, sa conversion efficace en électricité, et la stabilité mécanique de l'ensemble de l'éolienne [8].

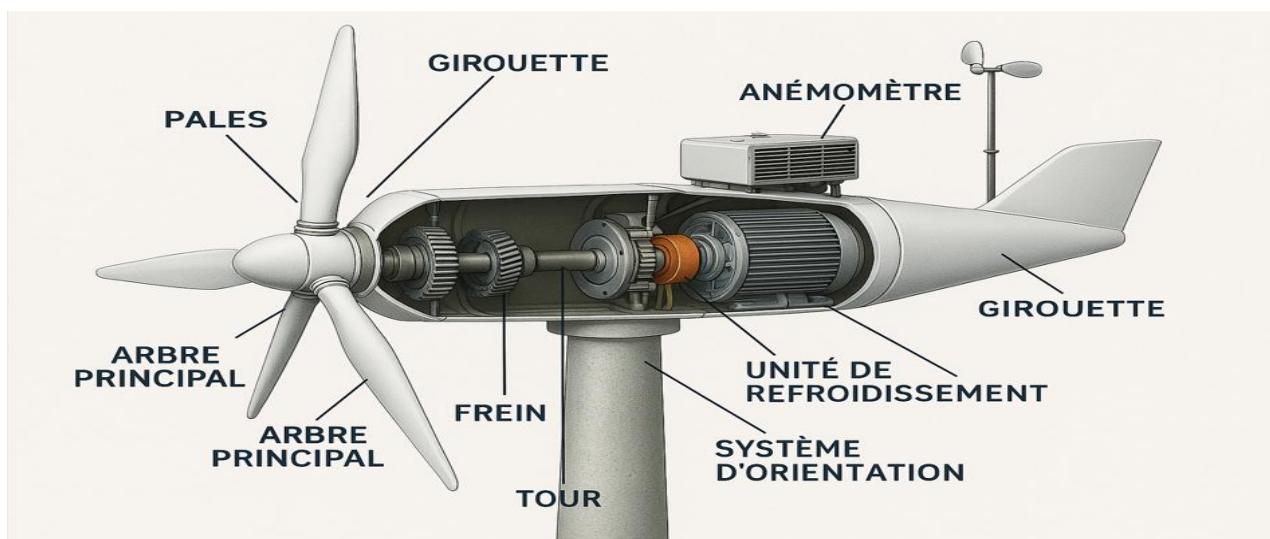


Figure I. 20 : Conception 3D faite avec logiciel pour les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

Le rotor

Le rotor de nacelle est le cœur des éoliennes, transformant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Composé des pales, du moyeu et du palier principal, il allie matériaux composites (fibre de verre, carbone) pour les pales – profilées pour maximiser la portance – et structures métalliques (acier, aluminium) pour le moyeu, qui intègre un système de réglage d'angle des pales (pitch). Le palier principal, équipé de roulements lubrifiés, supporte les charges mécaniques et transmet le couple à la nacelle.

Le moyeu (ou hub en anglais) est une pièce centrale du rotor d'une éolienne, située à la jonction entre les pales et l'arbre principal. Il joue un rôle clé dans la transmission du couple mécanique généré par les pales vers le système de conversion d'énergie (multiplicateur ou génératrice).



Figure I. 21 : Un moyeu

2.3.1. La nacelle

La nacelle constitue le cœur fonctionnel d'une éolienne. Située au sommet de la tour, elle abrite les principaux composants mécaniques et électrotechniques nécessaires à la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Véritable centre névralgique du système, elle assure la transmission de la rotation du rotor vers le générateur, tout en intégrant des mécanismes essentiels de régulation, de sécurité et de contrôle. Conçue pour résister à des conditions environnementales extrêmes, la nacelle doit allier robustesse, précision et fiabilité, tout en

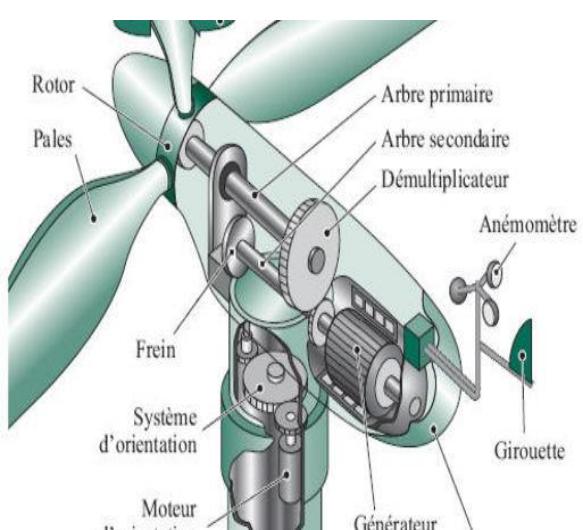


Figure I. 22 : La nacelle

permettant un accès sécurisé pour les opérations de maintenance. Sa conception joue un rôle déterminant dans les performances globales, la durabilité et la rentabilité de l'éolienne. et elle se compose de :

➤ Le multiplicateur de vitesse

Les pales d'une éolienne tournent relativement lentement, généralement entre 10 et 25 tours par minute (tr/min). En revanche, les générateurs électriques — notamment les alternateurs synchrones ou asynchrones — ont besoin de vitesses de rotation beaucoup plus élevées pour produire efficacement de l'électricité, souvent autour de 1000 à 1800 tr/min, selon le type de générateur.



Figure I. 23 : Modèle d'un multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse, aussi appelé boîte de vitesses (ou gearbox), sert donc à augmenter la vitesse de rotation de l'arbre lent (connecté aux pales) à l'arbre rapide (connecté au générateur) [9].

➤ L'arbre rapide

L'arbre rapide est chargé de transmettre cette vitesse accrue au générateur, avec une grande précision et sans perte excessive d'énergie.

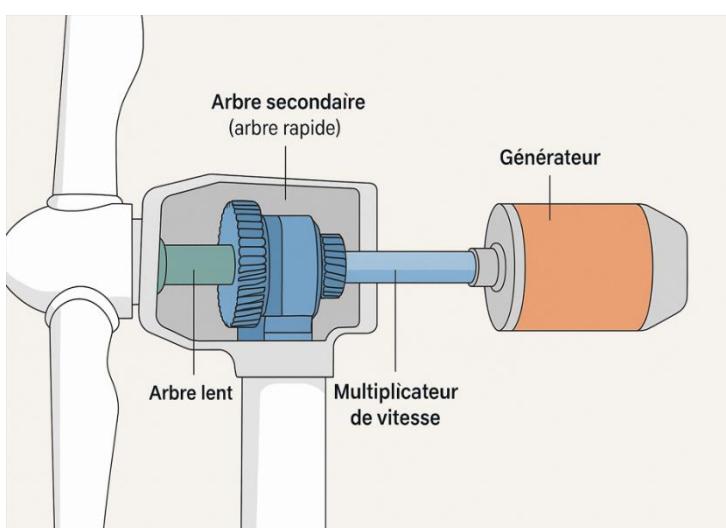


Figure I. 24 : un schéma technique pour les arbres de l'éolienne face un arbre réelle

➤ La génératrice

La génératrice Située dans la nacelle, au sommet du mât, cette pièce maîtresse transforme le mouvement mécanique des pales en énergie électrique utilisable. Son rôle est crucial, car elle détermine l'efficacité et la fiabilité de l'ensemble du système.

La génératrice fonctionne sur le principe de l'induction électromagnétique. Lorsque les pales tournent sous l'effet du vent, elles entraînent un arbre mécanique relié à la génératrice. Celle-ci contient un rotor (mobile) et un stator (fixe). Le mouvement du rotor crée un champ magnétique qui induit un courant électrique dans les bobines du stator. Deux types principaux dominent le marché : les génératrices asynchrones (ou à induction) et synchrones. Les premières, simples et robustes, sont souvent utilisées dans les éoliennes standard. Les

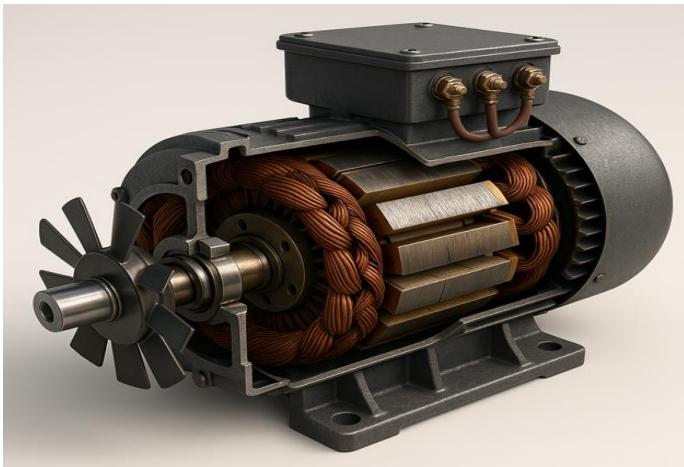


Figure I. 25 : Une Conception 3D d'une génératrice (MADA)



Figure I. 26 : Une génératrice de LABO

secondes, plus complexes, offrent un meilleur contrôle de la tension et sont privilégiées dans les installations hautes puissance, notamment avec des aimants permanents pour réduire les pertes énergétiques.

➤ Système de refroidissement

Le système de refroidissement d'une éolienne est un ensemble de dispositifs conçus pour évacuer la chaleur générée par les composants critiques (générateur, multiplicateur, convertisseurs électroniques) lors de leur fonctionnement, afin de maintenir des températures optimales et d'éviter la surchauffe. Ce système est essentiel pour garantir l'efficacité énergétique, la fiabilité et la longévité de l'éolienne, car une accumulation de chaleur excessive peut endommager les pièces mécaniques et électriques, réduire le rendement ou provoquer des arrêts intempestifs [4].

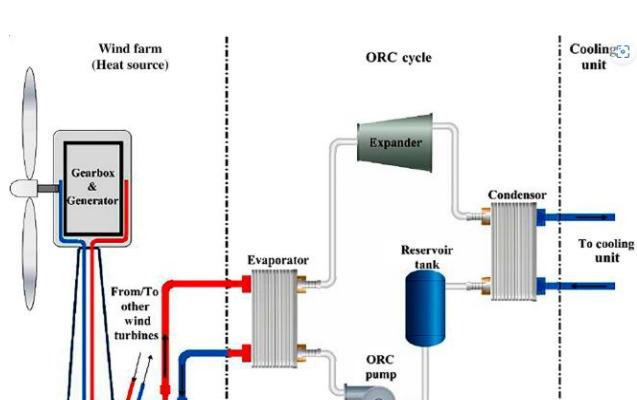


Figure I. 28 : schéma du montage de système de refroidissement dans une éolienne



Figure I. 27 : Conception 3D du système de refroidissement Dans une éolienne

➤ Le système contrôle commande

Le système de contrôle-commande d'une éolienne est un ensemble intégré de dispositifs électroniques, logiciels et mécaniques chargé de piloter, surveiller et optimiser le fonctionnement de l'éolienne en temps réel. Il agit comme le « cerveau » de l'installation, assurant la coordination entre les différents sous-systèmes (pales, génératrice, multiplicateur, convertisseurs) pour maximiser la production d'énergie, garantir la sécurité et prolonger la durée de vie des composants.



Figure I. 29 : Armoire de commande d'une éolienne

Le système de contrôle-commande d'une éolienne régule en temps réel son fonctionnement pour optimiser la production énergétique et assurer la sécurité. Composé de capteurs (anémomètre, girouette, accélémètres), il mesure en continu la vitesse et la direction du vent, les vibrations et les températures. Les contrôleurs (automates PLC, algorithmes PID ou adaptatifs) traitent ces données et commandent les actionneurs : moteurs de pas (*pitch*) pour ajuster l'angle des pales, moteurs d'orientation (*yaw*) pour aligner la nacelle avec le vent, et freins mécaniques en cas d'urgence. Des réseaux de communication (SCADA, protocoles Modbus) relient ces éléments, permettant une supervision à distance et une intégration harmonieuse au réseau électrique. Ce système assure ainsi l'adaptation dynamique aux variations du vent, la protection contre les surcharges, et le maintien d'une puissance stable, tout en prolongeant la durée de vie des composants [17].

➤ Le système d'orientation

Le système d'orientation d'une éolienne, aussi appelé système de lacet, permet de maintenir la nacelle alignée face au vent afin d'optimiser la production d'énergie. Il est principalement composé d'une girouette (capteur de direction du vent), d'un contrôleur, de moteurs d'orientation, d'une couronne dentée et d'un frein. La girouette mesure la direction du vent et envoie l'information au contrôleur, qui compare cette direction à l'orientation actuelle de la nacelle. Si un écart est détecté, les moteurs d'orientation font tourner la nacelle via un système d'engrenage pour la réaligner face au vent [18].

Ce système est essentiel pour garantir un fonctionnement efficace de l'éolienne, car un mauvais alignement avec le vent peut réduire considérablement sa performance énergétique.

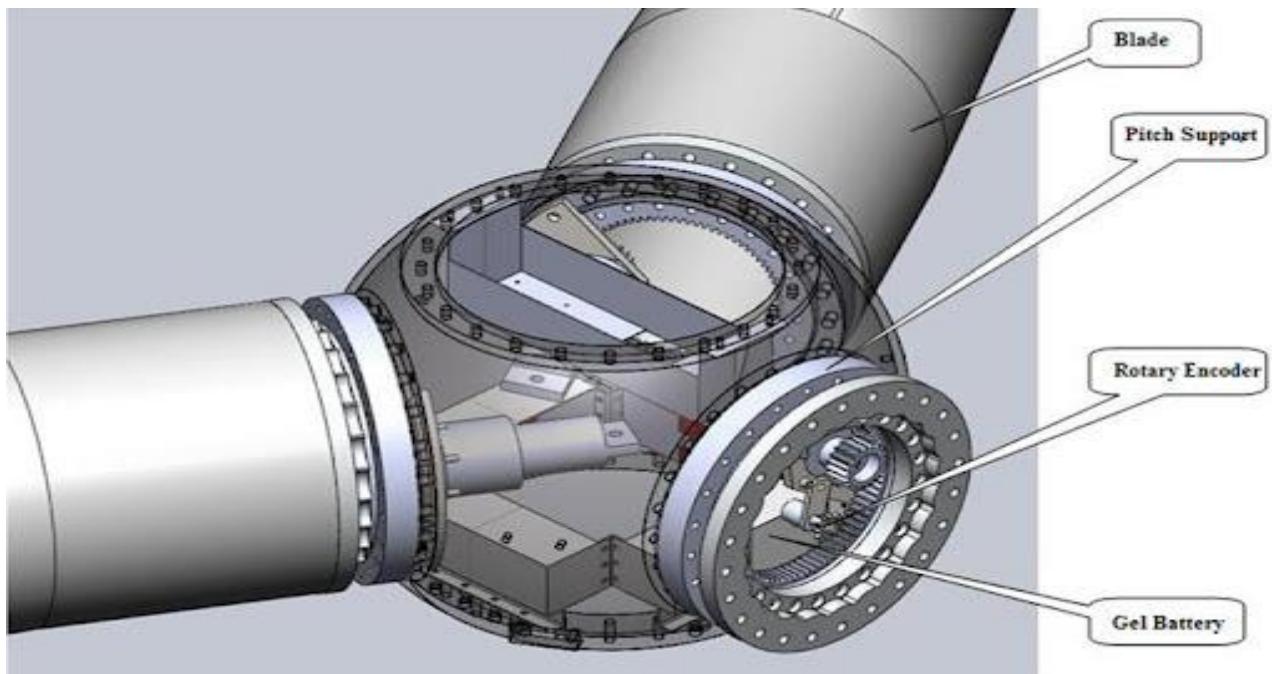


Figure I. 30 : Dispositif de commande de calage de pale d'une éolienne

➤ Les capteurs des caractéristiques du vent

Les capteurs dédiés à l'analyse du vent jouent un rôle central dans l'efficacité et la durabilité des éoliennes. L'anémomètre, souvent à ultrasons (sans pièces mobiles) ou à coupelles rotatives, mesure la vitesse instantanée du vent avec une précision de $\pm 0,1$ m/s, essentielle pour déclencher le démarrage (à partir de 3-4 m/s) ou l'arrêt (au-delà de 25 m/s) de la turbine. La girouette, équipée de capteurs magnétiques ou de potentiomètres, détecte la direction du vent à $\pm 2^\circ$ près, permettant au système de yaw d'aligner la nacelle pour maximiser l'exposition aux flux d'air. Les capteurs sont généralement installés sur la nacelle, le mât, ou un mât météorologique annexe. Les innovations récentes intègrent des algorithmes d'IA pour corriger les perturbations locales (effets de sillage entre éoliennes) et des micro-capteurs MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*), compacts et économes en énergie. En synthèse, ces dispositifs transforment le vent, ressource aléatoire, en paramètres contrôlables, assurant un équilibre entre performance énergétique et intégrité structurelle.



Figure I. 31 : anémomètre associe à une girouette

2.3.2. Le mat (La tour)

La tour d'une éolienne est l'élément vertical qui supporte la nacelle et le rotor. Elle joue un rôle essentiel, car elle permet de placer le rotor à une hauteur suffisante pour capter des vents plus forts et plus réguliers. Plus la tour est haute, meilleure est la production d'énergie, car la vitesse du vent augmente avec l'altitude.

La tour doit être à la fois solide, pour supporter le poids de la nacelle et des pales, et flexible, pour résister aux contraintes mécaniques dues au vent. Elle est fixée sur une fondation en béton profondément ancrée dans le sol pour garantir la stabilité de toute la structure [20].

On distingue plusieurs types de tours d'éoliennes :

- 1) Tour tubulaire (la plus courante) : en acier ou en béton, de forme cylindrique ou conique. Elle est creuse, ce qui permet d'y loger l'escalier ou l'ascenseur pour accéder à la nacelle.
- 2) Tour treillis : formée de poutres métalliques en réseau. Elle est plus légère et moins coûteuse mais utilisée surtout pour les petites éoliennes.
- 3) Tour hybride : combinaison d'une base en béton et d'un sommet en acier, offrant une meilleure stabilité pour les grandes hauteurs.
- 4) Tour haubanée : équipée de câbles tendus pour maintenir la structure. Elle est utilisée surtout pour les éoliennes de petite puissance.

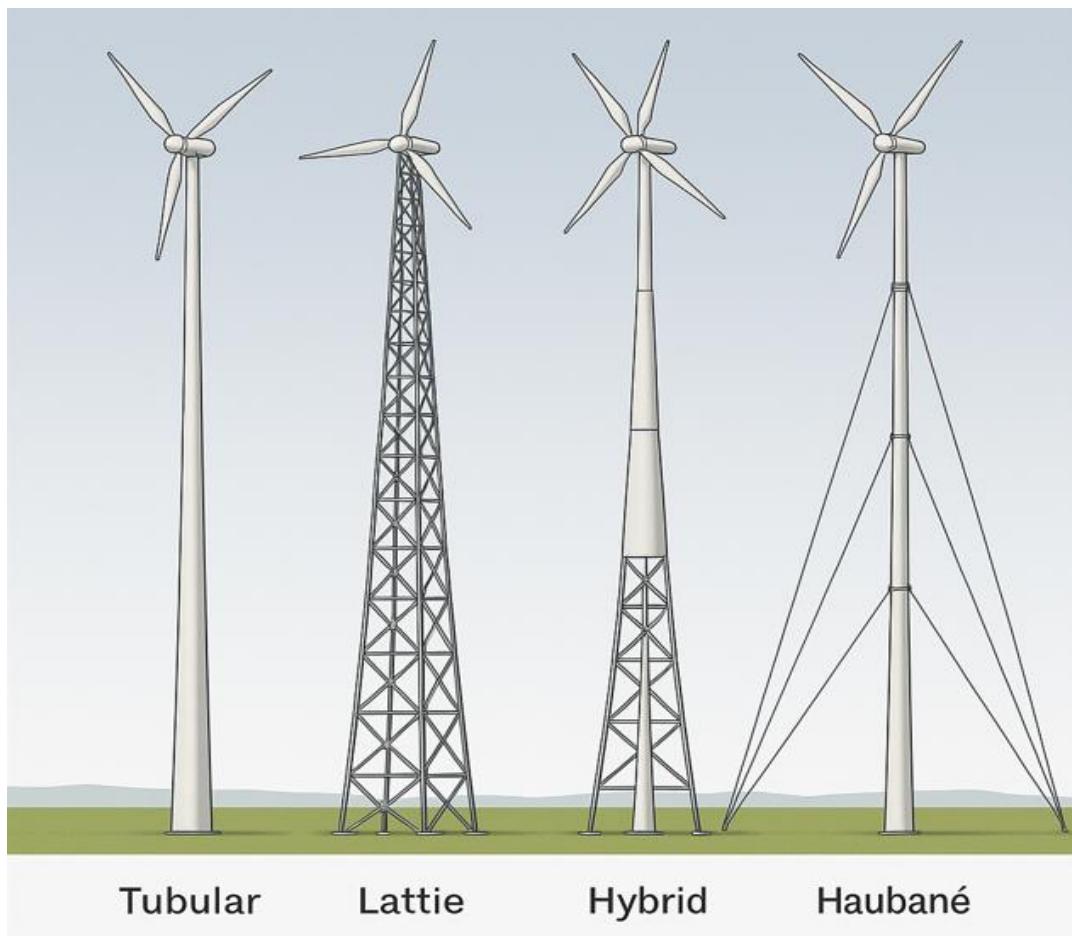


Figure I. 32 : Les différentes structures pour les tours Eoliennes

2.4. Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une éolienne repose sur la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique grâce à une série de composants mécaniques et électriques. Ce processus, guidé par les lois de la physique et de l'électromagnétisme, se déroule en plusieurs étapes clés :

Capture de l'énergie du vent

Le vent est un mouvement d'air dû aux différences de pression dans l'atmosphère. Ce mouvement transporte une énergie cinétique,

- 1) Le vent frappe les pales de l'éolienne.
- 2) Les pales sont profilées comme des ailes d'avion et utilisent le principe de portance (effet aérodynamique).
- 3) Le vent fait tourner le rotor (ensemble des pales).

Transmission et amplification de la rotation

- 1) Le rotor est relié à un arbre (arbre lent), qui entraîne une multiplicatrice augmentant la vitesse de rotation.
- 2) L'arbre rapide fait tourner la génératrice.

Conversion en électricité : la génératrice

La génératrice (asynchrone ou synchrone) convertit l'énergie mécanique de rotation en énergie électrique grâce à l'induction électromagnétique.

Conditionnement et injection dans le réseau

L'électricité produite passe par un convertisseur (onduleur) et des transformateurs pour adapter :

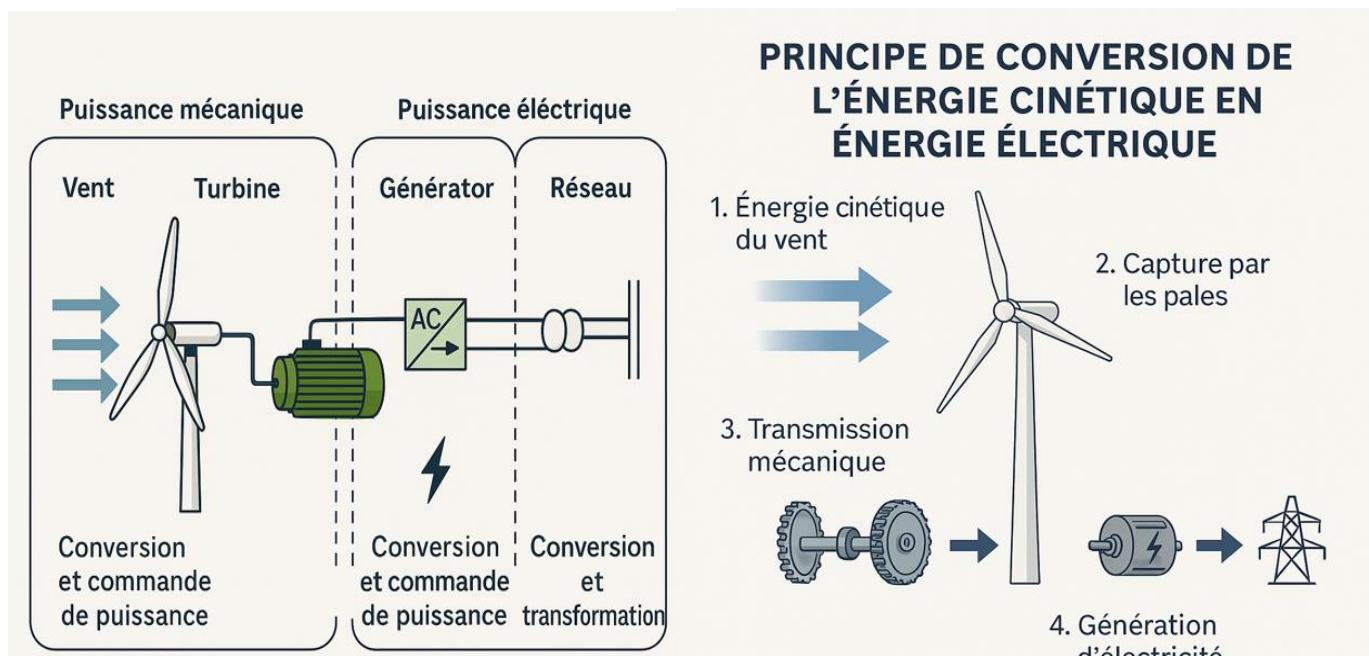


Figure I. 33 : schéma explicatif du principe de fonctionnement d'une éolienne

La tension, La fréquence, L'énergie est ensuite injectée dans le réseau électrique ou utilisée localement.

3. Génératrices et convertisseurs utilisés dans les éoliennes :

3.1. Etude comparative des machines électriques utilisées dans la production de l'Energie éolienne :

La conversion de l'énergie mécanique en électricité constitue une étape cruciale dans les systèmes de production d'énergie éolienne. Cette transformation est assurée par des machines électriques, dont les performances influencent directement l'efficacité, la fiabilité et le coût de l'ensemble du système. Il existe plusieurs types de génératrices adaptées à l'éolien, chacune présentant des avantages et des inconvénients selon les conditions d'utilisation, la puissance visée et le type de régulation associé.

Parmi les plus couramment utilisées, on distingue les génératrices synchrones (à aimants permanents ou à rotor bobiné) et les génératrices asynchrones (notamment à cage d'écureuil ou à rotor bobiné). Le choix entre ces machines dépend de nombreux facteurs tels que le type d'éolienne (à vitesse fixe ou variable), la nécessité d'un système d'électronique de puissance, les contraintes de maintenance, ou encore le rendement global du système [22].

3.1.1. Les types des machines électrique

Les types de machines électriques les utilisées dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et asynchrones et chaque un de ces types se divise aussi en plusieurs types, en mentionne les types les plus courants dans l'industrie :

3.1.2. Système à vitesse fixe- Machine asynchrone à cage (MAS)

Le système à vitesse fixe utilisant une machine asynchrone à cage (MAS) représente l'une des configurations les plus simples et historiquement les plus répandues dans les installations éoliennes de petite à moyenne puissance. Ce type de système est caractérisé par une connexion directe entre la génératrice et le réseau électrique, sans interface électronique de puissance, ce qui en fait une solution économiquement attractive et robuste [23].

Principe de fonctionnement

La machine asynchrone à cage fonctionne sur le principe de l'induction électromagnétique. Le rotor, constitué de barres conductrices en aluminium ou en cuivre court-circuitées aux extrémités (en forme de cage d'écureuil), tourne à une vitesse légèrement inférieure à celle du champ tournant du stator. Lorsqu'elle est entraînée par la turbine, la rotation du rotor

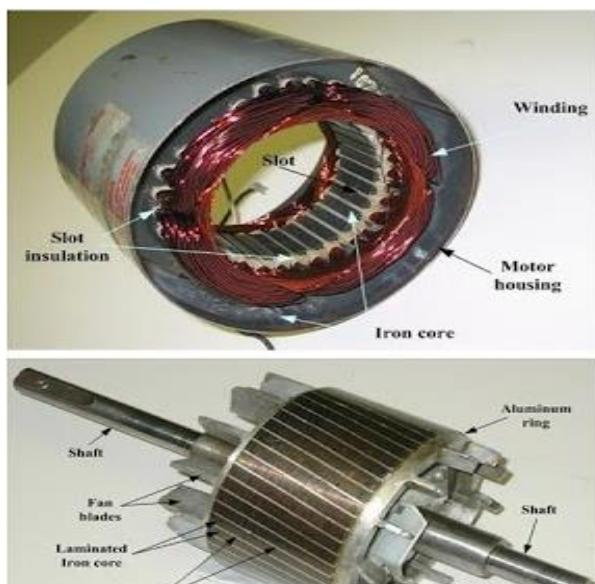


Figure I. 34 : la structure d'une machine asynchrone à cage (MAS) à vitesse fixe

induit des courants qui créent un couple électromagnétique, permettant la génération de puissance.

Dans un système à vitesse fixe, la fréquence du réseau (généralement 50 Hz ou 60 Hz) impose une vitesse de rotation constante à la machine. La plage de variation de la vitesse est très limitée (de l'ordre de ± 1 à 2 %) en raison du faible glissement de la MAS. Par conséquent, ce système impose un régime de fonctionnement presque constant de la turbine, indépendamment des variations du vent. L'avantage de cette machine est la simplicité de conception et de maintenance, robustesse et le coût réduit. L'inconvénient est que son rendement est sous-optimal, Sensibilité aux fluctuations du vent et Problèmes de démarrage ou La MAS nécessite une alimentation initiale pour créer le champ magnétique statorique, ce qui peut engendrer des appels de courant importants au démarrage.

3.1.3. Système à vitesse variable- Machine asynchrone a cage (MAS)

La machine asynchrone à cage d'écurieuil (MAS) est largement utilisée dans les systèmes industriels grâce à sa robustesse, son faible coût et son entretien limité. Traditionnellement alimentée directement par le réseau, elle fonctionne à vitesse quasi-constante. Cependant, les exigences modernes en termes d'efficacité énergétique, de performance et de flexibilité ont conduit à l'émergence des systèmes à vitesse variable, qui permettent d'ajuster la vitesse de rotation de la machine selon les besoins de l'application [24].

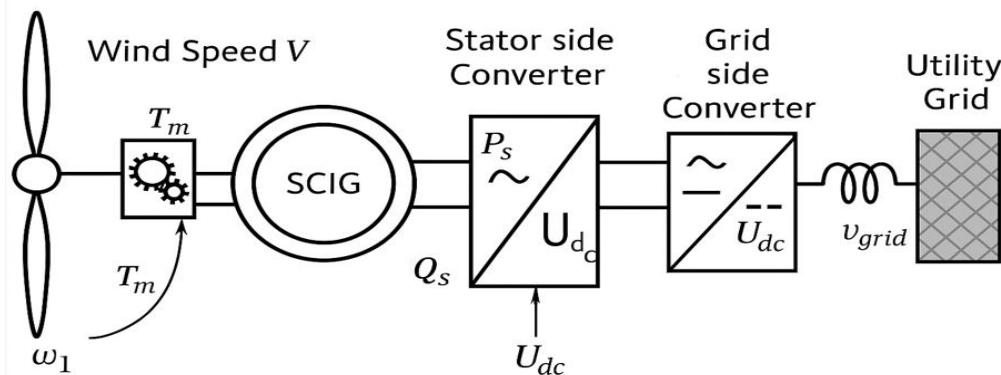


Figure I. 35 : Système éolien base sur une Machine asynchrone à cage (MAS) à vitesse variable

Avantages	Inconvénients
Robuste et fiable	Couple de démarrage limité sans variateur
Coût d'achat et d'entretien faible	Moins performante en commande directe sans électronique de puissance
Construction simple et sans balais	Rendement légèrement inférieur à celui des machines synchrones à haut rendement
Compatible avec des environnements industriels sévères	Sensible aux variations de charge sans régulation appropriée

Faible maintenance (pas de collecteur, ni balais)	Complexité accrue du système avec variateur (coût et mise en œuvre)
Bon comportement dynamique avec commande vectorielle	Besoin de filtres pour réduire les harmoniques (selon les applications)
Fonctionnement stable sur une large plage de vitesses (grâce au variateur)	Chauffe accrue à faible vitesse si mal ventilée

Tableau I. 2 : Les avantages et les inconvénients de la MAS

3.1.4. Système à vitesse variable- Machine synchrone à aimant permanent (MSAP)

La Machine Synchrone à Aimants Permanents (MSAP) est une technologie de plus en plus prisée dans les systèmes à vitesse variable, notamment pour sa haute efficacité, sa densité de puissance élevée et son contrôle précis. Elle est largement utilisée dans les applications industrielles, les éoliennes, les véhicules électriques et les systèmes d'entraînement à haute performance.

Contrairement à la machine asynchrone, la MSAP n'a pas besoin d'un courant d'excitation. Son champ magnétique est produit par des aimants permanents fixés sur le rotor. Le rotor tourne en synchronisme avec le champ magnétique statorique.

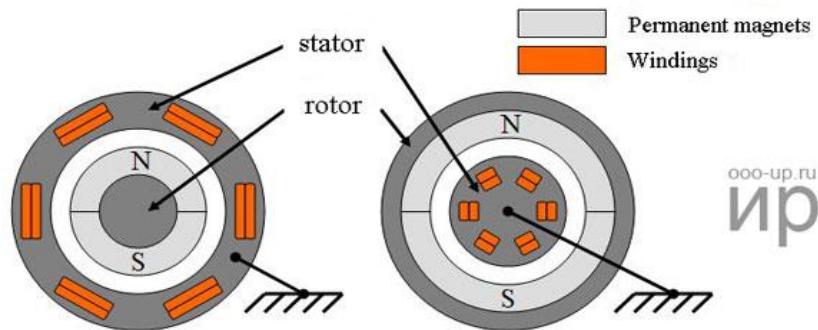


Figure I. 36 : Les deux différentes structures de la Machine synchrone à aimant permanent

Système à Vitesse Variable avec MSAP

La MSAP nécessite une alimentation en tension et en fréquence variables, ce qui impose l'utilisation d'un onduleur triphasé associé à un convertisseur statique. Le système typique inclut [24] :

- Un redresseur AC/DC (si alimenté par le réseau),
- Un onduleur DC/AC (pour générer une fréquence variable),
- Un contrôleur (pour gérer la vitesse ou le couple),
- Parfois un capteur de position pour le pilotage précis.

Deux grandes approches de commande sont utilisées :

- Commande vectorielle (FOC) : permet le contrôle indépendant du flux et du couple,
- Commande directe de couple (DTC) : plus rapide mais plus complexe.

Avantages	Inconvénients
Rendement très élevé (peu de pertes rotorique)	Coût plus élevé (aimants permanents, contrôleur complexes)
Densité de puissance élevée	Sensibilité thermique des aimants
Faible maintenance (pas d'excitation active, pas de frottement par balais)	Nécessite un variateur et souvent un capteur de position
Bon comportement à basse vitesse	Risque de démagnétisation en cas de surcharge thermique ou courant excessif

Tableau I. 3 : Les avantages et les inconvénients de la MSAP

3.1.5. Système à vitesse variable- Machine asynchrone à double alimentation (MADA)

La MADA est une machine asynchrone triphasée dont le stator est connecté directement au réseau électrique (ou à une charge fixe) et le rotor est alimenté via un convertisseur électrique de puissance. Elle permet de travailler autour de la vitesse synchrone, tout en maintenant une fréquence statorique fixe [8].

Composants principaux :

Élément	Description technique
Stator	Enroulements triphasés connectés directement au réseau 50 Hz. Il délivre ou reçoit de la puissance à fréquence fixe.
Rotor bobiné	Composé d'enroulements triphasés reliés à des bagues collectrices. Il est connecté à un convertisseur bidirectionnel (AC/DC/AC).
Convertisseur rotorique	Permet d'injecter une tension à fréquence variable dans le rotor. Il est composé de deux étages : un redresseur (AC/DC) et un onduleur (DC/AC).
Système de contrôle	Gère la vitesse, le couple, et la puissance active/réactive injectée dans le réseau. Utilise des algorithmes comme la commande vectorielle ou la commande directe du couple (DTC).

Tableau I. 4 : Le rôle des composants principaux de la MADA

Fonctionnement du stator

- Le stator est connecté directement au réseau électrique.

- Il reçoit ou fournit une puissance à fréquence fixe (50 Hz).

Fonctionnement du rotor

- Le rotor bobiné est alimenté via un convertisseur de fréquence.
- En injectant une fréquence variable dans le rotor, on peut faire varier la vitesse de la machine sans modifier la fréquence statorique.
- Cette technique permet de fonctionner au-dessus et en dessous de la vitesse synchrone :
 - Si le glissement est positive → fonctionnement hypo-synchrone.
 - Si le glissement est négative → fonctionnement hyper-synchrone.

Avantages de la MADA dans les systèmes à vitesse variable

Avantages	Explication
Convertisseur partiellement dimensionné (~30 % de la puissance)	Moins coûteux qu'un convertisseur pleine puissance
Contrôle indépendant de la puissance active et réactive	Stabilité du réseau et meilleure gestion du facteur de puissance
Adapté à la vitesse variable autour de la vitesse synchrone	Bon rendement dans les plages de fonctionnement habituelles d'une éolienne
Très utilisé dans les parcs éoliens connectés au réseau	Norme industrielle dans les puissances de 1 à 3 MW
Capable de fonctionner en sûr/sous-vitesse	Grâce à l'injection de tension rotorique adaptée

Tableau I. 5 : Avantages de la MADA dans les systèmes à vitesse variable

Inconvénients de la MADA

Inconvénients	Explication
Présence de balais et de bagues collectrices	Entretien régulier nécessaire
Complexité de la commande vectorielle	Nécessite des capteurs de position et des algorithmes précis
Sensibilité aux surtensions et défauts réseau	Surtout côté rotor où un convertisseur est impliqué
Moins adaptée aux très basses vitesses	Le couple peut être limité dans certains cas
Pas de fonctionnement autonome (sauf modification avec onduleur statorique)	Nécessite un réseau ou une charge équilibrée

Tableau I. 6 : Inconvénients de la MADA dans les systèmes à vitesse variable

Comparaison avec autres technologies

Technologie	Variateur requis	Rendement	Coût convertisseur	Maintenance	Vitesse variable
MAS classique	Oui (pleine puissance)	Moyen	Élevé	Faible	Large plage
MSAP	Oui (pleine puissance)	Élevé	Élevé	Faible	Large plage
MADA (DFIG)	Oui (30% puissance)	Élevé	Moyen	Moyen	Moyenne plage

Tableau I. 7 : Comparaison entre les différentes machines MAS et MSAP et MADA

4. L'intérêt de la vitesse variable

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne ont connu une évolution significative au cours des dernières décennies, passant de générateurs à vitesse fixe à des systèmes à vitesse variable plus performants. L'adoption de la vitesse variable dans les éoliennes modernes répond à plusieurs objectifs : améliorer le rendement énergétique, réduire les contraintes mécaniques, adapter la production aux conditions du vent, et faciliter l'intégration au réseau électrique [8].

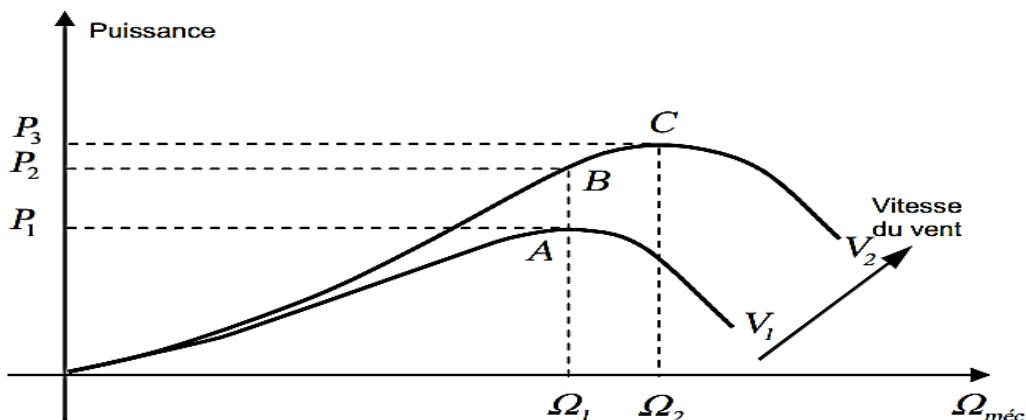


Figure I. 37 : Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté un aperçu général des principales sources d'énergies renouvelables exploitées à travers le monde, à savoir l'énergie solaire, hydraulique, la biomasse, la géothermie ainsi que l'énergie éolienne. Parmi ces alternatives durables, l'énergie éolienne a retenu notre attention en raison de son fort potentiel de production et de son impact environnemental relativement faible. Nous avons ainsi étudié les différents types d'éoliennes existantes, en détaillant leur structure, leur principe de fonctionnement, ainsi que leurs

domaines d'application. Par ailleurs, nous avons passé en revue les principales machines électriques susceptibles d'être associées à une éolienne pour la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Après avoir comparé leurs caractéristiques techniques, économiques et d'exploitation, notre choix s'est portée sur la machine asynchrone à double alimentation (DFIG), en raison de sa capacité à fonctionner efficacement à vitesse variable et à permettre une meilleure régulation de la puissance active et réactive injectée dans le réseau.

Chapitre II :

Modélisation de la turbine

éolienne

Introduction :

Une éolienne est un dispositif qui produit de l'électricité grâce au vent qui met en mouvement un rotor, permettant sa transformation en énergie mécanique. La vitesse de rotation de l'arbre entraîné par le mouvement des pales est accélérée par un multiplicateur. Cette énergie mécanique est ensuite transmise au générateur.

Un transformateur situé à l'intérieur du mât élève la tension du courant électrique produit par l'alternateur, pour qu'il puisse être plus facilement transporté dans les lignes à moyenne tension du réseau électrique.

À ce jour, l'énergie éolienne demeure la source d'énergie renouvelable la plus prometteuse, en raison de son coût énergétique relativement faible. La technologie des systèmes éoliens (WTS) a débuté dans les années 1980 avec des puissances de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts. Aujourd'hui, des éoliennes de plusieurs mégawatts (MW) sont couramment installées, et leur taille ne cesse d'augmenter [2–5]. L'utilisation des éoliennes dans les réseaux de distribution est en constante expansion, et de plus en plus de parcs éoliens fonctionnent comme des centrales électriques conventionnelles, étant directement raccordés aux réseaux de transport. Par exemple, le Danemark présente un taux élevé de pénétration de l'énergie éolienne dans plusieurs régions du pays, avec plus de 30 % de sa consommation électrique actuelle couverte par cette source d'énergie [25].

1. Le principe de conversion de l'énergie cinétique en énergie mécanique

1.1. La puissance cinétique

La puissance cinétique d'une éolienne correspond à l'énergie contenue dans le vent, captée par le rotor et convertie en électricité. Cette énergie dépend de la masse d'air en mouvement ainsi que de sa vitesse, et elle est exprimée par la relation suivante :

$$\mathbf{Ec} = \frac{1}{2} \mathbf{m} \mathbf{v}^2 \quad (\text{II. 1})$$

Ec : L'énergie cinétique en joule

m : la masse de l'aire en Kg

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

La masse d'air appliquée sur les pales de l'éolienne est donnée par l'expression :

$$\mathbf{m} = \rho \mathbf{v}_{ol} \quad (\text{II. 2})$$

m : la masse de l'air

v_{ol} : Le volume d'air appliqué sur les pales, qui les fait tourner, est donné par la relation suivante :

$$\mathbf{vol} = \mathbf{S} \mathbf{e} \quad (\text{II. 3})$$

S : la surface balayée par les pales en (m³)

e : l'épaisseur des pales en (m)

On a aussi la formule de la puissance qui est :

$$P = \frac{E}{t} \quad (\text{II. 4})$$

P : La puissance en watt(W)

E : l'énergie en joule (J)

t : le temps en seconde(s)

Donc en utilisant les équations précédentes on obtiendra :

$$P = \frac{\frac{1}{2} S e v^2}{t} \quad (\text{II. 5})$$

Avec :

$$V = \frac{e}{t} \quad (\text{II. 6})$$

Alors la formule finale de la puissance est la suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 \quad (\text{II. 7})$$

Et comme le mouvement de rotation des pales est un mouvement rotatif Donc la formule de la surface $S = \pi R^2$, en déduit que la puissance de la turbine éolienne est :

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II. 8})$$

1.2.Le coefficient de puissance Cp

Ce coefficient représente l'efficacité avec laquelle l'éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utilisable, il est indispensable d'intégrer ce coefficient afin d'obtenir une estimation réaliste de l'énergie réellement exploitable et alors la formule de la puissance sera donc :

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho \pi R^2 V^3 \quad (\text{II. 9})$$

Le coefficient de puissance (C_p) mesure l'efficacité avec laquelle une éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en électricité. Ce coefficient varie en fonction des caractéristiques de la turbine, notamment de la vitesse spécifique (λ) et de l'angle de calage des pales (β). La vitesse spécifique représente le rapport entre la vitesse de rotation des pales et la vitesse du vent, tandis que l'angle de calage influence l'aérodynamisme et les performances de l'éolienne. [7]. La vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne s'exprime par la relation suivante :

$$\mathbf{v} = \mathbf{R} \Omega \quad (\text{II.10})$$

\mathbf{v} : La vitesse de l'extrémité des pales en (m/s)

\mathbf{R} : La longueur des pales en (m)

Ω : La vitesse angulaire des pales en (rad/s)

Pour comparer les performances et optimiser le fonctionnement des éoliennes, on introduit la vitesse spécifique (λ). Ainsi, λ permet d'uniformiser l'analyse des éoliennes de différentes tailles et conceptions en tenant compte de leur dynamique propre. Il joue un rôle clé dans la détermination du coefficient de puissance (C_p) et donc dans l'efficacité globale de la conversion énergétique [27].

$$\lambda = \frac{\mathbf{R} \cdot \omega}{\mathbf{V}_1} \quad (\text{II.11})$$

Chaque éolienne possède une vitesse spécifique nominale ($\lambda_{\text{nominale}}$), qui correspond à son fonctionnement optimal.

D'après cette vitesse, on peut classer les éoliennes en différentes catégories. En pratique, les rotors ont généralement une **vitesse spécifique** comprise entre **0.9 et 15**, et dans certains cas exceptionnels, elle peut atteindre **20**.

- **Éoliennes lentes** (ou "longues") : $\lambda \leq 2.3$. Ces éoliennes ont de grandes pales et tournent lentement, ce qui les rend adaptées aux vents faibles.
- **Éoliennes rapides** : $\lambda \geq 4$. Ces machines ont des pales plus courtes et tournent à une vitesse plus élevée, ce qui les rend plus efficaces pour capter l'énergie du vent à des vitesses plus importantes.

Cette classification est essentielle pour le dimensionnement et l'optimisation des éoliennes en fonction des conditions de vent et des besoins énergétiques[27].

Le graphique suivant montre le coefficient de puissance C_p en fonction du TSR (Tip speed ratio) pour différents types d'éoliennes. Il compare les performances des rotors Savonius, Darrieus, multipale, mono-pale, bi-pale et tri-pale, avec la limite théorique de Betz (59%).

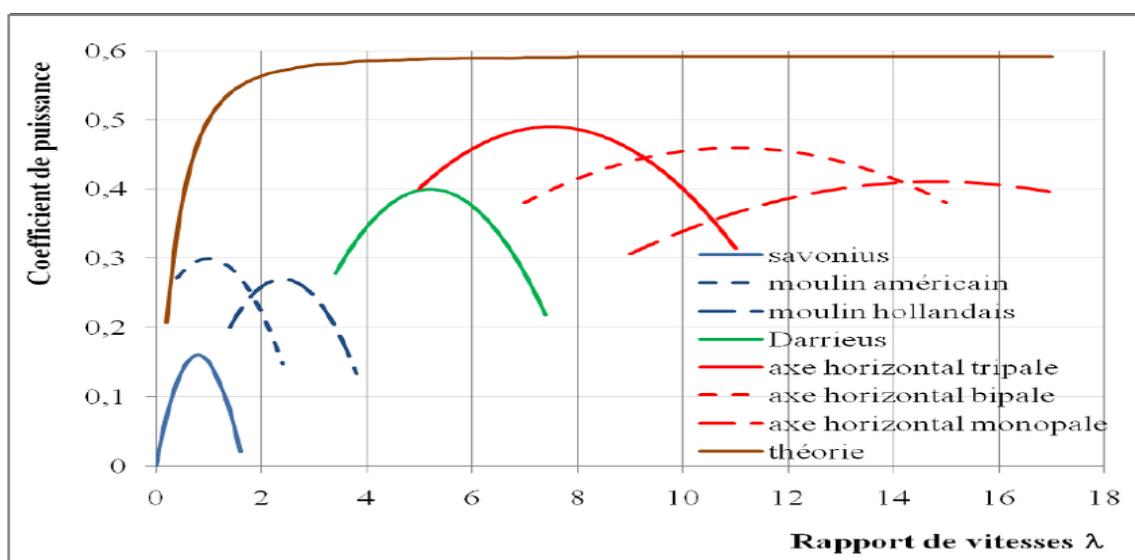


Figure II. 1 Caractéristique de coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ

Le coefficient de puissance (C_p) est directement influencé par un autre paramètre essentiel : l'angle de calage bêta. En effet, la variation de cet angle a un impact significatif sur l'efficacité aérodynamique de la turbine, modifiant ainsi la valeur du C_p en fonction des conditions de fonctionnement.

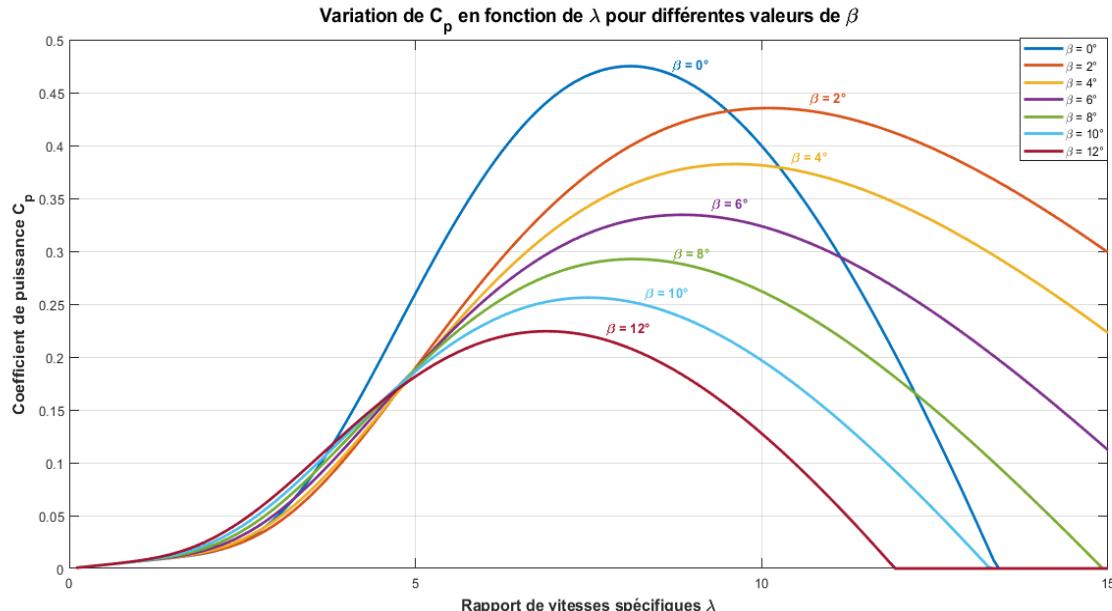


Figure II. 2 Influence de l'angle de calage β sur le coefficient de puissance C_p

La formule du coefficient de puissance est alors donnée par la formule suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = A_1 \left(\frac{A_2}{\lambda i} - A_3 \beta - A_4 \right) e^{-\frac{A_5}{\lambda i}} + A_6 \lambda \quad (\text{II. 12})$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda i} = \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \quad (\text{II. 13})$$

$$A_1 = 0.5176, A_2 = 116, A_3 = 0.4, A_4 = 5, A_5 = 21, A_6 = 0.0068$$

Pour $\beta = 0^\circ$, la courbe du coefficient de puissance C_p présente son maximum le plus élevé parmi toutes les courbes tracées. Ce maximum avoisine une valeur de 0.475, ce qui indique une très bonne conversion de l'énergie du vent en puissance mécanique. La vitesse spécifique optimale λ_{opt} , pour laquelle C_p atteint son pic, se situe autour de 6 à 7, suggérant que l'éolienne fonctionne de manière optimale à ce régime. À mesure que λ augmente au-delà de cette valeur, C_p diminue progressivement, traduisant une perte d'efficacité aérodynamique. La courbe de $\beta = 0^\circ$ illustre ainsi le fonctionnement optimal d'une éolienne sans inclinaison des pales, où l'extraction de l'énergie éolienne est maximale [9].

1.3.La limite de Betz

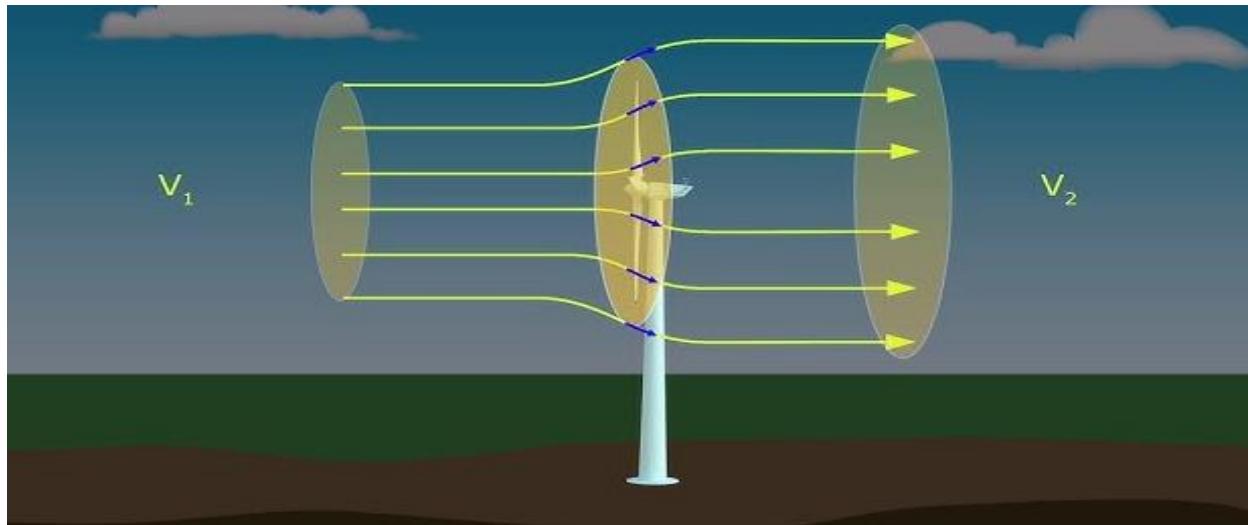


Figure II. 3 Variation de la vitesse du vent avant et après de passer par une turbine éolienne

La figure illustre le comportement du vent avant et après son passage à travers le rotor d'une éolienne à axe horizontal. On y observe la vitesse du vent V_1 en amont de l'éolienne et V_2 en aval, après que l'énergie cinétique ait été partiellement convertie en énergie mécanique par le rotor. Ce phénomène est au cœur de la limite de Betz, une théorie établie par Albert Betz en 1919. Selon cette théorie, une éolienne ne peut pas capturer 100% de l'énergie cinétique du vent, car cela impliquerait un arrêt total du flux d'air derrière elle, empêchant ainsi l'écoulement et la production d'énergie.

Betz a démontré que l'efficacité maximale théorique d'une éolienne est limitée à **59,3%**, soit un coefficient de puissance $C_p=0,593$.

Le fait que la vitesse du vent traversant le rotor est une valeur intermédiaire entre V_1 et V_2 :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II. 14})$$

La masse d'air en mouvement m_t (Kg/s) de densité air, traversant la surface balayée S , peut être exprimée par :

$$m_t = \rho_{\text{air}} \cdot S \cdot V_1 \quad (\text{II. 15})$$

Avec V c'est la vitesse moyenne du vent traversant le rotor en (m/s) donc la formule sera :

$$m_t = \rho_{\text{air}} \cdot S \cdot \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II. 16})$$

Et alors d'après l'équation de la puissance P_m selon la seconde loi de newton

$$P = \frac{\text{Een}-\text{Esort}}{2}$$

$$P_m = \frac{1}{2} m_t (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II. 17})$$

P_m : La puissance mécanique extraite par le rotor de l'éolienne (W).

m_t : masse d'air traversant le rotor par seconde (kg/s).

V_1 : vitesse du vent avant le passage à travers le rotor (m/s).

V_2 : vitesse du vent après le passage à travers le rotor (m/s).

Et en remplaçons m_t par son expression nous obtenons :

$$P_m = \frac{\rho_{air} \cdot S}{4} (V_1 + V_2)(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II. 18})$$

Si le vent théoriquement est stable traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, Soit à la vitesse V_1 , la puissance P_0 serait alors :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot S \cdot V_1^3 \quad (\text{II. 19})$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et celle du vent non perturbé sera alors :

$$Cp = \left(\frac{P_m}{P_{mt}} \right) = \frac{1}{2} \left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right) \left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1} \right) \right) \quad (\text{II. 20})$$

D'où P_{mt} et la puissance totale d'un flux d'air non perturbé en Watt (w).

Si l'on représente la courbe correspondant à l'équation ci-dessous, on observe que le rapport entre la puissance mécanique récupérée (P_m) et la puissance mécanique totale disponible dans le vent (P_{mt}), appelé coefficient de puissance Cp , atteint un maximum théorique de $\frac{16}{27}$, soit environ 0,59. Cette valeur, connue sous le nom de limite de Betz, détermine la puissance maximale théoriquement extractible pour une vitesse de vent donnée. Cependant, cette limite n'est jamais atteinte en pratique en raison des pertes aérodynamiques et mécaniques.

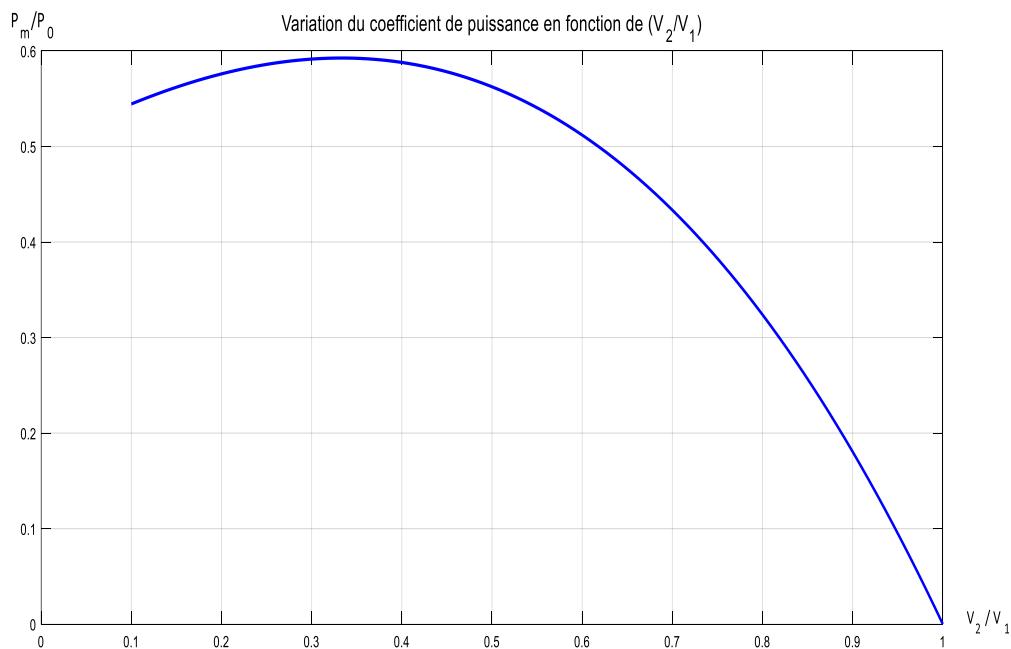


Figure II. 4 Variation du coefficient de puissance en fonction de différente

1.4.Zones de fonctionnement d'une éolienne

Il y 4 zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

1.4.1. Classification des zones de fonctionnement d'une éolienne

V_1 : Vitesse de démarrage

La vitesse du vent à partir de laquelle la turbine commence à tourner. Selon les fabricants, cette vitesse, notée V_1 , varie généralement entre **2,5 m/s et 4 m/s** pour les éoliennes de forte puissance.

V_2 : Vitesse nominale

Il s'agit de la vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite atteint la puissance nominale de la génératrice. Cette vitesse, notée V_2 , dépend des technologies utilisées et se situe généralement entre 11,5 m/s et 15 m/s. Dans cette plage, la turbine fonctionne en mode charge partielle, optimisant l'extraction de l'énergie éolienne grâce à diverses stratégies de contrôle.

V_3 : Vitesse maximale admissible

Au-delà d'une certaine vitesse du vent, notée V_3 , la turbine doit être arrêtée pour éviter des contraintes mécaniques excessives sur les pales et les structures. Pour la majorité des éoliennes, cette vitesse est d'environ 25 m/s. Une fois atteinte, un système de mise en drapeau des pales ($\beta = 90^\circ$) est activé, réduisant l'aérodynamisme des pales afin de stopper la rotation du rotor.

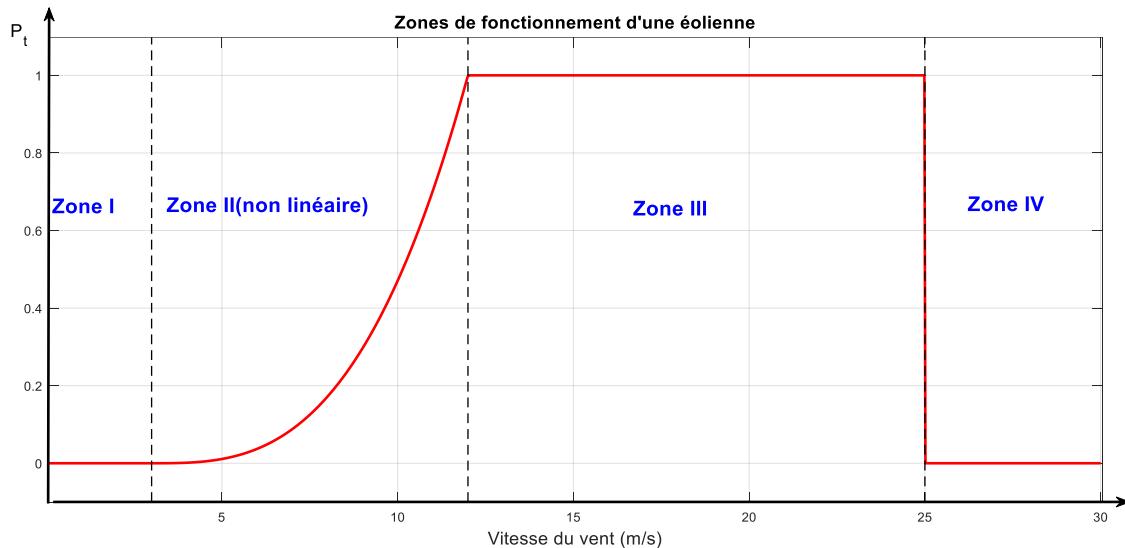


Figure II. 5 Zone de fonctionnement de l'éolienne selon la vitesse du vent

1.4.2. Zones de fonctionnement de l'éolienne selon la vitesse du vent

Zone I : $V < V_1$ (Vitesse insuffisante)

Le vent est trop faible pour assurer une production d'énergie significative. La turbine peut commencer à tourner, mais la puissance générée reste négligeable et insuffisante pour alimenter la génératrice [29].

Zone II : $V_1 < V < V_2$ (Charge partielle)

C'est la plage de fonctionnement optimale où la turbine extrait le maximum d'énergie du vent pour chaque vitesse donnée. Diverses stratégies de contrôle, telles que l'ajustement de l'angle

des pales ou la régulation de la vitesse de rotation, sont mises en œuvre pour maximiser la puissance captée [29].

Zone III : $V_2 < V < V_3$ (Pleine charge)

Dans cette zone, la puissance extraite atteint la puissance nominale de la turbine (P_n). Comme la puissance du vent continue d'augmenter, un contrôle actif limite la puissance extraite pour éviter de surcharger la génératrice et les composants électriques [29].

Zone IV : $V > V_3$ (Arrêt de sécurité)

Lorsque la vitesse du vent dépasse V_3 , l'éolienne est mise à l'arrêt pour protéger ses composants. Les pales sont orientées en position de drapeau ($\beta = 90^\circ$) afin de minimiser leur prise au vent, et le freinage aérodynamique ou mécanique est activé.

2. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

La régulation de la vitesse d'une éolienne a deux objectifs principaux :

Protéger la turbine en cas de vents forts afin d'éviter des dommages mécaniques et Limiter la puissance produite pour s'assurer que l'éolienne ne dépasse pas sa capacité nominale.

Une éolienne est conçue pour fournir une puissance nominale P_n à une vitesse de vent nominale V_n . Lorsque la vitesse du vent dépasse cette valeur, il est nécessaire d'ajuster les paramètres de la turbine afin de maintenir la puissance nominale et d'éviter tout dépassement de la vitesse maximale V_{max} . Si cette limite est franchie, des contraintes excessives peuvent endommager la structure de l'éolienne.

Pour assurer cette régulation, plusieurs systèmes de contrôle de vitesse sont utilisés. Parmi les méthodes les plus courantes[30], on trouve :

- Le contrôle par décrochage aérodynamique (stall control) : Les pales sont conçues de manière à limiter naturellement la puissance absorbée lorsque la vitesse du vent devient trop élevée.
- Le contrôle par orientation des pales (pitch control) : L'angle des pales est ajusté dynamiquement afin de réguler la puissance extraite du vent.
- Le contrôle par variation de charge électrique : La charge appliquée à l'alternateur est modulée pour influencer la vitesse de rotation et la puissance produite [30].

3. Modélisation de la turbine

3.1. Modèle de multiplicateur

Le multiplicateur joue un rôle clé dans la chaîne de conversion d'énergie d'une éolienne. Il permet d'adapter la vitesse mécanique de la turbine à la vitesse de rotation requise par la génératrice, tout en transformant le couple aérodynamique en un couple adapté à l'entrée du système générateur[31]. Selon les équations mathématiques suivante :

$$\mathbf{G} = \frac{\mathbf{Caer}}{\mathbf{Cg}} \quad (\text{II. 21})$$

$$\mathbf{G} = \frac{\Omega \mathbf{mec}}{\Omega t} \quad (\text{II. 22})$$

G : Coefficient de multiplication

Ω : vitesse (tr/mn ou rad/s)

C : Couple (n.m)

Le modèle mécanique propose considère l'inertie total **J** constitué de l'inertie de la turbine reporté sur le rotor de la génératrice.

3.2.Modèle de l'arbre de transmission

$$\mathbf{J} = \frac{\mathbf{J}_{\text{turbine}}}{\mathbf{G}^2} + \mathbf{J}_{\text{mach}} \quad (\text{II. 23})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total, c'est mécanique appliquée au rotor :

$$\mathbf{J} \frac{d\Omega_{\text{mec}}}{dt} = \mathbf{C}_{\text{mec}} \quad (\text{II. 24})$$

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

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

$$\mathbf{C}_{\text{mec}} = \mathbf{C}_g - \mathbf{C}_{\text{em}} - \mathbf{C}_f \quad (\text{II. 25})$$

Cem: Le couple électromagnétique développé par la génératrice.

Cg: Le couple issu du multiplicateur.

Cf : couple résistant dû aux frottements.

$$\mathbf{C}_f = f \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{II. 26})$$

Avec :

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique

4. Méthode de recherche du point maximum de puissance

Dans la zone 2, correspondant à la plage de vitesses de vent où l'éolienne fonctionne en mode d'extraction de puissance maximale, il est crucial d'ajuster la vitesse de rotation du rotor afin de maximiser le coefficient de puissance **Cp**. Pour cela, deux approches de commande sont couramment utilisées :

Commande indirecte de la vitesse (sans asservissement de vitesse)

Dans cette approche, la vitesse mécanique n'est pas directement asservie. Au lieu de cela, le couple électromagnétique **Cem** est ajusté de manière à suivre la courbe du rendement optimal. En d'autres termes, on laisse naturellement la vitesse du rotor évoluer en réponse aux variations de vent, tout en appliquant un couple qui maximise l'extraction d'énergie en maintenant le rapport optimal entre la vitesse du rotor et la vitesse du vent[31].

Commande directe de la vitesse (avec asservissement de vitesse)

Cette stratégie repose sur la régulation directe de la vitesse mécanique du rotor à l'aide d'un régulateur proportionnel-intégral (PI). L'objectif est d'imposer une vitesse de rotation optimale en fonction des conditions de vent, garantissant ainsi un fonctionnement à rendement maximal. Cette méthode nécessite une mesure en temps réel de la vitesse du rotor et l'ajustement du couple électromagnétique de la génératrice en conséquence.

La puissance optimale est donnée par :

$$P_{\text{opt}} = \frac{1}{2} C_p^{\text{opt}} \cdot (\lambda_{\text{opt}}) \cdot \rho_{\text{air}} \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.27})$$

V_v :Vitesse du vent(m/s)

Un fonctionnement optimal d'un système éolien nécessite un suivi précis de la courbe de puissance maximale. Pour atteindre cet objectif, une commande spécifique, connue sous le nom de Maximum Power Point Tracking (MPPT), doit être mise en œuvre. Cette stratégie repose sur la régulation du couple électromagnétique afin d'ajuster la vitesse mécanique et ainsi maximiser la puissance électrique extraite du vent.

Deux approches principales sont utilisées pour la mise en œuvre du MPPT :

- **Première approche (moins courante)** : Cette méthode suppose que la caractéristique du coefficient de puissance C_p n'est pas connue à l'avance. Dans ce cas, des algorithmes adaptatifs ou heuristiques sont généralement employés pour rechercher en temps réel le point de fonctionnement optimal. Parmi ces méthodes, on retrouve :

La méthode de perturbation et observation (P&O), qui ajuste progressivement la vitesse pour identifier le point de puissance maximale.

Les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle, tels que les réseaux de neurones ou la logique floue, qui permettent une adaptation dynamique aux variations des conditions de vent.

- **Deuxième approche (plus répandue)** : Ici, la caractéristique du coefficient de puissance C_p est supposée connue à l'avance. L'éolienne suit alors une courbe optimale de puissance prédefinie en ajustant la vitesse de rotation pour maintenir le fonctionnement dans des conditions idéales. Cette approche repose sur la connaissance précise des paramètres aérodynamiques de l'éolienne et peut être implémentée à l'aide de régulateurs classiques tels que :

Les contrôleurs PID ou PI, qui ajustent dynamiquement le couple en fonction de la vitesse de rotation et des conditions de vent.

Les modèles basés sur des lois de commande prédictives, permettant une régulation optimisée selon les variations environnementales.

4.1. Maximisation de la puissance sans asservissement

La méthode de maximisation de la puissance sans asservissement de la vitesse, ou commande indirecte de vitesse, est déduite des équations aérodynamiques et mécaniques de l'éolienne pour identifier le point de fonctionnement correspondant à un coefficient de

puissance Cp maximal. Cette approche est de plus en plus adoptée par les constructeurs, car elle permet de simplifier le contrôle des éoliennes tout en assurant un fonctionnement efficace.

Elle repose sur l'hypothèse que la vitesse du vent, et donc la vitesse de rotation de la turbine, varie très peu en régime permanent. Cela conduit à deux conséquences majeures :

Le couple mécanique exercé sur l'arbre peut être considéré comme nul en régime établi.

$$\mathbf{C}_{\text{mec}} = \mathbf{0}$$

Le couple résistant dû aux frottements peut être négligé par rapport aux autres forces en jeu. $\mathbf{C}_f \approx \mathbf{0}$

Lorsque l'éolienne fonctionne sur le point de fonctionnement optimal, alors :

$$\lambda_{\text{opt}} = \frac{\mathbf{R} \cdot \Omega_{\text{opt}}}{V}, \mathbf{C}_p = \mathbf{C}_{p\max} \quad (\text{II. 28})$$

Le comportement dynamique de la turbine est décrit donc par l'équation statique :

$$\mathbf{C}_{\text{mec}} = \mathbf{C}_g - \mathbf{C}_{\text{em}} - \mathbf{C}_f = \mathbf{C}_g - \mathbf{C}_{\text{em}} = \mathbf{0} \quad (\text{II. 29})$$



$$\mathbf{C}_{\text{mec}} = \mathbf{C}_g = \mathbf{C}_{\text{aér}} \quad (\text{II. 30})$$

Le couple électromagnétique de référence est déterminé à partir d'une estimation du couple aérodynamique :

$$\mathbf{C}_{\text{em-ref}} = \mathbf{C}_{\text{aér est}} \quad (\text{II. 31})$$

Le couple aérodynamique estimé est déterminé par l'expression :

$$\mathbf{C}_{\text{em-ref}} = \frac{1}{2} \cdot \mathbf{C}_p \cdot \rho_{\text{air}} \cdot S \cdot \frac{1}{\Omega_{\text{tur-est}}} \cdot V_{\text{estimé}}^3 \quad (\text{II. 32})$$

$\Omega_{\text{tur-est}}$: la vitesse estimée de la turbine, elle est calculée à partir de la mesure de la vitesse mécanique :

$$\Omega_{\text{tur-est}} = \Omega_{\text{mec}} \quad (\text{II. 33})$$

Il y a aussi $V_{\text{estimé}}$: c'est la valeur estimée de la vitesse du vent, elle peut être donnée par l'expression :

$$V_{\text{estimé}} = \frac{\Omega_{\text{tur-est}} \cdot R}{\lambda} \quad (\text{II. 34})$$

En utilisant les formules précédentes, on obtient alors une expression globale du couple électromagnétique de référence :

$$\mathbf{C}_{\text{em-ref}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\mathbf{C}_p}{\lambda^3} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot \pi \cdot R^5 \cdot \Omega_{\text{mec}}^3 \quad (\text{II. 35})$$

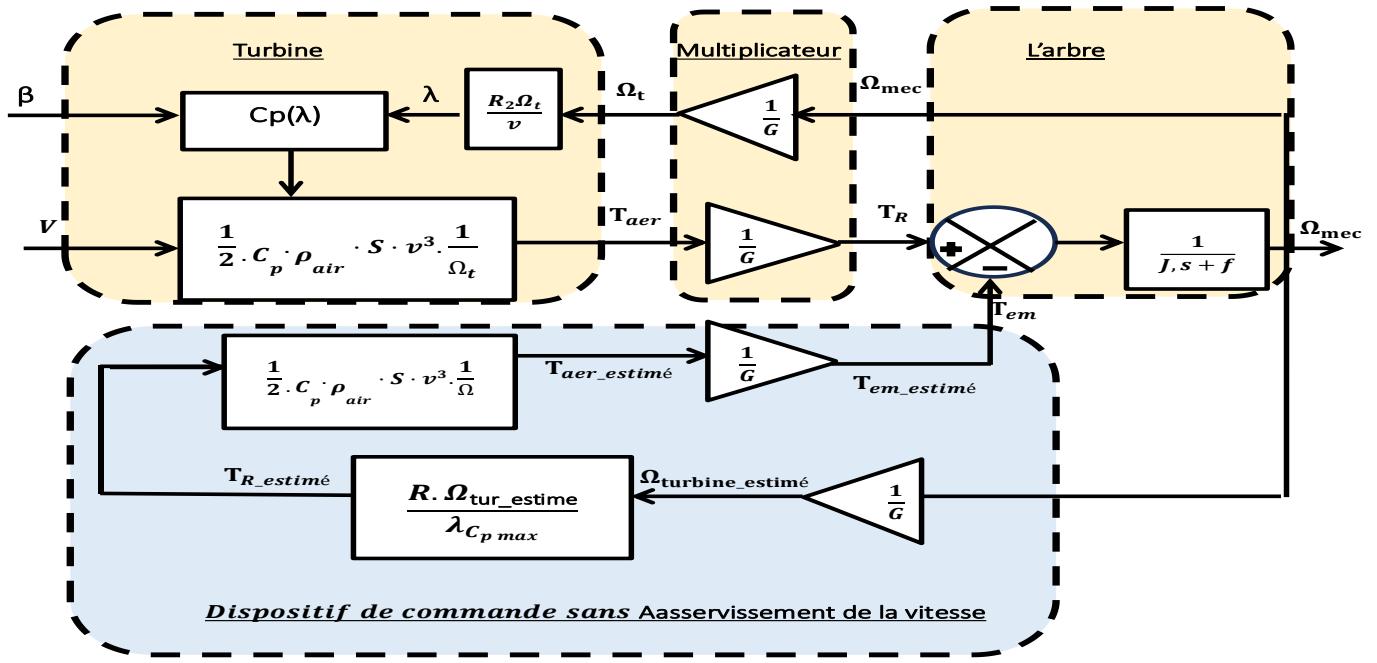


Figure II. 6 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite sans asservissement de la vitesse

4.2. Maximisation de la puissance avec asservissement de la vitesse :

La stratégie de commande adoptée consiste à ajuster le couple appliqué à l'arbre de la turbine afin de maintenir sa vitesse à une valeur de référence. Pour y parvenir, un asservissement de vitesse est mis en place.

Le correcteur de vitesse doit assurer deux fonctions principales :

- Stabiliser la vitesse mécanique autour de sa valeur de consigne.
- Atténuer l'effet des perturbations dues aux variations du couple éolien, qui influencent directement la dynamique du système.

Un régulateur PI est choisi pour cette tâche, car il permet de corriger l'erreur statique tout en assurant une réponse stable et satisfaisante.

Les simulations sont réalisées avec les conditions suivantes :

$C_p \max = 0,475$: coefficient de puissance maximal.

$\lambda = 8,1$: valeur du rapport de vitesse optimale.

L'objectif est de concevoir un schéma de commande permettant de réguler la vitesse de rotation pour maintenir une production d'énergie optimale, et ce, quelles que soient les variations de la vitesse du vent. Pour cela, le régulateur PI ajuste le couple appliqué afin de compenser les perturbations et garantir une extraction maximale de puissance.

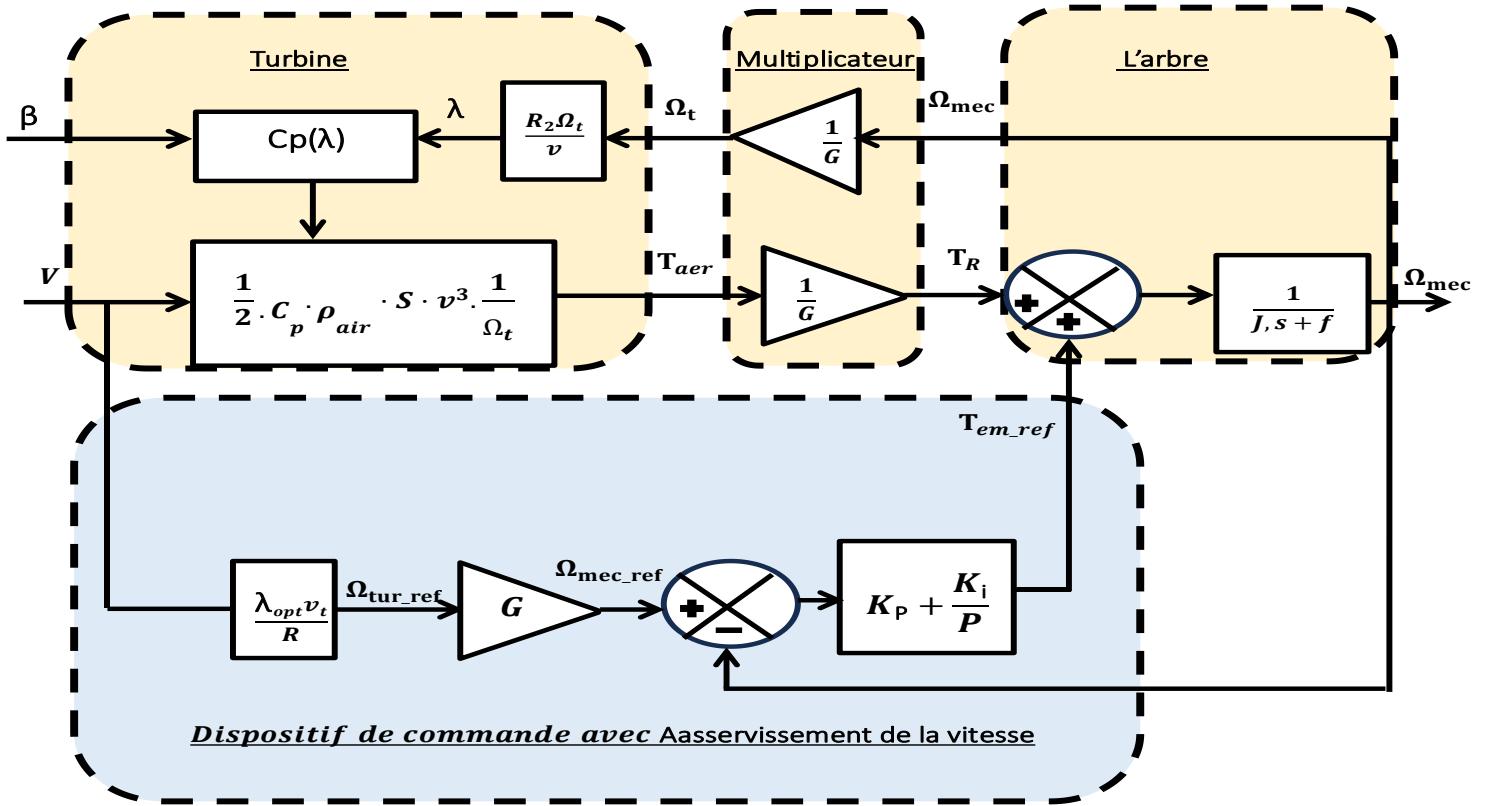


Figure II. 7 Schéma bloc de la maximisation de la puissance extraite avec asservissement de la vitesse

Effets du régulateur PI :

Augmentation de la marge de phase : Grâce à son action intégrale, il permet d'améliorer la stabilité du système en augmentant la marge de phase, ce qui réduit le risque d'instabilité.

Augmentation de la bande passante : En améliorant la dynamique du système, il élargit la plage de fréquences pour lesquelles la boucle de commande reste efficace.

Augmentation de la rapidité : Il accélère la réponse du système, ce qui se traduit par une diminution du temps de réponse (Tr) et une convergence plus rapide vers la valeur de consigne.

Réduction de l'erreur en régime permanent : L'intégration de l'erreur permet d'éliminer l'erreur statique, ce qui garantit que la sortie atteigne précisément la consigne après un certain temps.

Augmentation de la marge de stabilité : Le régulateur PI améliore la robustesse du système en augmentant sa tolérance aux variations de paramètres et aux perturbations.

Le calcul du correcteur de la vitesse de la turbine est basé sur un contrôleur PI. Le couple électromagnétique de référence est obtenu grâce à l'action de ce contrôleur appliquée à la différence entre la vitesse de référence et la vitesse de rotation.

La fonction de transfert qui décrit cette action est donnée par:

$$C_{\text{em-ref}} = C(P) \cdot (\Omega_{\text{tur-ref}}(P) - \Omega_{\text{mec}}(P)) \quad (\text{II. 35})$$

Une autre équation qui exprime la même relation est :

$$C_{\text{em-ref}} = \left(K_P + \frac{K_I}{P} \right) \cdot C_{\text{em-ref}} = C(P) \cdot (\Omega_{\text{tur-ref}}(P) - \Omega_{\text{mec}}(P)) \quad (\text{II. 36})$$

où :

K_P est le gain proportionnel,

K_I est le gain intégral.

Étant donné que le système étudié est linéaire, on peut utiliser le théorème de superposition pour exprimer la fonction de transfert sous la forme suivante:

$$\Omega_{\text{mec}}(P) = F(P) \cdot \Omega_{\text{tur-ref}}(P) - P(P) \cdot C_{\text{mec}}(P) \quad (\text{II. 37})$$

avec :

$$F(P) = \frac{K_P P + K_I}{j \cdot P^2 + (f + K_P)P + K_i} \quad (\text{II. 38})$$

$$P(P) = \frac{P}{P^2 + (f + K_P)P + K_i} \quad (\text{II. 39})$$

En supposant que la perturbation est nulle ($C_{\text{mecanique}} = 0$)

La fonction de transfert devient :

$$\Omega_{\text{mec}}(P) = F(P) \cdot \Omega_{\text{ref}}(P) \quad (\text{II. 40})$$

Cette fonction de transfert suit une dynamique du second ordre. Par identification avec la forme canonique d'un système du second ordre, l'équation caractéristique peut être exprimée comme :

$$\frac{1}{\omega_0^2} P^2 + \frac{2\xi}{\omega_0} P + 1 \quad (\text{II. 41})$$

Avec les relations suivantes :

$$\frac{J_T}{K_I} = \frac{1}{\omega_0^2} \quad (\text{II. 42})$$

$$\frac{f + K_P}{K_I} = \frac{2\xi}{\omega_0} \quad (\text{II. 43})$$

On en déduit :

$$K_I = J_T \cdot \omega_0^2 \quad (\text{II. 44})$$

$$K_P = \frac{2\xi K_I}{\omega_0} - f_T \quad (\text{II. 45})$$

Où ξ est le coefficient d'amortissement.

Pour obtenir une réponse optimale, on choisit $\xi = 0.7$.

Le temps de réponse à 1% est donné par :

$$T_R = \frac{3}{\xi \omega_0} \quad (\text{II.46})$$

Pour assurer une bonne rapidité du correcteur, on fixe :

$$T_R = \frac{1}{2} \tau_M \quad (\text{II.47})$$

Avec :

$$\tau_M = \frac{J_T}{f_T} \quad (\text{II.48})$$

Qui est la constante de temps du système à régler.

On en déduit :

$$\omega_0 = \frac{3}{\xi} \times \frac{1}{2\tau_M} \quad (\text{II.49})$$

Enfin, avec cette valeur de ω_0 , on peut calculer K_i et K_P .

4.3.MPPT avec asservissement (Un réseau de neurone)

4.3.1. Les réseaux de neurones artificiels : fondements, architectures et applications

Les réseaux de neurones artificiels (RNA) représentent une pierre angulaire de l'intelligence artificielle moderne, permettant de résoudre des problèmes complexes allant de la reconnaissance d'images à la prédiction de séries temporelles. Inspirés du fonctionnement biologique du cerveau humain, ces systèmes apprennent à partir de données pour modéliser des relations non linéaires entre variables. Leur capacité à approximer n'importe quelle fonction continue en fait des outils polyvalents en apprentissage automatique [33].

4.3.2. Inspiration biologique et fondements théoriques

Du neurone biologique au neurone formel

Le concept des RNA puise ses racines dans les travaux pionniers de Warren McCulloch et Walter Pitts, qui ont modélisé le neurone biologique comme une unité de calcul élémentaire. Un neurone formel intègre des signaux d'entrée x_i pondérés par des coefficients synaptiques w_i , calcule une somme pondérée $\sum w_i x_i + b$ (où b est un biais), puis applique une fonction d'activation non linéaire comme la sigmoïde $\sigma(z) = \frac{1}{1+e^{-z}}$. Cette modélisation capture l'essence du traitement de l'information dans les systèmes nerveux biologiques, où le potentiel d'action dépend du franchissement d'un seuil d'activation [34].

Théorème d'approximation universelle

Le pouvoir computationnel des RNA repose sur le théorème d'approximation universelle, qui établit qu'un réseau à une couche cachée avec un nombre suffisant de neurones peut approximer toute fonction continue sur un compact de \mathbb{R}^n avec une précision arbitraire. Cette

propriété explique leur efficacité dans des tâches comme la classification d'images médicales, où la relation entre les pixels et le diagnostic est hautement non linéaire [35].

4.3.3. Architecture des réseaux de neurones

Structure en couches

Un RNA typique se compose de trois types de couches :

- **Couche d'entrée** : Contient des neurones représentant les caractéristiques des données (par exemple, les pixels d'une image, les données d'un régulateur PID).
- **Couches cachées** : Effectuent des transformations non linéaires successives grâce à leurs fonctions d'activation[2].
- **Couche de sortie** : Produit les prédictions finales, souvent via une softmax pour les problèmes de classification multiclasse.

Chaque connexion entre neurones adjacents possède un poids synaptique ajusté pendant l'apprentissage. La profondeur (nombre de couches cachées) et la largeur (nombre de neurones par couche) déterminent la capacité du modèle à capturer des motifs complexes.

Propagation avant et rétropropagation

Le processus d'inférence suit une propagation avant :

$$\mathbf{a}^{(l)} = \mathbf{f}(\mathbf{W}^{(l)} \mathbf{a}^{(l-1)} + \mathbf{b}^{(l)}) \quad (\text{II. 50})$$

où $\mathbf{W}^{(l)}$ est la matrice de poids de la couche l , $\mathbf{a}^{(l)}$ les activations, et \mathbf{f} la fonction d'activation.

L'apprentissage s'effectue via la rétropropagation du gradient, qui calcule les dérivées partielles de la fonction de perte par rapport aux paramètres en utilisant la règle de chaîne[35].

Par exemple, pour une perte d'entropie croisée L , la mise à jour des poids s'écrit :

$$\mathbf{w}_{ij} \leftarrow \mathbf{w}_{ij} - \eta \frac{\partial L}{\partial w_{ij}} \quad (\text{II. 51})$$

avec η le taux d'apprentissage[3].

4.3.4. Principaux types de réseaux neuronaux

- Perceptrons multicouches (MLP)
- Réseaux convolutifs (CNN)
- Réseaux récurrents (RNN)

4.3.5. Processus d'apprentissage et optimisation

Entraînement supervisé

Lors de l'entraînement, le réseau ajuste ses paramètres pour minimiser une fonction de perte mesurant l'écart entre prédictions et étiquettes réelles. Pour un problème de classification binaire, la perte logistique s'exprime :

$$L = -\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \log(\hat{y}_i) + (1 - y_i) \log(1 - \hat{y}_i) \quad (\text{II. 52})$$

où \hat{y}_i est la probabilité prédictive[3].

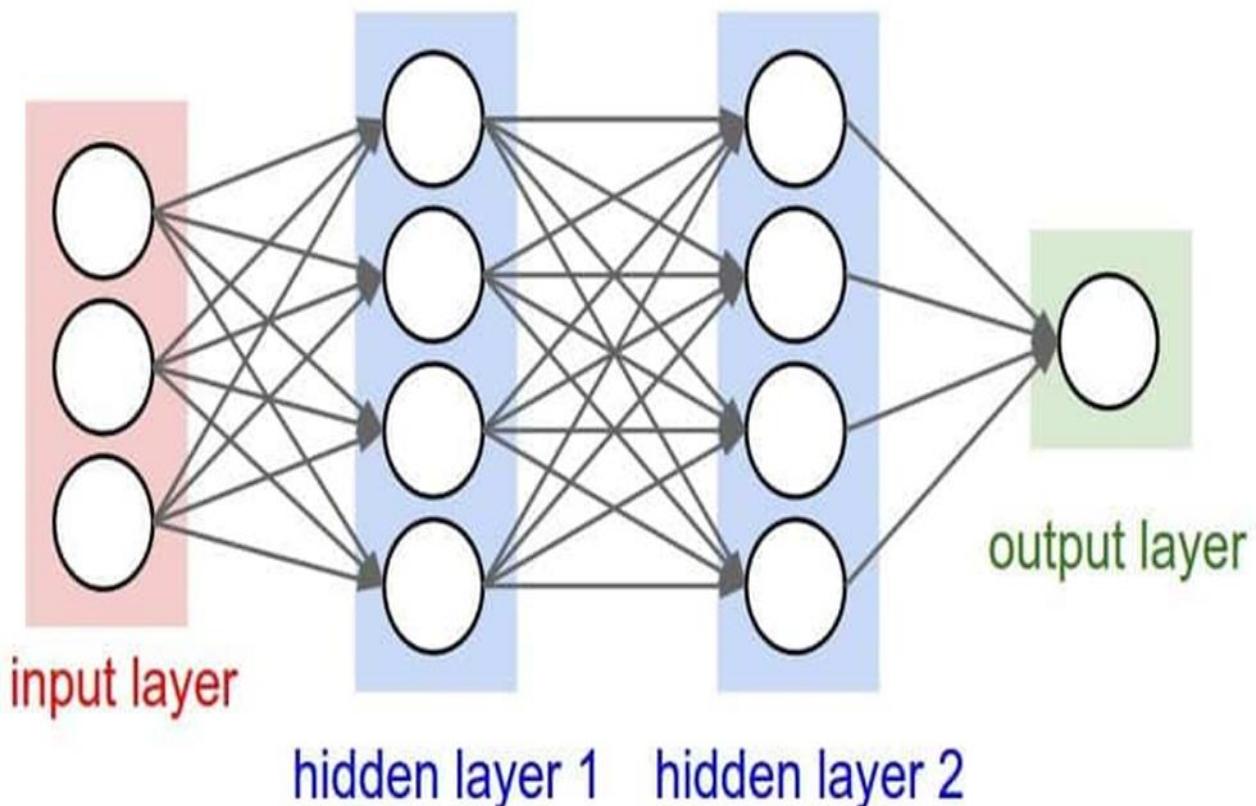


Figure II. 8 Schéma de fonctionnement d'un réseau de neurone

Dans notre cas, nous cherchons à extraire le maximum de puissance d'une éolienne. Pour cela, nous allons entraîner un réseau de neurones afin de :

- Augmenter la valeur moyenne de la vitesse du générateur, ce qui permet d'améliorer la conversion d'énergie.
- Réduire le temps de réponse, afin d'atteindre plus rapidement un régime optimal.
- Eliminer les oscillations dans le système
- Réduire l'erreur statique

Cependant, les réseaux de neurones nécessitent une base des données pour l'entraînement. Dans un premier temps, on a collecté des données en utilisant le régulateur PI de la simulation, en enregistrant les entrées (X) ou $X = V_{ref} - V_{méc}$ et sorties (Y) du système. À la fin, on a formé une matrice de (1×10001) éléments pour chaque variable afin de structurer les données d'apprentissage.

Partie apprentissage :

On a utilisé la fonction d'activation tansig et une sortie linéaire (purelin).

- **Taille de la couche cachée** : `hiddenLayerSize = 10`
- **Fonction d'activation** : `tansig` est adaptée aux problèmes non linéaires
- **critères d'arrêt** : `net.trainParam.goal = 1e-5` est un critère strict..
- **net.Param.max_fail = 10** signifie que l'entraînement s'arrête si l'erreur de validation ne diminue pas après 10 itérations.

- **Nombre d'itérations (epochs)** : 1000 itérations

La fonction **tansig** (Tangente Sigmoïde) est une fonction d'activation utilisée dans les réseaux de neurones artificiels. Elle est définie comme :

$$\text{tansig}(x) = \frac{2}{1 + e^{-2x}} - 1 \quad (\text{II.53})$$

Caractéristiques :

- **Domaine** : $]-\infty, +\infty[$
- **Image** : $]-1, +1[$
- **Dérivable** : Oui
- **Symmetries**: Fonction impaire (symétrique par rapport à l'origine)
- **Saturation**: Quand x est très grand ou très petit, la fonction atteint des valeurs proches de ± 1 , ce qui peut causer un problème de gradient évanescence lors de l'entraînement des réseaux profonds.

Utilisation dans MATLAB :

Dans MATLAB, **tansig** est une fonction d'activation intégrée et peut être utilisée dans les réseaux de neurones avec :

```
net.layers{1}.transferFcn = 'tansig';
```

Partie d'entraînement de réseau

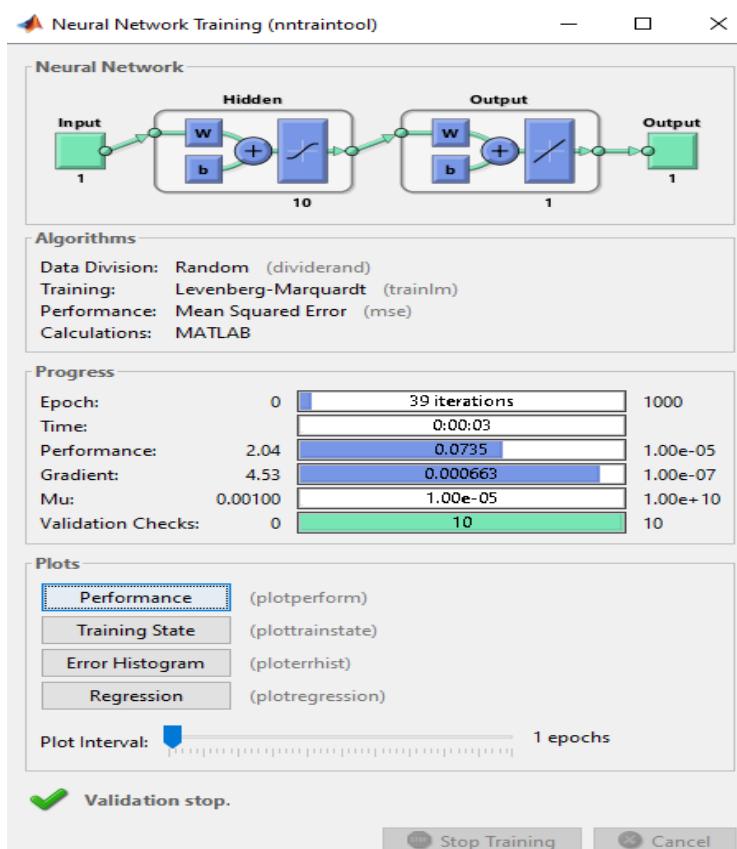


Figure II. 9 Interface de l'entraînement du réseau de neurone sur Deep Learning toolbox (Matlab)

Progression de l'Entraînement :

- 39 itérations ont été effectuées.
- L'erreur de performance est passée de 2.04 à 0.0735.
- Le gradient a diminué à 0.000663, ce qui montre une bonne convergence.
- Mu (paramètre de régularisation) est très bas (1.00e-05), ce qui indique un ajustement fin du réseau.

Le nombre de validations arrêtées est de 10, ce qui signifie que la validation a détecté une stabilisation et a arrêté l'entraînement.

Et pour la méthode d'utilisation à la fin on obtient un bloc (NN) avec une entrée et une sortie qu'on obtient pour remplacer le régulateur PI.

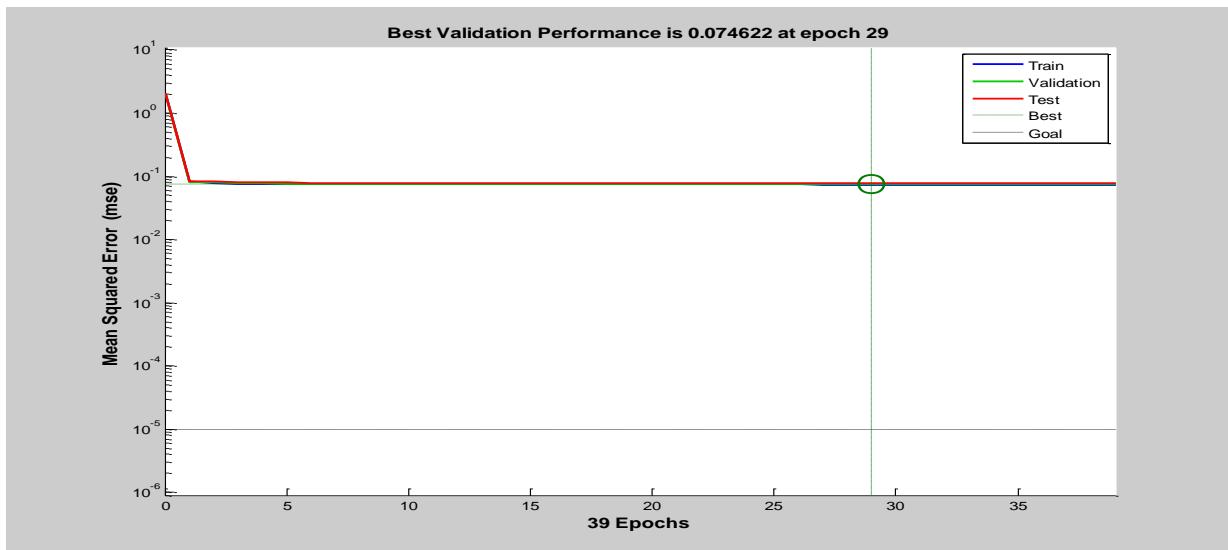


Figure II. 10 Performance de l'adaptation

Analyse :

Au début, l'erreur diminue fortement, puisque le réseau ajuste ses poids. Après quelques epochs (vers 10-15), l'erreur se stabilise. La validation et le test suivent une tendance similaire à l'entraînement (ligne bleue), indiquant une bonne généralisation.

Maintenant on simule le système avec cette méthode (les réseaux de neurone AI) et on compare les résultats avec ce qu'on a obtenu avec un régulateur PI classique :

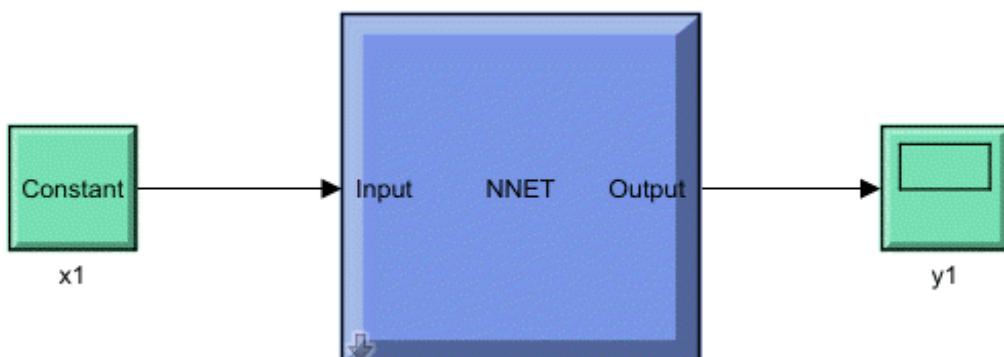
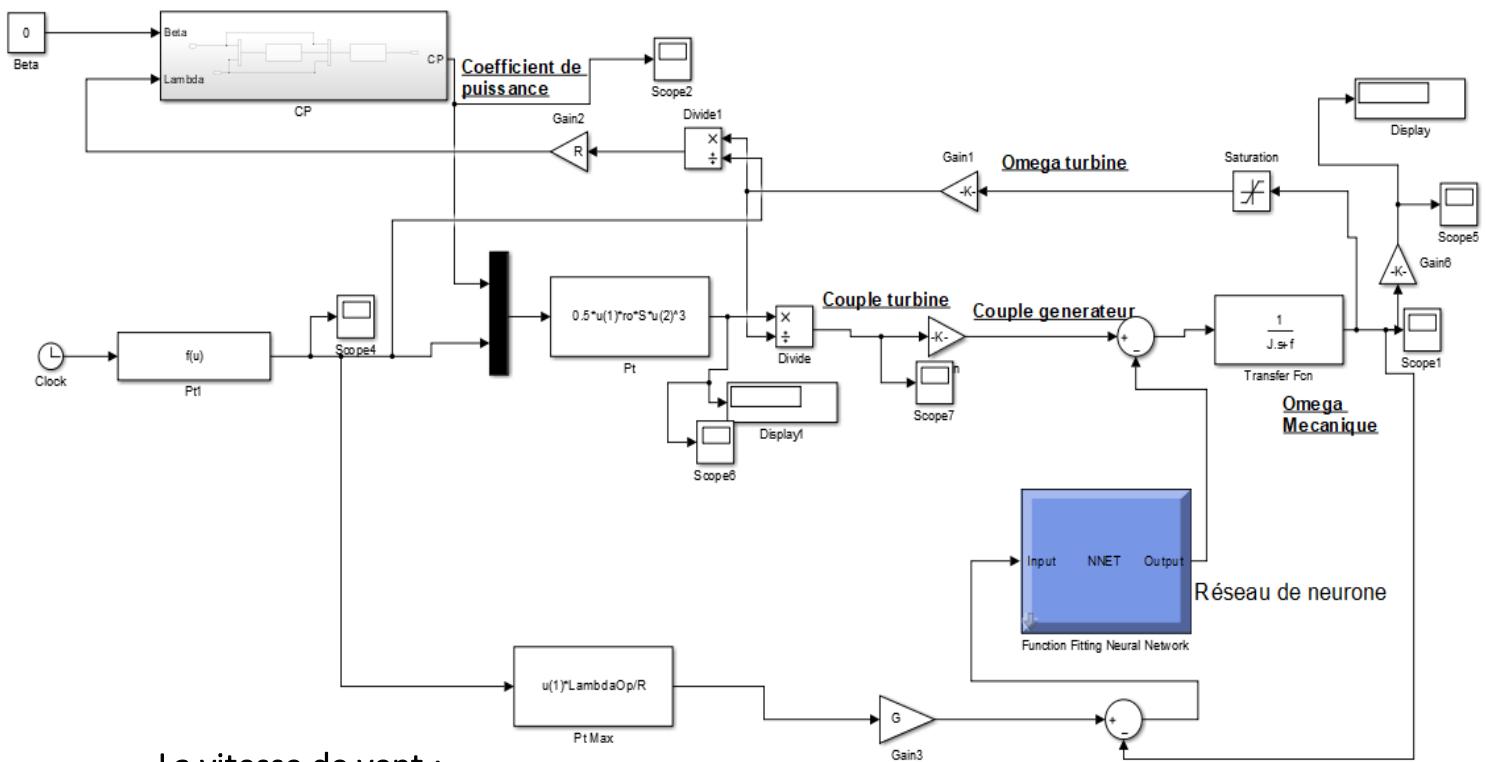


Figure II. 11 Bloc de réseau de neurone entraînée

5. Simulation

Le schéma de simulation



La vitesse de vent :

Pour la simulation on a choisi une caractéristique de vitesse de vent variable d'une manière aléatoire avec des chute légère dans la vitesse afin de rapprocher du cas réel au maximum possible comme il est montre dans la figure ci-dessous :

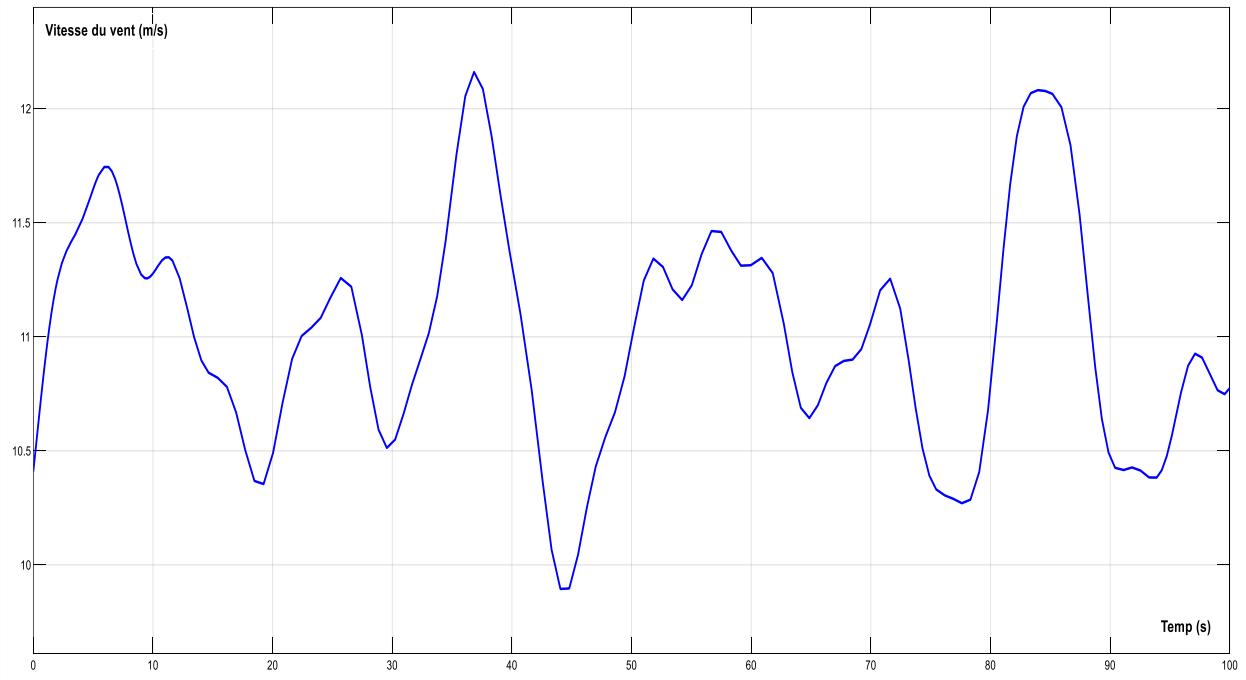
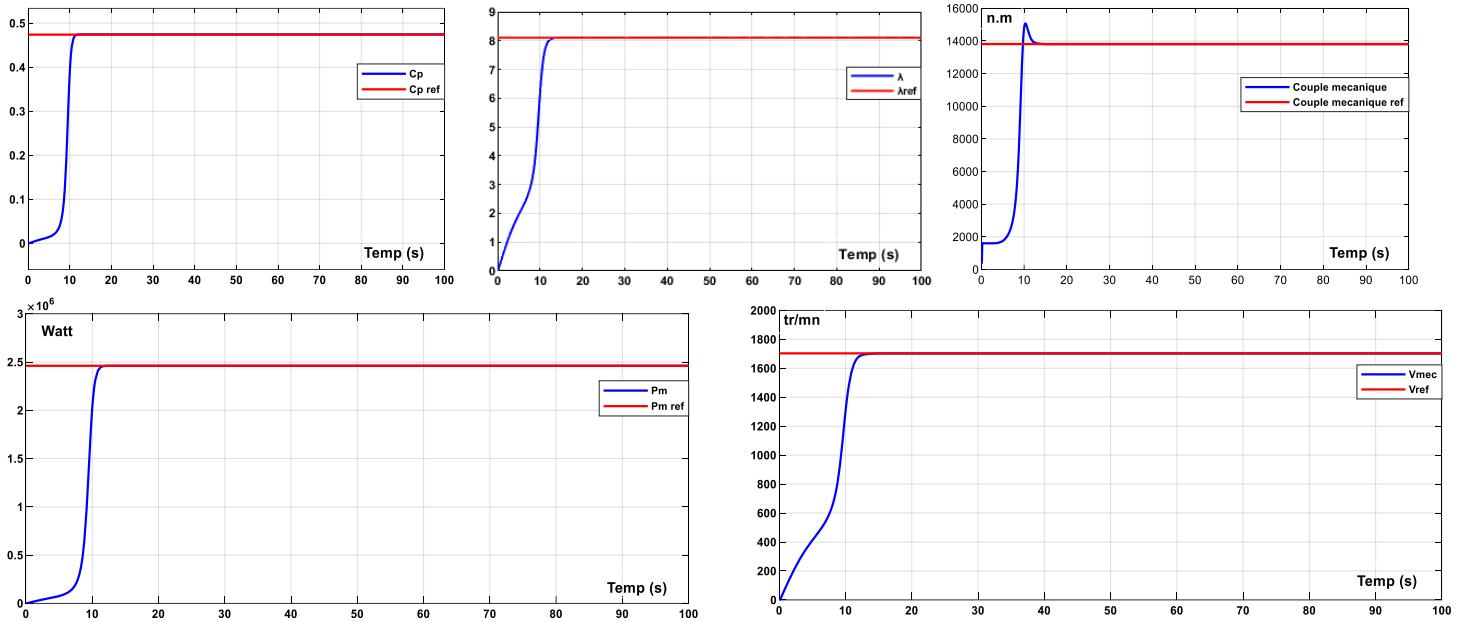
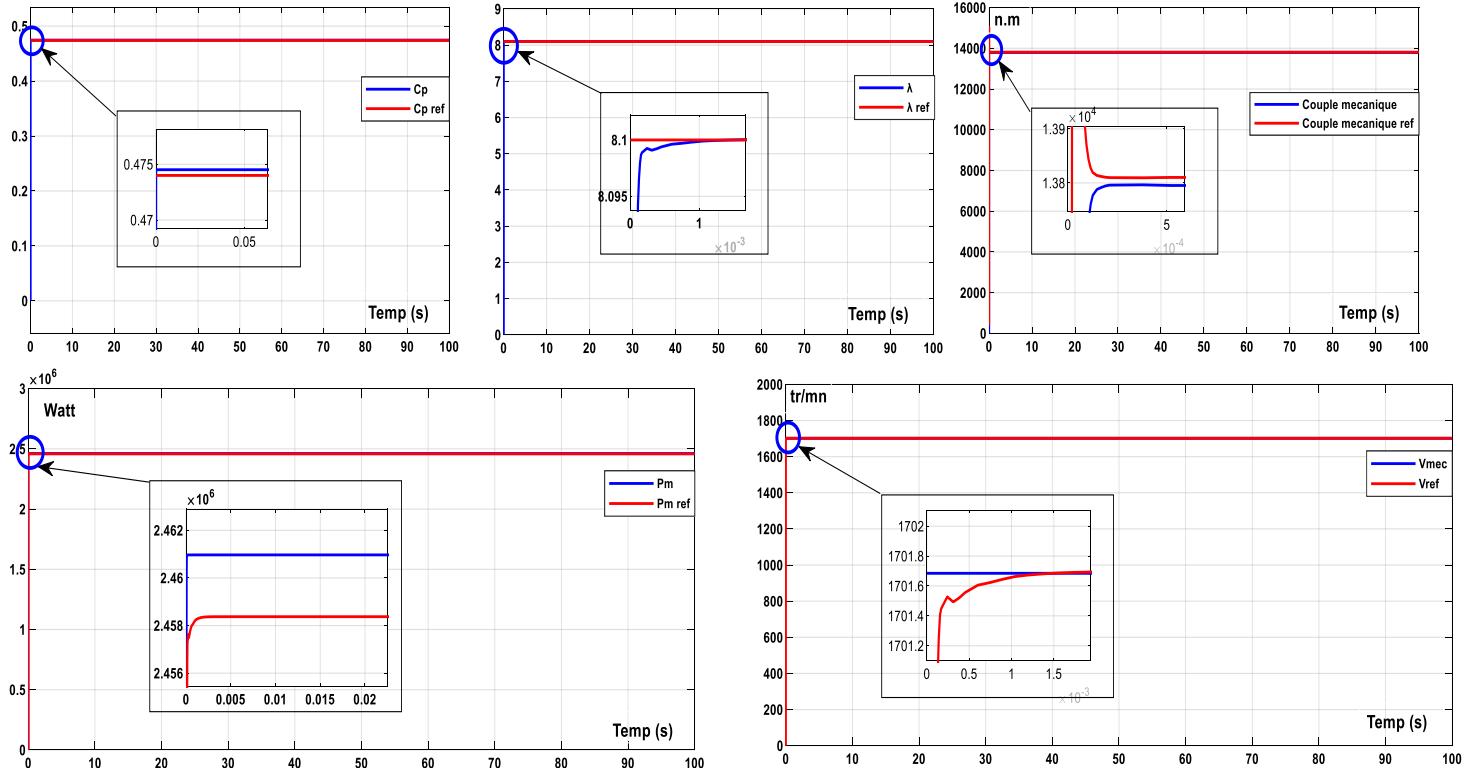


Figure II. 12 La vitesse du vent de la zone où on a simulé la turbine éolienne

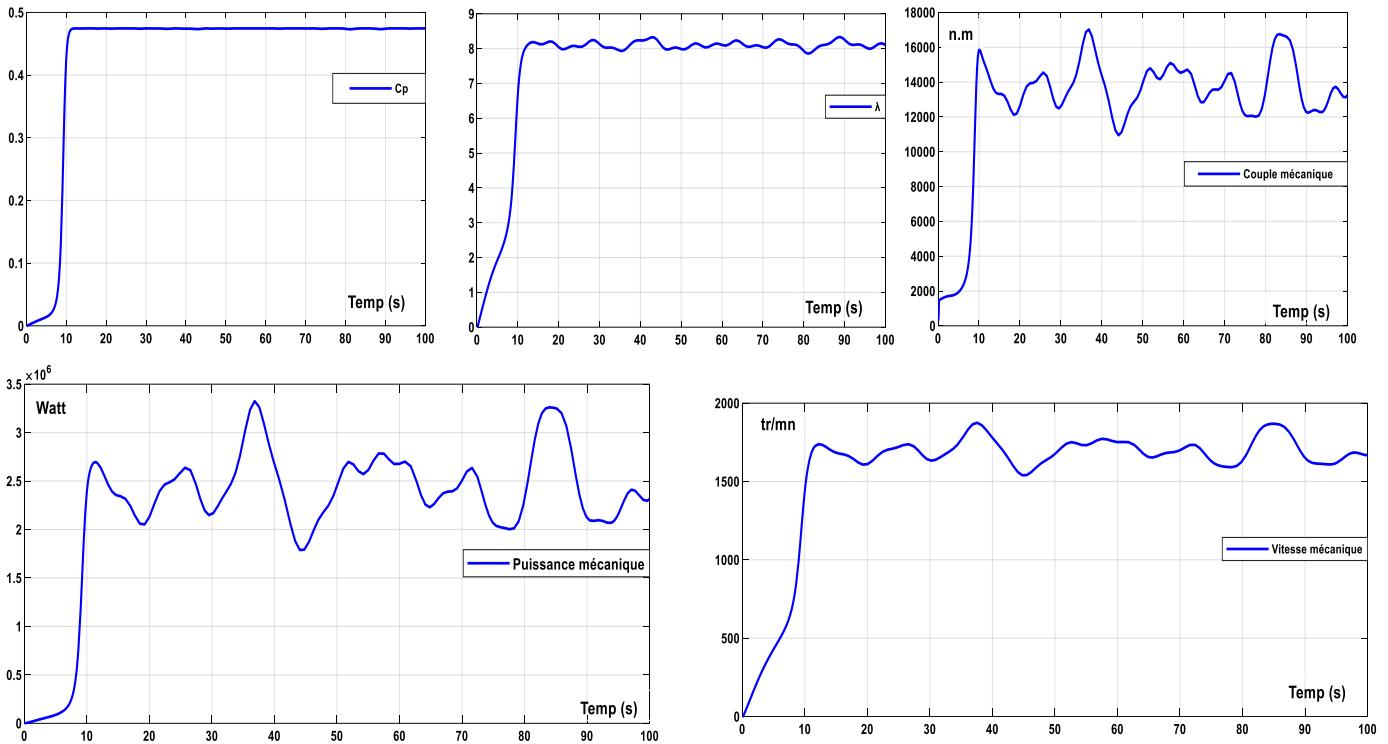
5.1.MPPT sans asservissement de la vitesse mécanique V=11 m/s pendant 100s



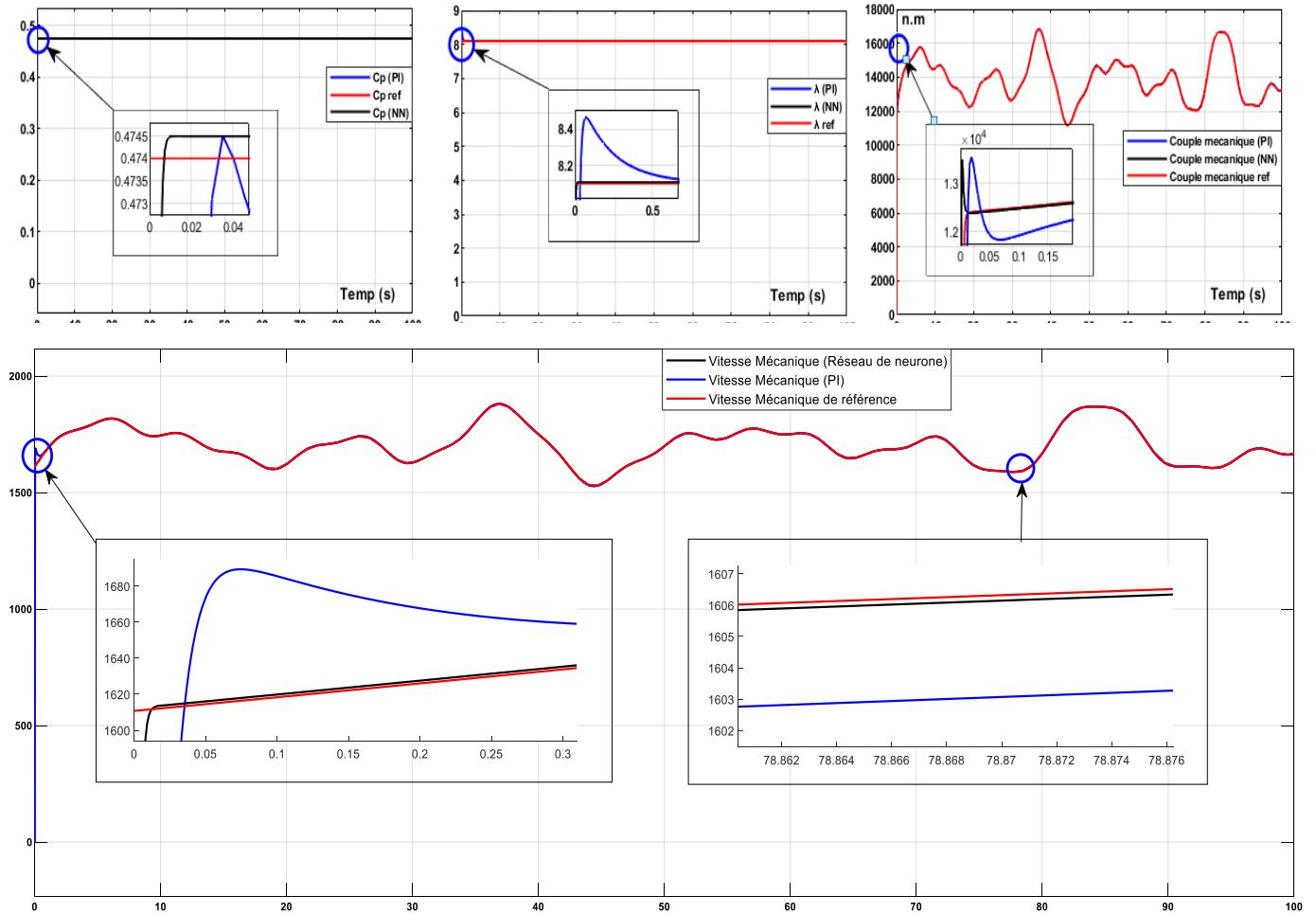
5.2. MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique V=11 m/s pendant 100s

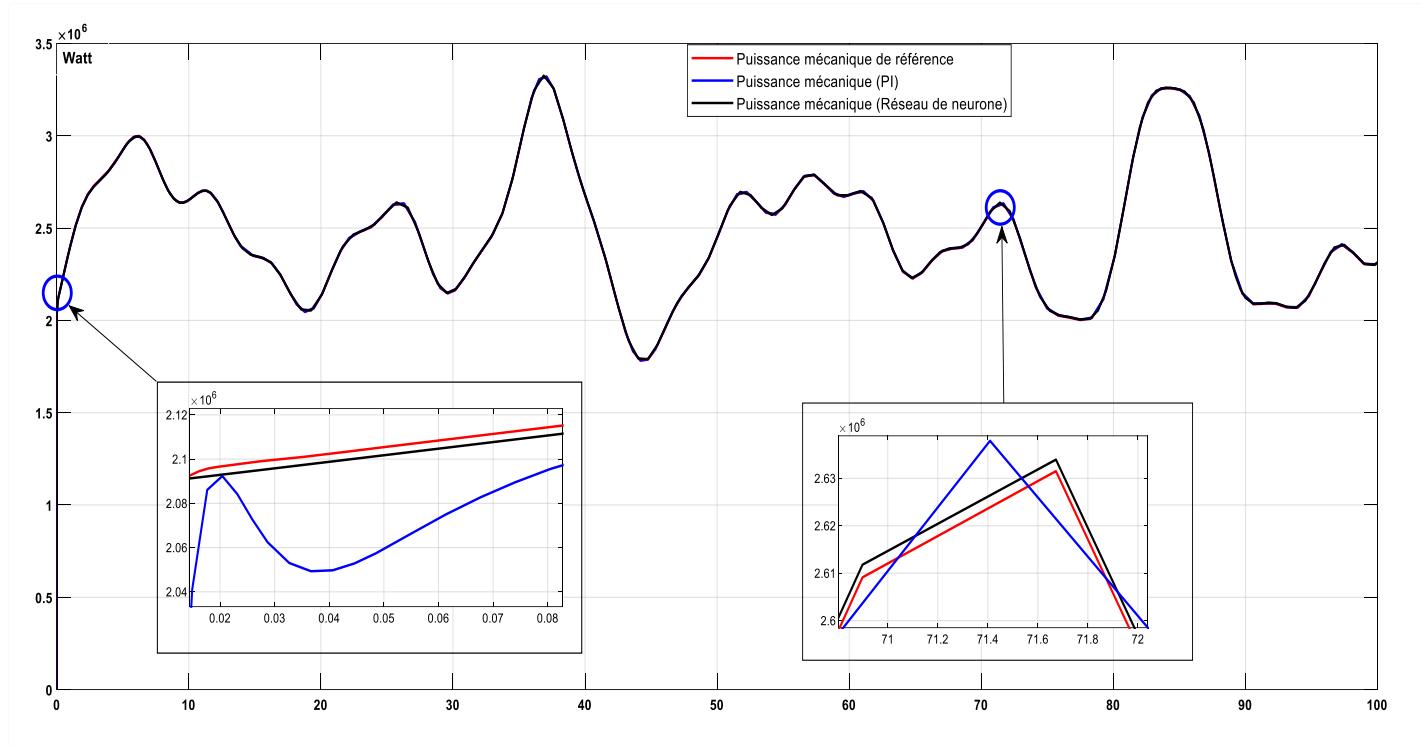


5.3. MPPT Avec asservissement de la vitesse mécanique (vitesse du vent variable)pendant 100s



5.4. MPPT avec asservissement de la vitesse mécanique (vitesse du vent variable) pendant 100s





5.5. Interprétation des résultats

Vitesse du vent fixe

L'analyse comparative entre le fonctionnement de l'éolienne sans asservissement et celui sous commande PI met en évidence des différences claires en matière de comportement dynamique et de performance globale.

Sans asservissement, l'éolienne parvient à atteindre les consignes fixées, mais avec une certaine lenteur. Le système met du temps à réagir, ce qui se traduit par un démarrage progressif et un temps de réponse relativement long. De plus, on observe un dépassement significatif du couple mécanique au début, ce qui pourrait engendrer des contraintes importantes sur les composants mécaniques. Cela montre que, même si la stabilité est assurée à long terme, le comportement transitoire reste peu optimal, notamment en cas de variation de conditions.

Avec l'introduction de la commande PI, le système devient beaucoup plus réactif. Tous les paramètres clés — vitesse de rotation, puissance, couple, coefficient de performance — s'ajustent rapidement et avec une grande précision. On note une nette amélioration dans la stabilité du système dès les premiers instants de fonctionnement, sans oscillations ni dépassements notables. Cette commande permet un suivi fidèle des valeurs de référence, ce qui se traduit par une meilleure exploitation du potentiel énergétique du vent, tout en préservant l'intégrité mécanique de l'éolienne.

En conclusion, la commande PI apporte une amélioration significative au fonctionnement de l'éolienne. Elle permet de réduire considérablement le temps de réponse du système, d'assurer un suivi précis des consignes, et de stabiliser rapidement les différentes grandeurs physiques. Contrairement au fonctionnement libre, elle évite les surcharges mécaniques au démarrage et garantit un comportement plus doux et maîtrisé. Cette approche permet donc une meilleure efficacité énergétique tout en augmentant la fiabilité et la durée de vie du système. Elle

représente une solution robuste et adaptée pour piloter efficacement une éolienne dans un environnement à conditions de vent constantes.

Vitesse du vent variable

Dans un premier temps, sans asservissement, le système fonctionne de manière brute, ce qui engendre une vitesse mécanique instable marquée par des oscillations visibles. Le couple mécanique fluctue fortement, provoquant une instabilité de la puissance mécanique. Bien que le coefficient de puissance atteigne rapidement une valeur optimale avoisinant 0,48, cette performance énergétique s'accompagne d'une dynamique désordonnée et non maîtrisée. Ainsi, si le système semble performant à court terme, il demeure instable, ce qui peut poser problème en termes de durabilité, de couplage au réseau et de qualité de production.

L'introduction d'un correcteur de type PI améliore nettement la stabilité du système. La vitesse mécanique devient plus maîtrisée, même si un pic initial suivi d'une chute subsiste. Le couple ainsi que la puissance mécanique présentent également moins d'oscillations comparativement au mode libre. Cependant, ce type de régulation montre ses limites, notamment dans le suivi précis de la référence, en particulier durant les phases transitoires. Le PI améliore donc la stabilité globale mais reste insuffisant pour assurer une précision optimale dans le suivi des consignes rapides.

En revanche, le recours à une régulation basée sur un réseau de neurones (NN) offre des performances nettement supérieures. La vitesse mécanique suit fidèlement la consigne de référence, même dans les moindres détails, ce que les zooms sur les courbes illustrent clairement. Le couple mécanique se révèle plus fluide, et la puissance mécanique suit de près la courbe de référence, témoignant d'une excellente qualité de suivi. Le coefficient de puissance reste aussi élevé que dans les autres configurations. Cette approche permet ainsi de combiner stabilité, réactivité et précision, surpassant largement le correcteur PI, notamment dans la gestion dynamique et la réduction de l'erreur de poursuite.

Contrôleur	Erreur statique	Oscillations	Adaptation aux non-linéarités	Besoin de modèle précis	Robustesse
PI	Faible $X=0.1977$	Présentes	Faible	Oui	Moyenne
Réseau de neurones	Très Faible $X=0.05179$	Faibles	Excellente	Non	Élevée

Le réseau de neurones se démarque nettement du contrôleur PI sur presque tous les critères. Il propose une commande plus souple, plus précise et plus robuste, adaptée aux caractéristiques dynamiques et non linéaires d'un système éolien réel. Bien que le PI reste une solution simple et rapide à implémenter, il montre ses limites dès que le comportement du système devient trop complexe ou variable.

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé la modélisation de la turbine éolienne ainsi que le processus de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique. Après avoir présenté les différentes zones de fonctionnement de la turbine, nous nous sommes focalisés sur la zone permettant de maximiser l'énergie extraite du vent. Cette maximisation est assurée par le contrôle du couple électromagnétique généré. Plusieurs techniques ont été détaillées, notamment deux approches de maximisation de la puissance : l'une sans asservissement de la vitesse, et l'autre avec asservissement de la vitesse, en utilisant soit un régulateur PI, soit un réseau de neurones. Les performances de ces algorithmes ont été validées à travers des simulations.

Chapitre III :

Modélisation de la machine

asynchrone à double alimentation

Introduction

Dans le monde de l'électrotechnique, les machines asynchrones tiennent une place de choix. Que ce soit dans l'industrie, les transports ou même à la maison, elles sont partout. Pourquoi un tel succès ? La réponse est simple : ces machines sont à la fois robustes, économiques et faciles à entretenir. Leur fonctionnement repose sur un principe ingénieux mais efficace — l'interaction entre un champ magnétique tournant (généré par le stator) et les courants qui apparaissent naturellement dans le rotor. Cette simplicité fait leur force.

Parmi les différentes variantes de la machine asynchrone, il en est une qui se démarque particulièrement par sa polyvalence et son efficacité : la Machine Asynchrone à Double Alimentation, plus connue sous son nom anglais Double-Fed Induction Generator (DFIG). Ce type de machine a la particularité d'être alimenté à la fois au niveau du stator et du rotor, ce qui lui permet de fonctionner sur une large plage de vitesses autour de la vitesse de synchronisme — un avantage décisif, notamment lorsqu'on s'intéresse à la production d'énergie renouvelable.

Et justement, la MADA est aujourd'hui un acteur incontournable dans le domaine de l'énergie éolienne. Sa capacité à contrôler indépendamment la puissance active et réactive injectée dans le réseau en fait un choix idéal pour les systèmes modernes. En effet, grâce à l'utilisation de convertisseurs de puissance côté rotor, il devient possible d'optimiser la récupération d'énergie en fonction des conditions de vent, tout en assurant une stabilité électrique au niveau du réseau. Un compromis intelligent entre performance, souplesse et maîtrise énergétique.

1. Description de la machine asynchrone à double alimentation de type rotor bobiné

La Machine Asynchrone à Double Alimentation avec rotor bobiné est un bel exemple d'ingénierie électrique qui allie flexibilité de commande et puissance maîtrisée. Contrairement à la machine à cage d'écureuil — plus simple, mais moins adaptable — cette version intègre un enroulement triphasé au niveau du rotor. Ce dernier est connecté à l'extérieur par l'intermédiaire de bagues collectrices et de balais, ce qui permet une alimentation indépendante du rotor via un convertisseur de fréquence [36].



Figure III. 1 Conception 3D par logiciel pour la MADA

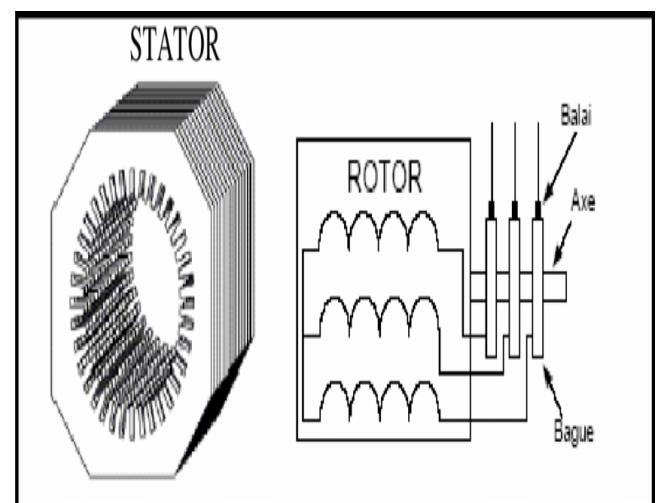


Figure III. 2 Schéma de la MADA



Figure III. 3 MADA 150KW dans l'entreprise de mon stage (FERTIAL ANNABA)

Concrètement, le stator de la machine est directement relié au réseau électrique triphasé. Il fournit la puissance principale. Le rotor, lui, est alimenté par un système électronique composé d'un redresseur et d'un onduleur, qui permettent de moduler à volonté la fréquence et l'amplitude du courant injecté dans les enroulements rotoriques. Ce montage est ingénieux, car le convertisseur ne traite qu'une fraction de la puissance totale (en général autour de 30 %), ce qui allège les coûts et les pertes tout en conservant une grande souplesse de commande [36].

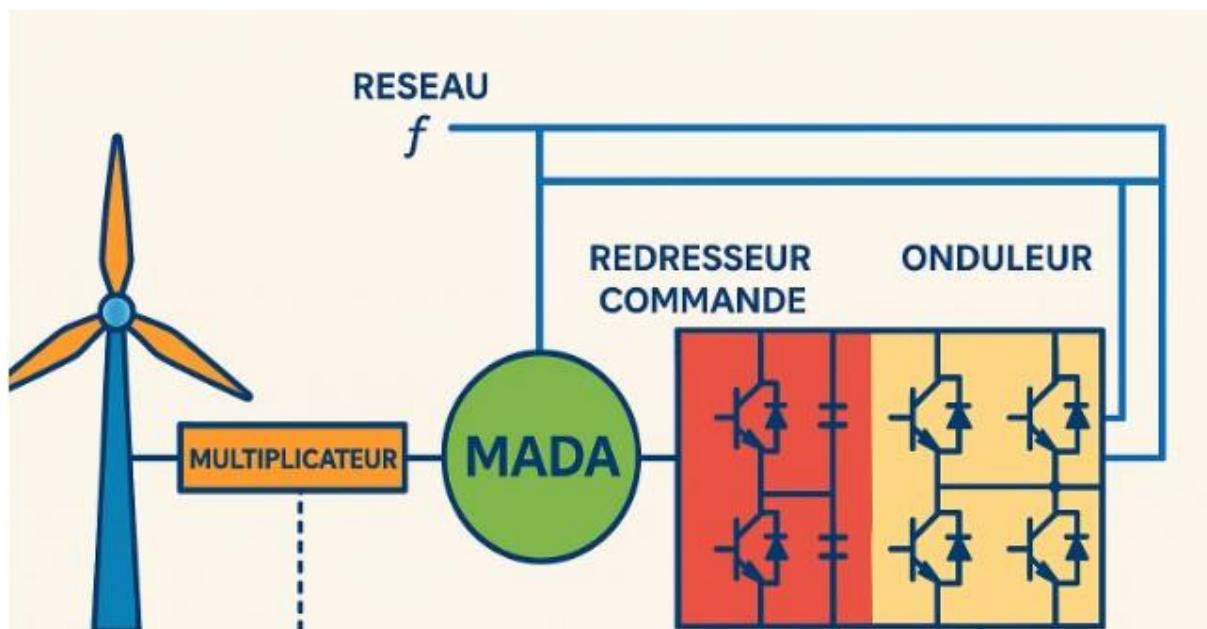


Figure III. 4 Schéma général d'un système utilisant une MADA alimenté par un seul convertisseur statique

2. Principe de fonctionnement de la MADA

La MADA fonctionne en imposant des fréquences spécifiques aux deux armatures (stator et rotor). Contrairement à une machine asynchrone classique, la MADA peut être vue comme une machine synchrone à vitesse constante, car la fréquence du stator est fixe, tandis que la fréquence du rotor est variable en fonction de la vitesse de la machine. Le glissement, qui est la différence relative entre la vitesse du rotor et celle du champ tournant du stator, peut être contrôlé par des convertisseurs de puissance connectés soit au stator, soit au rotor, ou aux deux simultanément [37].

Cette capacité permet à la MADA de fonctionner dans quatre régimes distincts :

- **Hypo-synchrone** : la vitesse du rotor est inférieure à la vitesse synchrone, le glissement est positif.
- **Hyper-synchrone** : la vitesse du rotor dépasse la vitesse synchrone, le glissement devient négatif

2.1.Fonctionnement en mode générateur hypo synchrone

La machine tourne à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse synchrone, ce qui correspond à un glissement positif. Dans ce cas, la puissance active est injectée dans le réseau via le stator, tandis que le rotor absorbe une partie de la puissance via le convertisseur. Ce mode permet de produire de l'énergie même en dessous de la vitesse synchrone, ce qui est impossible avec une machine asynchrone classique à rotor cage. Le champ magnétique rotorique tourne dans le même sens que celui du stator, avec une fréquence rotorique positive. Cette capacité est particulièrement utile dans les applications telles que l'éolien, où la vitesse de rotation varie fréquemment en dessous de la vitesse synchrone.

2.2.Fonctionnement en mode générateur hypersynchrone

La machine tourne à une vitesse supérieure à la vitesse synchrone, correspondant à un glissement négatif. Ici, la puissance active est également injectée dans le réseau via le stator, mais la puissance de glissement est récupérée via le rotor et réinjectée dans le réseau par le convertisseur. La fréquence du rotor devient négative, ce qui signifie que le champ magnétique rotorique tourne en sens inverse par rapport au champ statorique. Ce mode est similaire au fonctionnement d'une machine asynchrone classique en générateur, mais la MADA récupère la puissance de glissement, ce qui améliore le rendement global de la machine [37].

2.3.Fonctionnement en mode moteur hyposynchrone

En mode hyposynchrone, la vitesse du rotor est inférieure à la vitesse synchrone du champ magnétique statorique. Le convertisseur prélève une partie de la puissance électrique induite au rotor et la réinjecte dans le réseau après adaptation de fréquence et de tension. Cette récupération de puissance permet de ralentir la machine sans diminuer son rendement, car l'énergie extraite du rotor n'est pas dissipée mais renvoyée au réseau. Ce principe est

particulièrement avantageux pour les applications où une plage de vitesse limitée est nécessaire, comme dans certaines pompes, ventilateurs ou éoliennes.

La commande de la machine en cascade hyposynchrone s'appuie souvent sur des techniques de contrôle vectoriel qui permettent de gérer précisément les courants rotoriques pour simuler le comportement d'une machine synchrone à vitesse variable. Cette méthode assure une bonne dynamique et une régulation fine du couple moteur. Le contrôle s'effectue notamment par la variation de l'angle de retard des thyristors du convertisseur, ce qui modifie la puissance renvoyée au réseau et donc la vitesse de rotation [37].

2.4. Fonctionnement en mode moteur hypersynchrone

Le mode hypersynchrone désigne une situation particulière dans le fonctionnement des machines asynchrones, où la vitesse du rotor dépasse la vitesse synchrone du champ magnétique tournant produit par le stator.

En mode hypersynchrone, la vitesse du rotor dépasse celle du champ tournant, ce qui inverse le sens relatif entre le rotor et le champ magnétique. Pour que la machine continue à fonctionner comme un moteur dans cette plage de vitesse, il est nécessaire d'alimenter le rotor avec une fréquence et une tension adaptées, ce qui est réalisé grâce à un convertisseur électrique. Ce dernier ajuste la fréquence et la phase des tensions appliquées au rotor pour maintenir un couple moteur positif malgré la vitesse élevée.

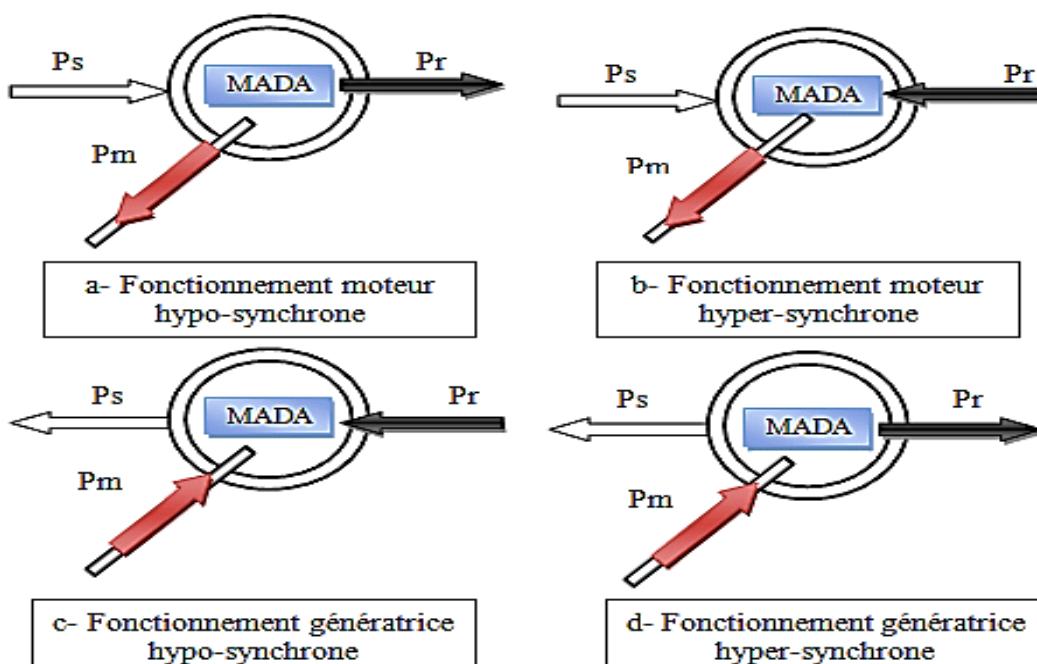


Figure III. 5 Le fonctionnement de la MADA dans les différents modes

3. Modélisation de la machine asynchrone à double alimentation

La modélisation de la MADA est une étape cruciale pour analyser son comportement dynamique et concevoir des stratégies de commande efficaces. Elle repose généralement sur les équations de la machine asynchrone exprimées dans un repère tournant (généralement de Park), ce qui permet de simplifier les équations et de mieux étudier les interactions électromécaniques. Cette modélisation permet notamment de simuler le fonctionnement de la MADA en régime générateur dans différentes conditions de vent, et d'étudier les effets des perturbations sur la stabilité du système.

3.1. Hypothèses simplificatrices

La machine asynchrone, en raison de la complexité de la répartition de ses enroulements et de sa géométrie, ne se prête pas aisément à une modélisation tenant compte de sa configuration réelle. Il devient donc nécessaire d'introduire des hypothèses simplificatrices. Ces dernières, bien que essentielles à la mise en œuvre technologique de la commande, éloignent toutefois le modèle obtenu de la réalité physique du système.

Ainsi, les hypothèses suivantes sont adoptées :

- La machine est considérée comme parfaitement symétrique.
- Le circuit magnétique est supposé idéalement feuilleté, tant au niveau du stator que du rotor. Seuls les enroulements sont parcourus par des courants, et la densité de courant est supposée uniforme dans la section des conducteurs élémentaires (absence d'effet pelliculaire).
- Les résistances des enroulements sont considérées constantes et indépendantes de la température.
- Le circuit magnétique est supposé non saturé, ce qui permet de considérer les flux magnétiques comme étant des fonctions linéaires des courants.
- Les forces magnétomotrices produites par les phases statoriques et rotoriques sont supposées réparties de manière sinusoïdale.
- L'entrefer est considéré de largeur uniforme, et l'effet d'encocheage est négligé.

3.2. Mise en équation de la machine asynchrone à double alimentation

3.2.1. Équation électrique

Les équations générales de la machine asynchrone à rotor bobiné dans un repère triphasé s'écrivent :

$$[\mathbf{V}_s] = \mathbf{R}_s[\mathbf{I}_s] + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_s}{dt} \quad (\text{III.1})$$

$$[\mathbf{V}_r] = \mathbf{R}_r[\mathbf{I}_r] + \frac{d\boldsymbol{\Psi}_r}{dt} \quad (\text{III.2})$$

$$[\mathbf{V}_r] \neq \mathbf{0} \quad (\text{III.3})$$

Les flux sont donnés par :

$$[\Psi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r] \quad (\text{III.4})$$

$$[\Psi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s] \quad (\text{III.5})$$

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} V_{a_s} \\ V_{b_s} \\ V_{c_s} \end{bmatrix} \quad (\text{III.6}) \quad [V_r] = \begin{bmatrix} V_{a_r} \\ V_{b_r} \\ V_{c_r} \end{bmatrix} \quad (\text{III.7}) \quad [I_s] = \begin{bmatrix} I_{a_s} \\ I_{b_s} \\ I_{c_s} \end{bmatrix} \quad (\text{III.8}) \quad [I_r] = \begin{bmatrix} I_{a_r} \\ I_{b_r} \\ I_{c_r} \end{bmatrix} \quad (\text{III.9})$$

$[R_s]$ et $[R_r]$ sont des matrices diagonales.

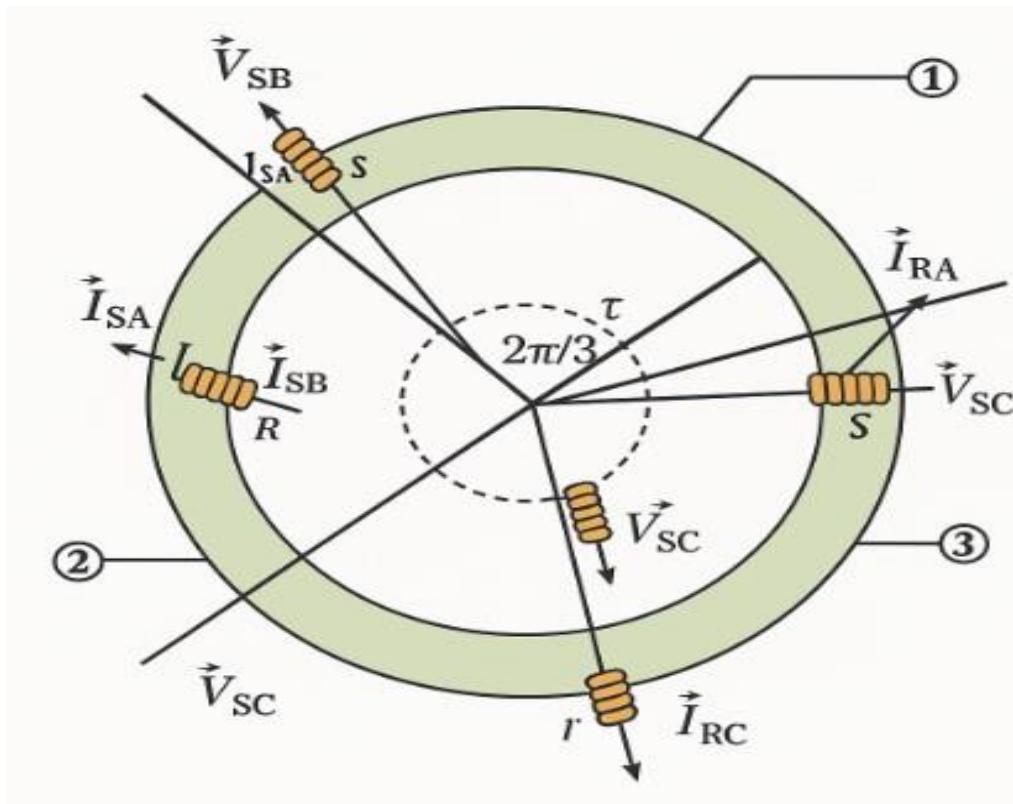


Figure III. 6 Inductance du stator et du rotor d'une machine asynchrone à double alimentation

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad (\text{III.10}) \quad [L_{rr}] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix} \quad (\text{III.11})$$

$$[M_{sr}] = [M_{rs}]^T \quad (\text{III.12})$$

Où :

L_s : Inductance propre du stator,

M_s : Inductance mutuelle entre les phases statoriques,

L_r : Inductance propre du rotor,

M_r : Inductance mutuelle entre les phases rotoriques.

M_{sr}: Valeur maximale de l'inductance mutuelle entre une phase statorique et une phase rotorique.

En remplaçant (III.4) dans (III.1) : on obtient le système suivant :

$$[V_s] = R_s[I_s] + [L_{ss}] \frac{d[I_s]}{dt} + [M_{sr}] \frac{d[I_r]}{dt} \quad (\text{III.13})$$

$$[V_r] = R_r[I_r] + [L_{rr}] \frac{d[I_r]}{dt} + [M_{sr}]^T \frac{d[I_s]}{dt} \quad (\text{III.14})$$

3.2.2. Equation mécanique de la machine :

Le couple électromagnétique est donné par l'expression générale suivante :

$$C_{em} = p [I_s]^T \frac{d}{d\theta} ([M_{sr}] \cdot [I_r]) \quad (\text{III.15})$$

Où :

p : Nombre de paires de pôles.

[I_s] et [I_r] : vecteurs courants statorique et rotorique.

[M_{sr}] : Matrice d'inductance mutuelle entre stator et rotor.

θ : Angle mécanique de rotation.

La résolution analytique dans ce repère est compliquée, car le système d'équations possède des coefficients qui varient avec l'angle θ.

3.3. Modèle de la machine asynchrone à double alimentation dans le plan dq

3.3.1. La transformation de Park

La transformation de Park est une transformation mathématique qui permet de passer d'un système triphasé (a,b,c) fixe vers un système tournant à deux axes (d,q) et un axe neutre (0). [38]

Elle simplifie l'analyse des machines électriques en transformant des grandeurs variables dans le temps en grandeurs constantes (en régime permanent), ce qui facilite l'étude et le contrôle de ces machines.

$$[P(\theta)] = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{2}{3} -\sin(\theta) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

$$[\mathbf{P}(\theta)]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\theta & -\sin\theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta + \frac{2\pi}{3}\right) \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

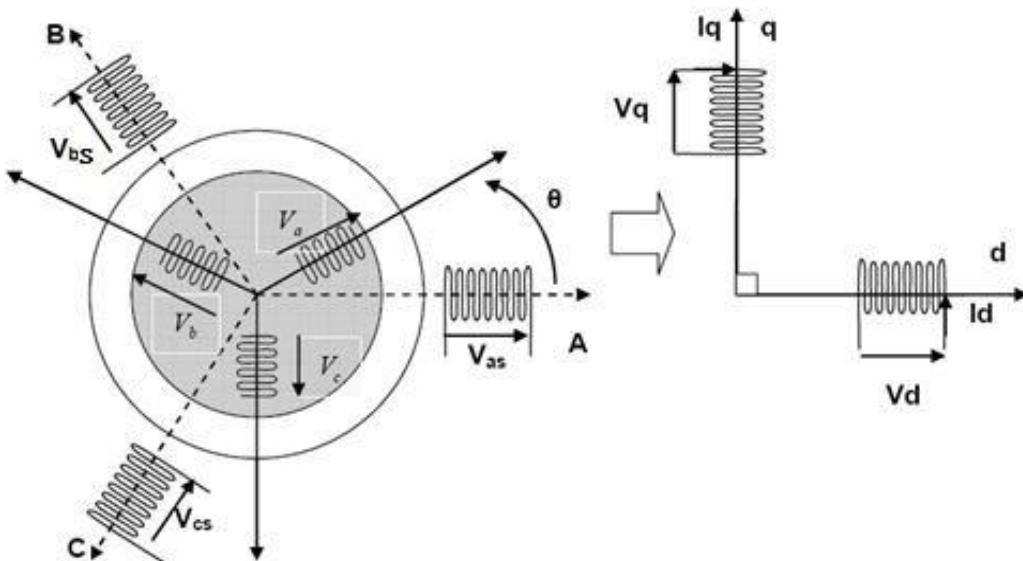


Figure III. 7 Modèle de Park de la MADA

3.3.2. Modélisation de la MADA dans le repère de Park

Les tensions, courants et flux sont projetés dans le repère d-q via la matrice de Park $[\mathbf{p}(\theta)]$, dépendante de l'angle électrique θ_s (stator) ou $\theta_s - \theta$ (rotor) :

Tensions :

$$\begin{cases} [\mathbf{V}_{s,dq}] = [\mathbf{p}(\theta_s)][\mathbf{V}_{s,abc}] \\ [\mathbf{V}_{r,dq}] = [\mathbf{p}(\theta_s - \theta)][\mathbf{V}_{r,abc}] \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

Flux :

$$\begin{cases} [\Psi_{s,dq}] = [\mathbf{p}(\theta_s)][\Psi_{s,abc}] \\ [\Psi_{r,dq}] = [\mathbf{p}(\theta_s - \theta)][\Psi_{r,abc}] \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Courants :

$$\begin{cases} [\mathbf{I}_{s,dq}] = [\mathbf{p}(\theta_s)][\mathbf{I}_{s,abc}] \\ [\mathbf{I}_{r,dq}] = [\mathbf{p}(\theta_s - \theta)][\mathbf{I}_{r,abc}] \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Remarque :

$\theta = p \cdot \omega_m t$: Angle mécanique du rotor (p = nombre de paires de pôles).

θ_s : Angle de référence pour la transformation statorique (souvent aligné avec le flux statorique).

Les flux statoriques et rotoriques sont exprimés en fonction des inductances cycliques :

$$\begin{aligned}\Psi_{ds} &= L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \Psi_{qs} &= L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \Psi_{dr} &= L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \Psi_{qr} &= L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs}\end{aligned}\quad (\text{III.22})$$

$L_s = L_s - M_s$: Inductance cyclique statorique (corrigée des fuites).

$L_r = L_r - M_r$: Inductance cyclique rotorique.

$M = \frac{3}{2} M_{sr} = \frac{3}{2} M_{rs}$: Inductance mutuelle cyclique entre stator et rotor.

Stator:

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III.23})$$

Rotor:

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} - \omega_r \Psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} + \omega_r \Psi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III.24})$$

3.3.3. Équation mécaniques

Équation de vitesse :

$$\frac{J}{p} \frac{d\Omega_m}{dt} = C_{em} - C_r - C_f \quad (\text{III.25})$$

J : Moment d'inertie du rotor (en $\text{kg} \cdot \text{m}^2$).

p : Nombre de paires de pôles de la machine.

C_r : Couple résistant (charge mécanique opposée, en $\text{N} \cdot \text{m}$).

C_f : Couple de frottement (pertes mécaniques, en $\text{N} \cdot \text{m}$).

Équation de couple :

$$C_{em} = P \frac{M}{L_s} (i_{qr} \Psi_{ds} - i_{dr} \Psi_{qs}) \quad (\text{III.26})$$

3.4. Modèle d'état de la machine

Le modèle de la machine asynchrone à double alimentation, défini par l'ensemble des équations précédentes, peut être modifié en fonction de l'application spécifique et des

variables d'état mesurables, telles que les courants, les flux, la vitesse et le couple. Selon les contraintes de l'application et les données disponibles, ce modèle peut être simplifié ou réécrit pour en faciliter l'implémentation. Actuellement, la représentation d'état est de plus en plus utilisée, notamment dans la conception de systèmes de commande et de contrôle, en raison de sa capacité à offrir une formulation pratique et adaptée aux besoins modernes de régulation de la machine asynchrone [39].

Maintenant nous allons établir les étapes essentielles à la construction du modèle d'état de la machine.

Dans ce contexte les équations de flux peuvent être mises sous forme matricielle comme suite :

$$\begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 27})$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 28})$$

$$\begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \\ i_{dr} \\ i_{qr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s} & 0 \\ 0 & 1 & 0 & -\frac{M}{\sigma L_s} \\ \frac{1}{\sigma L_s} & -\frac{M}{\sigma L_r} & 0 & 1 \\ 0 & -\frac{M}{\sigma L_r} & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \quad (\text{III. 29})$$

Avec le coefficient de dispersion :

$$\sigma = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad (\text{III. 30})$$

Le développement de (III. 23) et (III. 24) :

$$\begin{aligned}
 P(\Psi_{ds}) &= -R_s i_{ds} + w_s \Psi_{qs} + V_{ds} \\
 P(\Psi_{qs}) &= -R_s i_{qs} - w_s \Psi_{ds} + V_{qs} \\
 P(\Psi_{dr}) &= -R_r i_{dr} + w_r \Psi_{qr} + V_{dr} \\
 P(\Psi_{qr}) &= -R_r i_{qr} - w_r \Psi_{dr} + V_{qr}
 \end{aligned} \tag{III.31}$$

En remplaçant les courants par leurs valeurs (III.27) dans les quatre équations de la machine (III.29), ainsi, le modèle global, constitué des quatre équations, peut être écrit sous la forme standard d'un modèle d'état.

$$\mathbf{P}(\mathbf{x}) = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bv} \tag{III.32}$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} \frac{-R_s}{\sigma t_{s0}} & \mathbf{0} & \frac{R_s M}{\sigma t_{s0} L_r} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{-R_s}{\sigma t_{s0}} & \mathbf{0} & \frac{R_s M}{\sigma t_{s0} L_r} \\ \frac{R_s M}{\sigma t_{s0} L_r} & \mathbf{0} & \frac{-R_s}{\sigma t_{s0} L_r} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \frac{R_s M}{\sigma t_{s0} L_r} & \mathbf{0} & \frac{-R_s}{\sigma t_{s0} L_r} \end{bmatrix} \tag{III.33}$$

$$\mathbf{B} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{III.34}$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Psi_{ds} \\ \Psi_{qs} \\ \Psi_{dr} \\ \Psi_{qr} \end{bmatrix} \tag{III.35}$$

$$\mathbf{v} = \begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ V_{dr} \\ V_{qr} \end{bmatrix} \tag{III.36}$$

4. Commande vectorielle de la MADA

La commande vectorielle, aussi appelée Field Oriented Control (FOC), est adaptée à la MADA pour permettre une régulation dynamique rapide et précise. Elle repose sur une transformation des grandeurs triphasées dans un référentiel tournant (repère de Park), afin de transformer les équations différentielles non linéaires en un modèle linéarisé, propice à la commande.

Le principe fondamental de la commande vectorielle appliquée à la MADA consiste à aligner l'axe direct (d) du repère sur le flux statorique ou rotorique. Cela permet de séparer la régulation du couple (via l'axe q) de celle du flux (via l'axe d). Grâce à cette stratégie, il devient possible d'imposer indépendamment la puissance active (via le courant q rotorique) et la puissance réactive (via le courant d rotorique), offrant ainsi une grande souplesse dans la gestion énergétique du système [39].

4.1. Modèle de la MADA avec orientation de flux statorique

La commande vectorielle, aussi appelée Field Oriented Control (FOC), est adaptée à la MADA pour permettre une régulation dynamique rapide et précise. Elle repose sur une transformation

des grandeurs triphasées dans un référentiel tournant (repère de Park), afin de transformer les équations différentielles non linéaires en un modèle linéarisé, propice à la commande.

Le principe fondamental de la commande vectorielle appliquée à la MADA consiste à aligner l'axe direct (d) du repère sur le flux statorique ou rotorique. Cela permet de séparer la régulation du couple (via l'axe q) de celle du flux (via l'axe d). Grâce à cette stratégie, il devient possible d'imposer indépendamment la puissance active (via le courant q rotorique) et la puissance réactive (via le courant d rotorique), offrant ainsi une grande souplesse dans la gestion énergétique du système.

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} + \frac{d}{dt} \Psi_{ds} - \omega_s \Psi_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \frac{d}{dt} \Psi_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 37})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Psi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 38})$$

4.2.Choix du référentiel pour le modèle diphasé :

En appliquant la technique d'orientation du flux statorique sur le modèle de la machine (orientant le repère de Park pour que le flux statorique suivant l'axe q soit constamment nul)

Nous pouvons écrire :

$$\Psi_{qs} = 0 \quad \text{et} \quad \Psi_{ds} = \Psi_s$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_{ds} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + \omega_s \Psi_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 39})$$

$$\begin{cases} V_{dr} = R_r I_{dr} + \frac{d}{dt} \Psi_{dr} - (\omega_s - \omega_r) \Psi_{qr} \\ V_{qr} = R_r I_{qr} + \frac{d}{dt} \Psi_{qr} + (\omega_s - \omega_r) \Psi_{dr} \end{cases} \quad (\text{III. 40})$$

Hypothèse réaliste : les résistances des enroulements statorique sont négligées dans la machine de forte puissance utilisée pour la production éolienne :

Alors :

$$\begin{cases} V_{ds} = 0 \\ V_{qs} = \omega_s \Psi_{ds} = V_s \end{cases} \quad (\text{III. 41})$$

Les flux statoriques :

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = \Psi_s = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Psi_{qs} = 0 = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III. 42})$$

4.3.Courants statoriques en fonction des courants rotoriques

$$I_{ds} = \frac{\Psi_{ds}}{L_s} - \frac{M}{L_s} I_{dr} \quad (\text{III. 43})$$

$$I_{qs} = -\frac{M}{L_s} I_{qr} \quad (\text{III. 44})$$

4.4.Relation entre puissances statoriques et courants rotoriques

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \\ Q_s = \frac{3}{2} (V_{qs} I_{ds} - V_{ds} I_{qs}) \end{cases} \quad (\text{III. 45})$$

Avec $V_{ds} = 0$:

$$\begin{cases} P_s = \frac{3}{2} V_s I_{qs} \\ Q_s = \frac{3}{2} V_s I_{ds} \end{cases} \quad (\text{III. 46})$$

En injectant les expressions de I_{ds} et I_{qs} dans les équations de puissance, on obtient :

$$\begin{cases} P_s = -\frac{3M}{2L_s} V_s I_{qr} \\ Q_s = \frac{3}{2} \left(\frac{V_s \Phi_s}{L_s} - \frac{M}{L_s} V_s I_{dr} \right) \end{cases} \quad (\text{III. 47})$$

4.5.Relations entre flux et courants

$$\begin{cases} \Psi_{ds} = L_s I_{ds} + M I_{dr} \\ \Psi_{qs} = L_s I_{qs} + M I_{qr} \end{cases} \quad (\text{III. 48})$$

$$\begin{cases} \Psi_{dr} = L_r I_{dr} + M I_{ds} \\ \Psi_{qr} = L_r I_{qr} + M I_{qs} \end{cases} \quad (\text{III. 49})$$

En remplaçant I_{ds} et I_{qs} , on obtient :

$$\begin{aligned} \Psi_{dr} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + \frac{M V_s}{\omega_s L_s} \\ \Psi_{qr} &= \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \end{aligned} \quad (\text{III. 50})$$

Et finalement les équations de tension deviennent :

$$\begin{aligned} V_{dr} &= R_r I_{dr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{dr}}{dt} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} + \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \\ V_{qr} &= R_r I_{qr} + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) \frac{dI_{qr}}{dt} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{aligned} \quad (\text{III.51})$$

En appliquant la transformation de Laplace

$$\begin{aligned} V_{dr} &= \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) p \right] I_{dr} - g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{qr} \\ V_{qr} &= \left[R_r + \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) p \right] I_{qr} + g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right) I_{dr} + g\omega_s \frac{MV_s}{\omega_s L_s} \end{aligned} \quad (\text{III.52})$$

$\left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$: Terme de couplage entre les deux axes.

$g\omega_s \left(L_r - \frac{M^2}{L_s} \right)$: Force électromotrice dépendante de la vitesse de rotation.

D'après Les équations (III.43), (III.44) et (III.45) on peut établir un schéma bloc du système électrique à réguler:

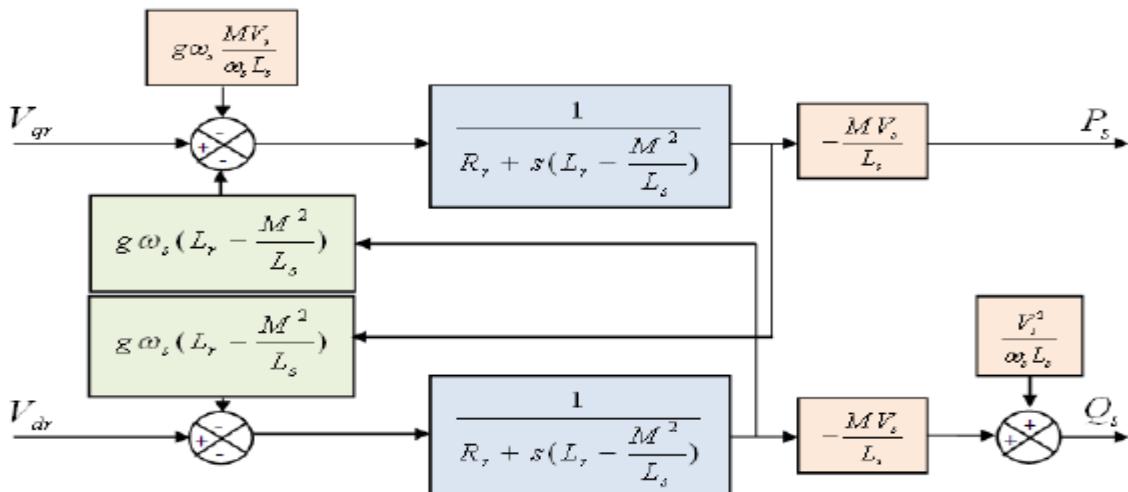


Figure III. 8 Modèle de la MADA pour le contrôle des puissances

Ce schéma bloc représente un modèle simplifié de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), utilisé principalement pour piloter la puissance active et la puissance réactive dans les systèmes éoliens. Dans ce modèle, les tensions rotorique V_{dr} et V_{qr} , générées par un convertisseur, servent d'entrées de commande. Elles permettent d'agir sur les courants rotorique I_{dr} et I_{qr} , qui déterminent directement les puissances échangées avec le réseau électrique. Le modèle tient compte des éléments essentiels du comportement dynamique de la machine, comme la résistance et l'inductance rotorique, ainsi que des interactions entre les deux axes d et q liées à la rotation du champ magnétique. Grâce à cette structure, il devient possible de contrôler séparément la puissance active (liée à I_{qr}) et la puissance réactive (liée à I_{dr}), ce qui est particulièrement utile pour optimiser le fonctionnement de l'éolienne, améliorer

la qualité de l'énergie injectée et répondre aux exigences du réseau. Ce modèle est donc un outil clé pour concevoir des stratégies de commande efficaces et précises.

4.6.Types de commande vectorielle

Dans le domaine de l'énergie éolienne, l'utilisation de la commande vectorielle pour les machines asynchrones à double alimentation (MADA) exige une grande réactivité et une excellente précision, notamment pour le contrôle du couple et de la vitesse. Pour y parvenir, il est essentiel de connaître de manière précise le vecteur du flux statorique, c'est-à-dire son amplitude et sa phase.

Deux approches principales ont été développées pour cela :

- La commande vectorielle directe
- La commande vectorielle indirecte

4.6.1. Commande vectorielle directe :

Dans cette méthode, le flux rotorique est estimé à l'aide de capteurs à effet Hall installés sous les dents du stator. Ces capteurs fournissent des mesures locales du flux magnétique, qu'il faut ensuite traiter pour obtenir une estimation globale du flux dans la machine. Bien que cette approche permette une mesure directe, elle souffre toutefois de limitations, notamment en termes de fiabilité des capteurs, ce qui peut impacter la précision du contrôle.

Soit :

- Problème de filtrage : les signaux mesurés sont souvent bruités, nécessitant des filtres complexes pour obtenir des valeurs fiables.
- Sensibilité à la température : les performances des capteurs varient avec les conditions thermiques, ce qui peut dégrader la précision des mesures.
- Coût élevé : l'utilisation de capteurs, de circuits de conditionnement, de filtres et d'équipements de traitement augmente significativement le coût de mise en œuvre. En

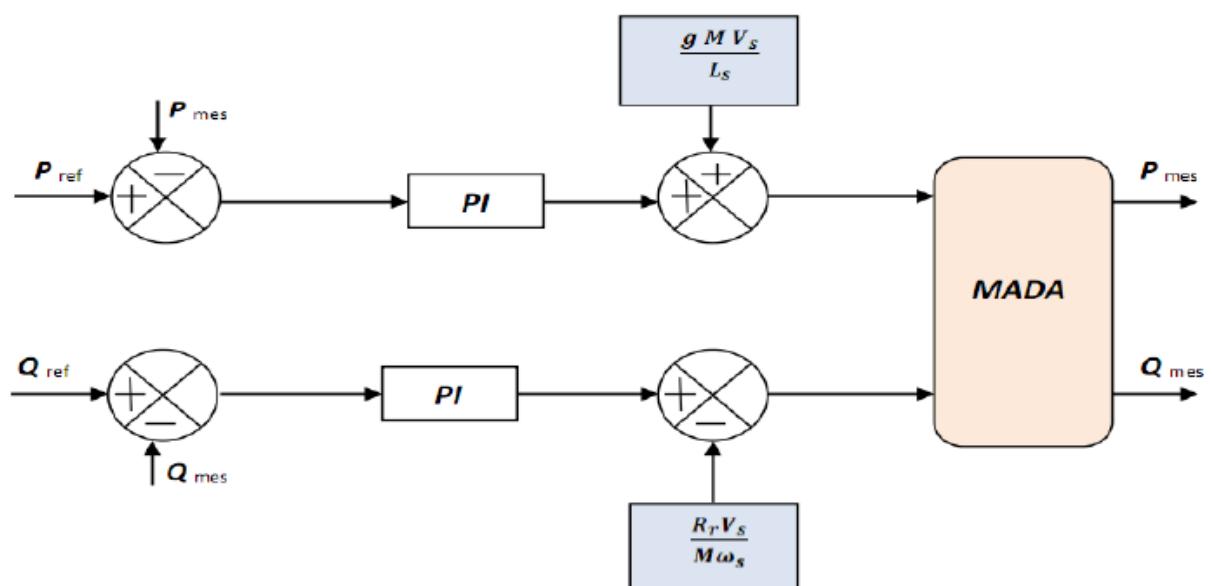


Figure III. 9 Schéma bloc de la commande directe de la Puissance active et réactive de la MADA

raison de ces limitations, cette approche est jugée peu optimale, surtout pour les systèmes où la fiabilité, la simplicité et la rentabilité sont essentielles.

4.6.2. Commande indirecte des puissances active et réactive

Les courants rotorique I_{qr} et I_{dr} sont respectivement les images de la puissance active statorique P_s et la puissance réactive statorique Q_s , doivent poursuivre leurs coutants de références.

Découplage par Compensation :

De l'équation (III.40), on peut voir que les équations de tension incluent deux termes de couplage entre l'axe d et l'axe q .

Nous devons présenter un système de découplage, en présentant les termes de compensation :

$$\begin{cases} V_{dr1} = R_r I_{dr} + \delta L_r \frac{dI_{dr}}{dt} \\ V_{qr1} = R_r I_{qr} + \delta L_r \frac{dI_{qr}}{dt} \end{cases} \quad (\text{III. 53})$$

$$\delta = 1 - \frac{M^2}{L_s L_r} \quad (\text{III. 54})$$

$$V_{dr1} = V_{dr} - e_{dr} \quad (\text{III. 55})$$

$$V_{qr1} = V_{qr} - e_{qr} - e_\phi \quad (\text{III. 56})$$

Le schéma bloc de la commande indirecte sans boucles de puissance du MADA, illustré à la figure (III.10), permet un contrôle indirect des puissances actives et réactive par le réglage des composantes directes (d) et en quadrature (q) du courant rotorique. Ce réglage est assuré par des régulateurs PI, dont les consignes sont déterminées directement à partir des valeurs des puissances souhaitées pour le fonctionnement du MADA

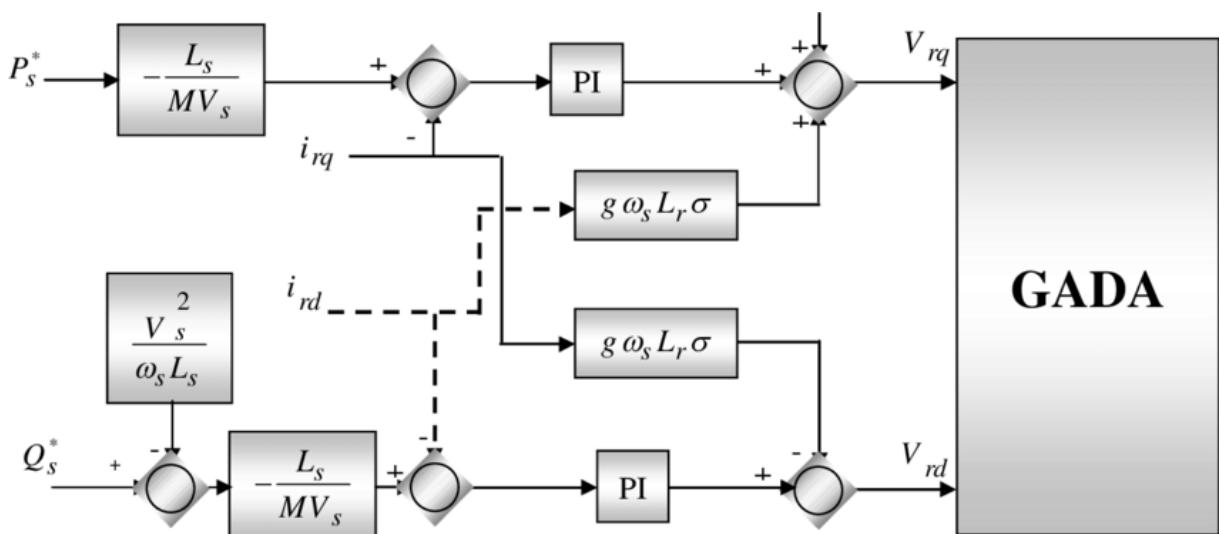


Figure III. 10 Schéma bloc de la commande indirecte sans boucle des Puissances du MADA

Synthèse des régulations des PI des courants :

Les fonctions de transfert des courants rotoriques directe et quadrature sont obtenues à partir de l'équation (III.55) et par l'annulation des termes de découplages par les termes de compensation :

$$\frac{I_{dr}}{V_{dr1}} = \frac{1}{R_r + \delta L_r p} \quad (\text{III.57})$$

$$\frac{I_{qr}}{V_{qr1}} = \frac{1}{R_r + \delta L_r p} \quad (\text{III.58})$$

Alors la boucle de régulation des courants I_{dr} et I_{qr} peut de présenter par le schéma bloc de la figure III. 11 :

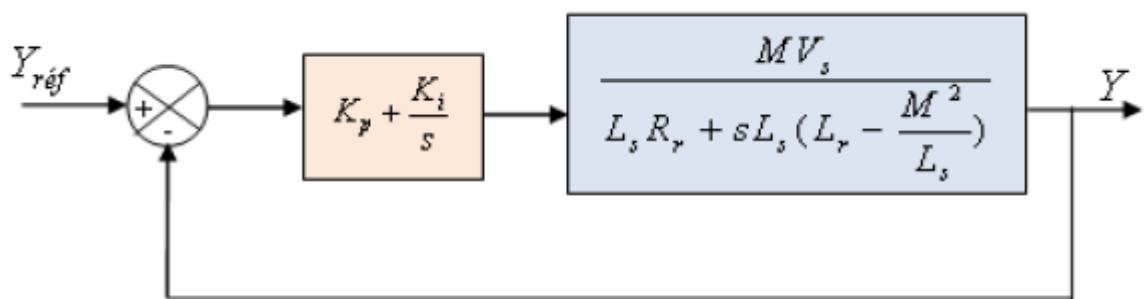


Figure III. 11 Schéma de régulation des courants I_{dr} et I_{qr}

Telle que $Y_{réf}$ c'est I_{dr_ref} et I_{qr_ref} ; Y c'est V_{dr1} et v_{qr1}

La forme du correcteur est la suivante :

$$C(P) = K_p + \frac{K_i}{P} \quad (\text{III.59})$$

On pose que $\frac{1}{R_r} = K$ et que $\frac{A}{R_r} = \tau$

$$H(P) = \frac{1}{R_r + AP} = \frac{1/R_r}{1 + \frac{A}{R_r} P} = \frac{K}{1 + \tau P} \quad (\text{III.60})$$

$$H(P) = \frac{K}{1 + \tau P} \quad (\text{III.61})$$

$$H_{bo}(P) = C(P) \cdot H(P) = \left(K_p + \frac{K_i}{P} \right) \cdot \left(\frac{K}{1 + \tau P} \right) \quad (\text{III.62})$$

$$H_{bo}(P) = \left(\frac{k_p/k_i P + K_i}{P} \right) \cdot \frac{K}{1 + \tau P} \quad (\text{III.63})$$

Nous choisissons la méthode de compensation de pôles avec le zéro pour la synthèse du régulateur afin d'éliminer le zéro de la fonction de transfert.

Si on pose :

$$\frac{K}{K_i} = \tau \quad (\text{III. 64})$$

Alors: $H_{bo}(P) = \frac{K_i K}{P} \quad (\text{III. 65})$

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$H_{bf}(P) = \frac{1}{1 + \frac{1}{K_i K} P} \quad (\text{III. 66})$$

Avec $\tau' = \frac{1}{K_i K} \quad (\text{III. 67})$

Le temps de réponse t_r du système bouclé pour atteindre 95% de la consigne vaut :

$$t_r = 3\tau' = 3 \cdot \frac{1}{K_i K} \quad (\text{III. 68})$$

On a: $K_i = \frac{K_p}{\tau} \quad (\text{III. 69})$

$$t_r = \frac{3\tau}{K_p K} \quad (\text{III. 70})$$

Alors:
$$\begin{cases} K_p = \frac{3\tau}{t_r K} \\ K_i = \frac{3}{t_r K} \end{cases} \quad (\text{III. 71})$$

5. Modélisation et commande de l'onduleur

Les convertisseurs statiques jouent aujourd'hui un rôle central dans de nombreuses applications. On les retrouve aussi bien dans les équipements domestiques que dans les systèmes de transport ferroviaire, urbain ou maritime, ainsi que dans divers secteurs industriels. Grâce aux avancées technologiques dans la conception des composants semi-conducteurs, notamment l'apparition des structures multiniveaux et de nouvelles topologies de convertisseurs, la tension de blocage de ces dispositifs dépasse désormais les 10 kV.

L'association série-parallèle des semi-conducteurs permet aux convertisseurs de générer à leur sortie des tensions dont les niveaux sont précisément ajustés selon les besoins de l'application.

Un exemple typique est l'onduleur de tension triphasé à deux niveaux, dont la structure générale est illustrée à la Figure (III.12). Chaque bras de l'onduleur comporte deux interrupteurs

à base d'IGBT, des composants bidirectionnels entièrement commandables aussi bien à l'ouverture qu'à la fermeture. Chaque IGBT est associé à une diode en antiparallèle, permettant ainsi la circulation du courant dans les deux directions.

On distingue deux principales configurations pour ce type d'onduleur : avec ou sans neutre raccordé. Dans la version avec neutre raccordé, le neutre de la charge est connecté au point milieu du bus continu de l'onduleur. Cette disposition permet le passage de courants homopolaires et autorise un contrôle indépendant des tensions sur chaque phase de la charge, comme s'il s'agissait de trois systèmes monophasés distincts. Ce type de configuration est particulièrement utilisé dans les applications nécessitant la compensation des composantes homopolaires.

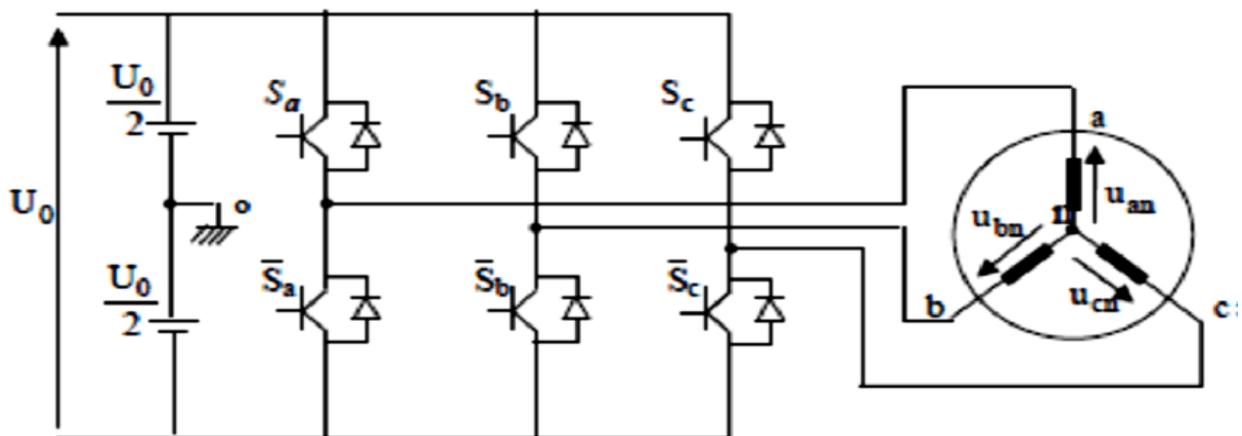


Figure III. 12 Schéma onduleur triphasé associé à 2 niveaux

Pour assurer la continuité des courants alternatifs dans la charge et éviter tout risque de court-circuit au niveau de la source, les interrupteurs de l'onduleur doivent être commandés de manière complémentaire. Les diodes de roue libre, quant à elles, jouent un rôle de protection en empêchant les surtensions sur les transistors. Avant de modéliser l'onduleur triphasé, certaines hypothèses simplificatrices sont adoptées afin de faciliter l'analyse :

- Les commutations des interrupteurs sont considérées comme instantanées ;
- Les interrupteurs sont supposés idéaux, c'est-à-dire sans chute de tension à leurs bornes lorsqu'ils sont conducteurs ;
- La charge est équilibrée, couplée en étoile, avec un neutre isolé.

Les Tensions composées

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{ab} = \mathbf{U}_{ao} - \mathbf{U}_{bo} \\ \mathbf{U}_{bc} = \mathbf{U}_{bo} - \mathbf{U}_{co} \\ \mathbf{U}_{ca} = \mathbf{U}_{co} - \mathbf{U}_{ao} \end{cases} \quad (\text{III. 72})$$

Les tensions d'entrée de l'onduleur ou tensions continues. Elles sont référencées par rapport à un point milieu o d'un diviseur fictif d'entrée. On peut écrire:

$$\begin{cases} \mathbf{U}_{ao} = \mathbf{U}_{an} - \mathbf{U}_{no} \\ \mathbf{U}_{bo} = \mathbf{U}_{bn} - \mathbf{U}_{no} \\ \mathbf{U}_{co} = \mathbf{U}_{cn} - \mathbf{U}_{no} \end{cases} \quad (\text{III. 73})$$

$\begin{cases} \mathbf{U}_{ao} \\ \mathbf{U}_{bo} \\ \mathbf{U}_{co} \end{cases}$: sont les tensions des phases de la charge (valeur alternative),

\mathbf{U}_{no} : Tension de neutre de la charge par rapport au point fictif «o».

Le système $\begin{cases} \mathbf{U}_{an} \\ \mathbf{U}_{bn} \\ \mathbf{U}_{cn} \end{cases}$ étant équilibré, il en découle :

$$\mathbf{U}_{an} + \mathbf{U}_{bn} + \mathbf{U}_{cn} = \mathbf{0} \quad (\text{III. 74})$$

La substitution de (III. 72) et (III. 73) aboutit à :

$$\mathbf{U}_{no} = \frac{1}{3}(\mathbf{U}_{ao} + \mathbf{U}_{bo} + \mathbf{U}_{co}) \quad (\text{III. 75})$$

La substitution de (III. 74) et (III. 75) aboutit à :

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_{an} &= \frac{2}{3}\mathbf{U}_{ao} - \frac{1}{3}\mathbf{U}_{bo} - \frac{1}{3}\mathbf{U}_{co} \\ \mathbf{U}_{bn} &= \frac{2}{3}\mathbf{U}_{bo} - \frac{1}{3}\mathbf{U}_{ao} - \frac{1}{3}\mathbf{U}_{co} \\ \mathbf{U}_{cn} &= \frac{2}{3}\mathbf{U}_{co} - \frac{1}{3}\mathbf{U}_{bo} - \frac{1}{3}\mathbf{U}_{ao} \end{aligned} \quad (\text{III. 76})$$

L'onduleur est commandé à l'aide de grandeurs logiques notées S_i (avec $i = a, b, c$). On appelle T_i et T'_i les transistors (considérés idéaux). Les règles de commutation sont les suivantes :

Si $S_i = 1$, alors T_i est passant et T'_i est bloqué.

Si $S_i = -1$, alors T_i est bloqué et T'_i est passant.

Ainsi, l'onduleur délivre en sortie deux niveaux de tension $-\frac{U_{DC}}{2}$ et $+\frac{U_{DC}}{2}$, selon l'état des interrupteurs.

La tension entre le point milieu et chaque phase (i.e. a, b, c) est donnée par :

$$\mathbf{U}_{i0} = S_i \frac{U_{DC}}{2} \quad (\text{III. 77})$$

Pour obtenir les tensions de sortie de l'onduleur en fonction de la tension continue, on utilise l'expression matricielle suivante (équation III.78) :

$$\begin{bmatrix} \mathbf{U}_{an} \\ \mathbf{U}_{bn} \\ \mathbf{U}_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_{DC}}{6} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{III. 78})$$

5.1. Commande MLI de l'onduleur

La commande MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) constitue une pierre angulaire de l'électronique de puissance moderne, permettant de piloter avec précision les convertisseurs statiques tels que les onduleurs. Cette technique, qui repose sur la génération de signaux modulés en largeur d'impulsion, offre un contrôle fin de la tension et du courant délivrés à une charge, tout en optimisant l'efficacité énergétique. La variante sinus-triangle de la MLI se distingue par son approche analogique intuitive, comparant une onde de référence sinusoïdale à une porteuse triangulaire pour produire des séquences de commutation précises [8].

5.2. Technique MLI sinus triangle

La MLI consiste à varier le rapport cyclique d'un signal carré périodique pour ajuster la valeur moyenne de la tension ou du courant délivré. Dans le contexte des onduleurs, cette technique permet de convertir une tension continue en une tension alternative de forme contrôlée. Le principe opérationnel repose sur la comparaison entre deux signaux :

- Un **signal modulant** de basse fréquence (généralement sinusoïdal) représentant la forme d'onde souhaitée
- Un **signal porteur** haute fréquence (triangulaire ou en dents de scie) déterminant la fréquence de découpage

Lorsque l'amplitude instantanée du signal modulant dépasse celle du porteur, les interrupteurs de l'onduleur sont activés, générant des impulsions de tension dont la largeur varie proportionnellement à l'amplitude du signal de référence.

➤ Caractéristique de la MLI

$$\mathbf{m}_c = \frac{f_c}{f_r} \quad (\text{III. 79})$$

$$\mathbf{r} = \frac{V_r}{V_p} \quad (\text{III. 80})$$

Avec :

m_c : L'indice de modulation qui définit le rapport entre la fréquence f_p de la porteuse et la fréquence f_r de la référence.

r : Le taux de modulation (ou coefficient de réglage) qui donne le rapport de l'amplitude de la modulante V_r à la valeur crête V_p de la porteuse.

Dans une branche d'onduleur, un interrupteur statique (k) peut prendre la valeur +1 ou -1 selon les conditions suivantes :

$$V_{aref} > V_p \Rightarrow S_a = 1 \text{ sinon } S_a = -1$$

$$V_{bref} > V_p \Rightarrow S_b = 1 \text{ sinon } S_b = -1$$

$$V_{\text{ref}} > V_p \Rightarrow S_c = 1 \text{ sinon } S_c = -1$$

Avec :

V_{ref} : Amplitude de référence.

V_p : Amplitude de porteuse.

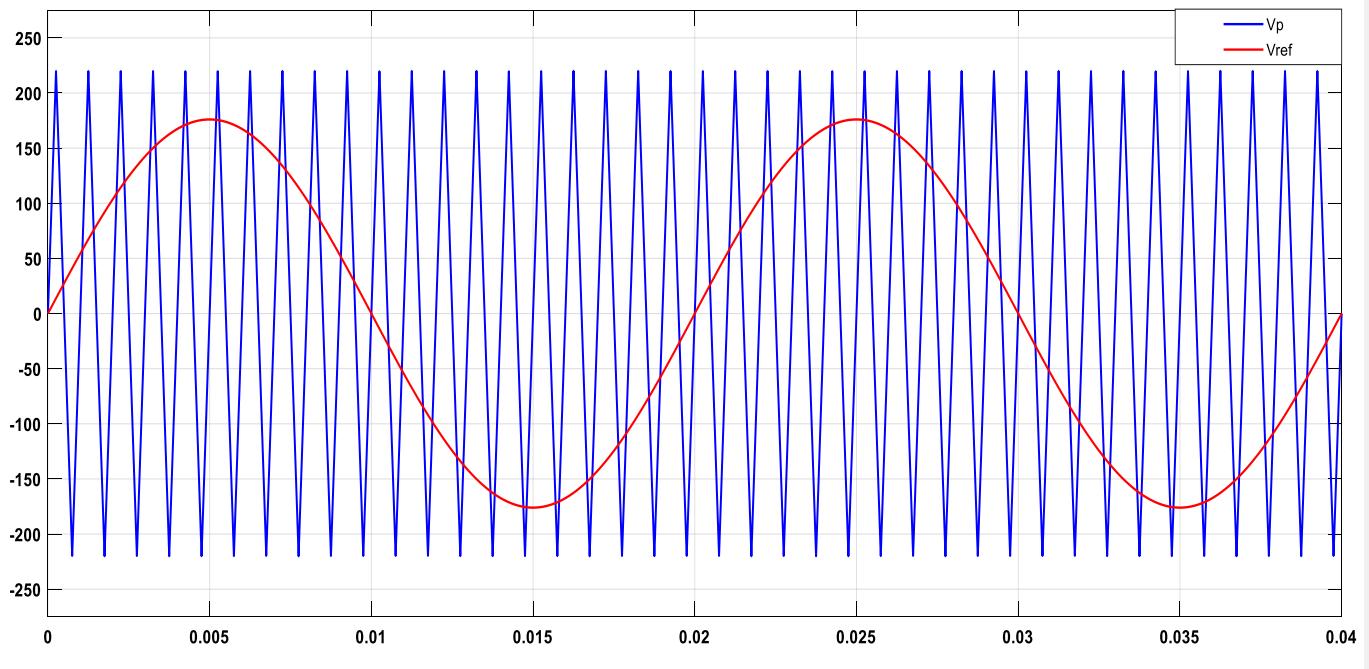


Figure III. 13 Schéma de principe de la commande MLI

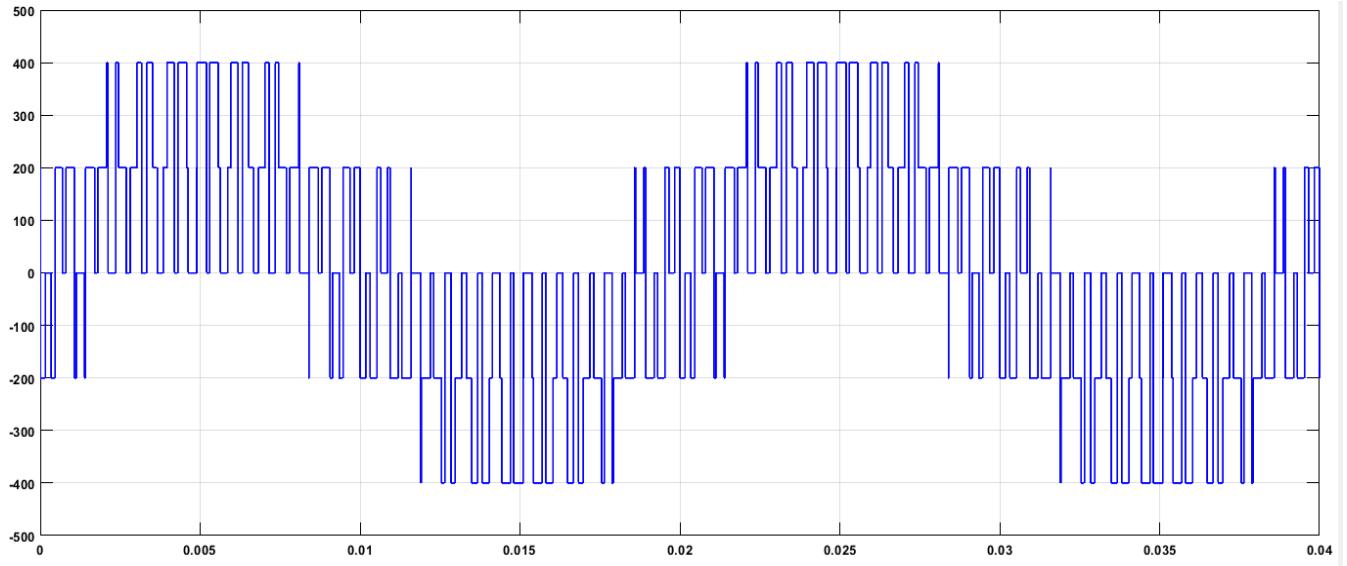


Figure III. 14 la tension générée par un onduleur de 2 niveaux

6. Résultats de simulation

On a modélisé avec le logiciel Matlab la machine asynchrone à double alimentation avec la commande vectorielle et on a lié la machine avec la turbine éolienne qu'on a utilisé dans la simulation précédente ,et en utilisant la méthode de commande sans asservissement pour le premier cas et avec asservissement de la vitesse mécanique (Réseau de neurone) dans le deuxième cas. afin de comparer les résultats des deux cas . et voici la simulation dans la figure suivante :

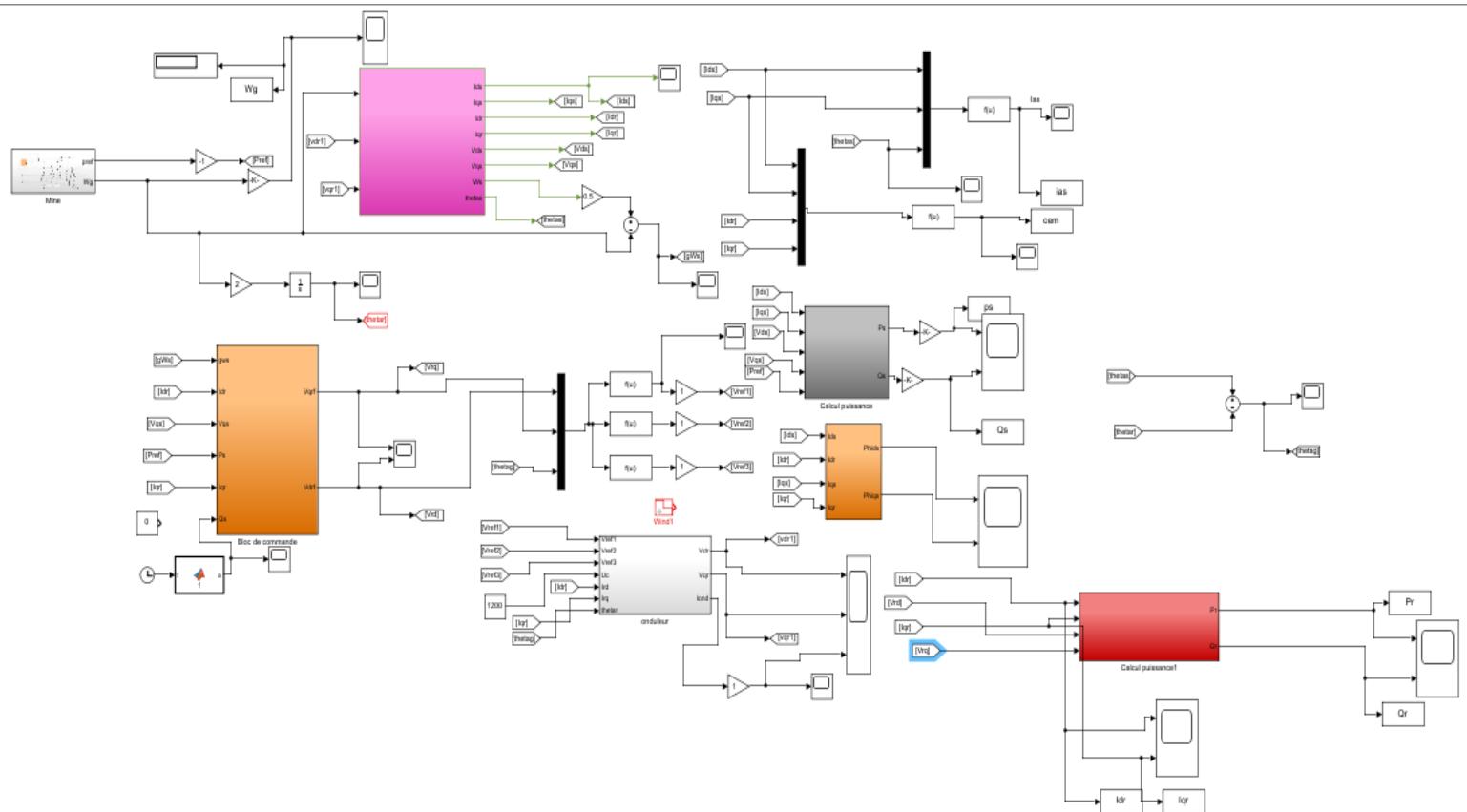
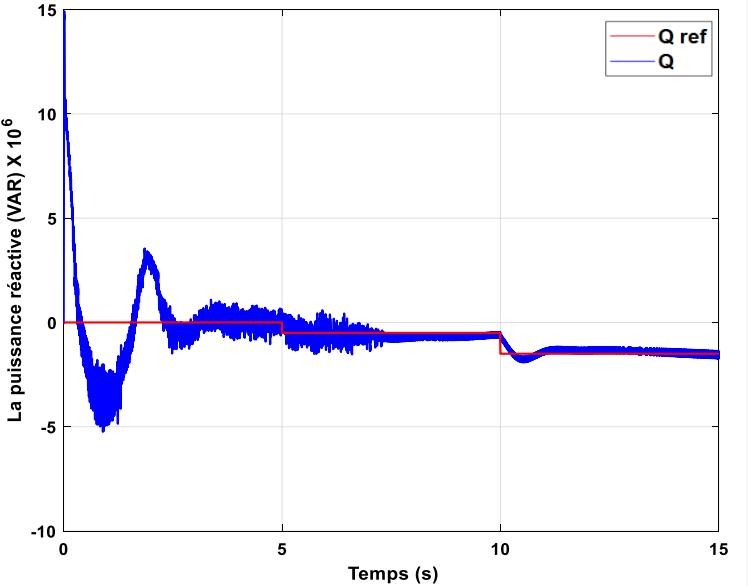
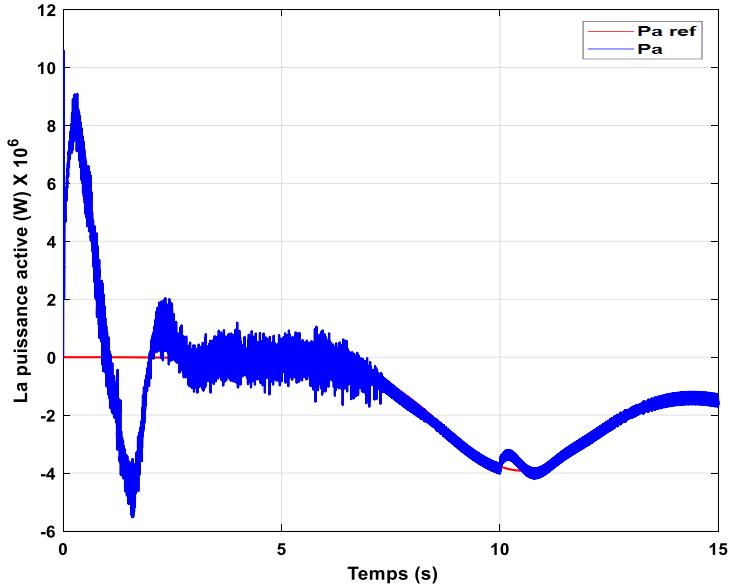
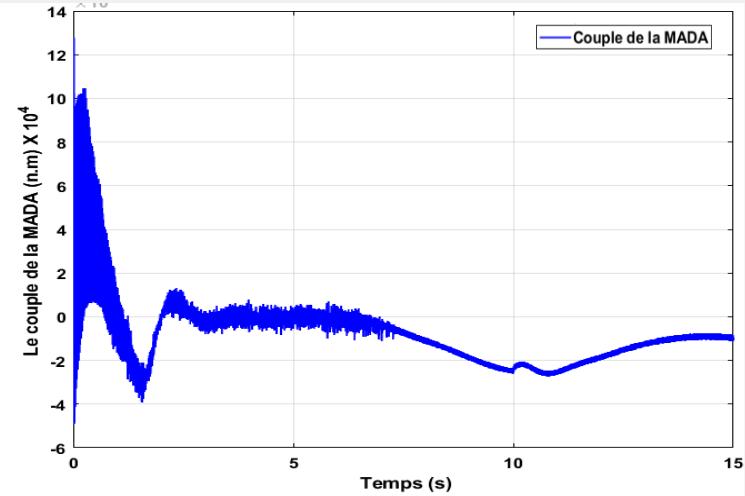
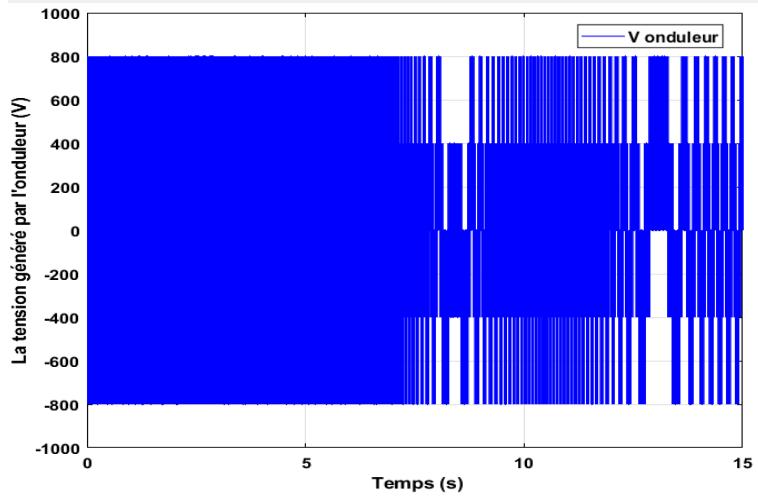
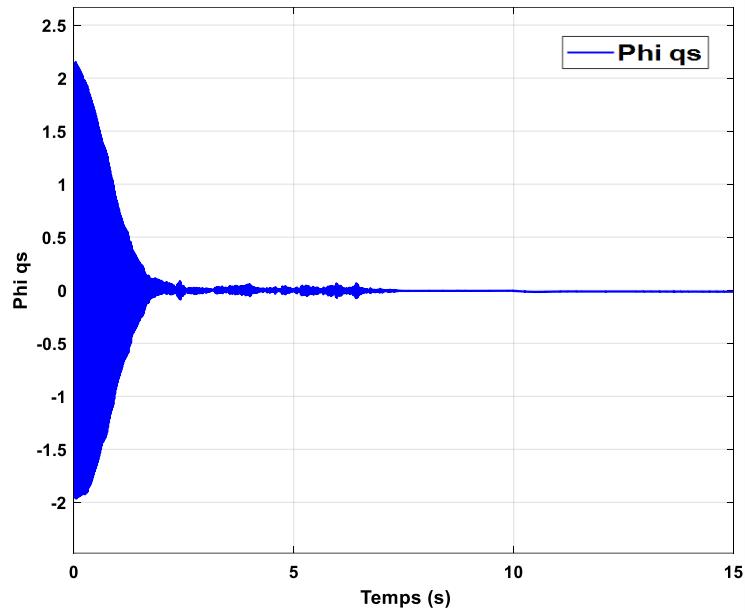
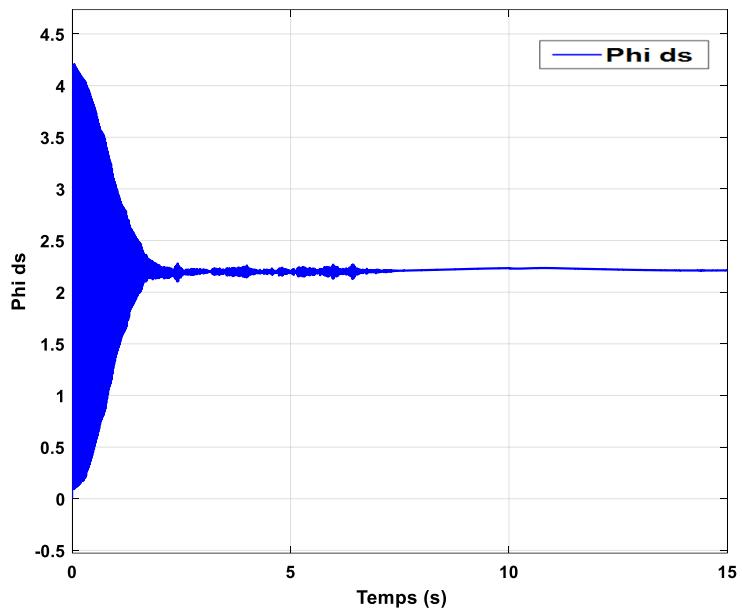
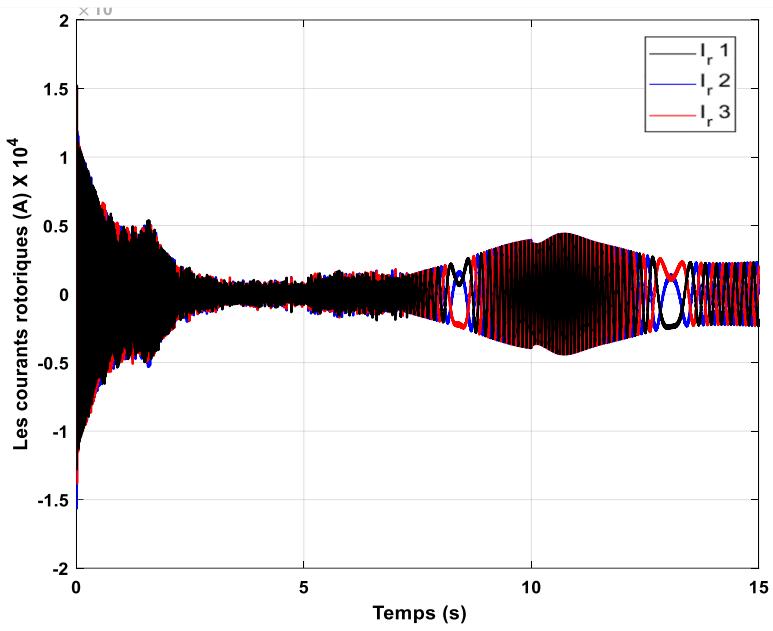
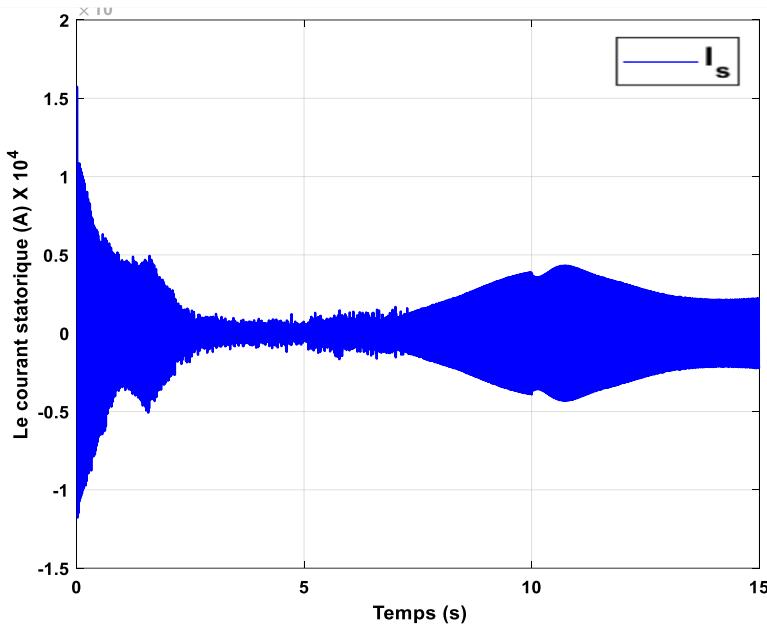


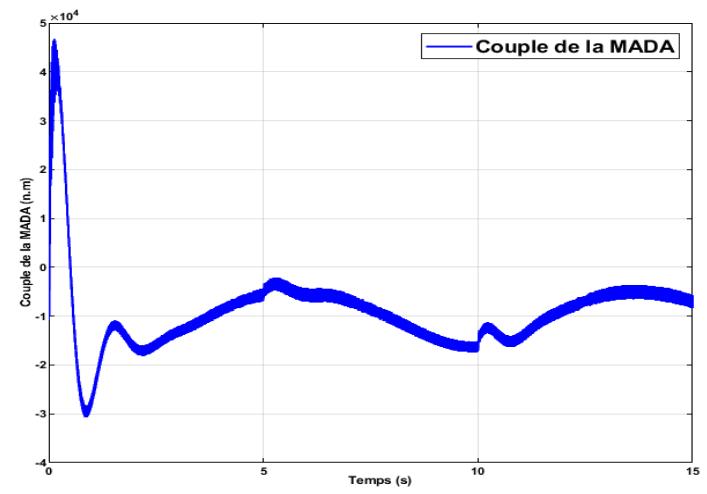
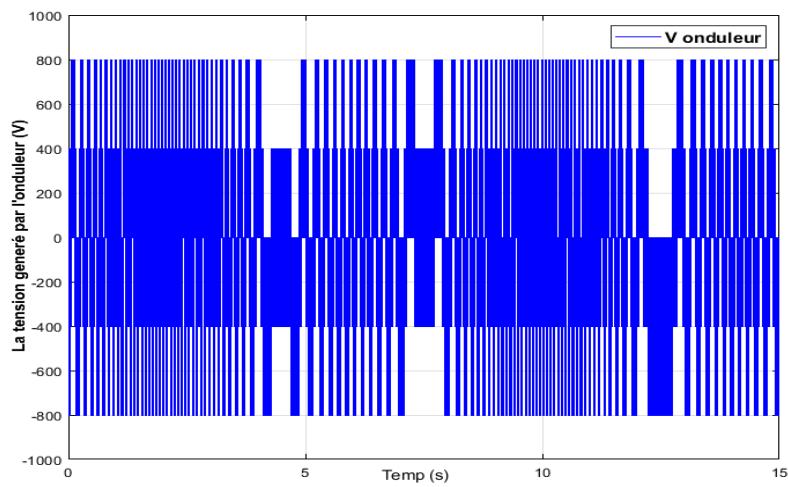
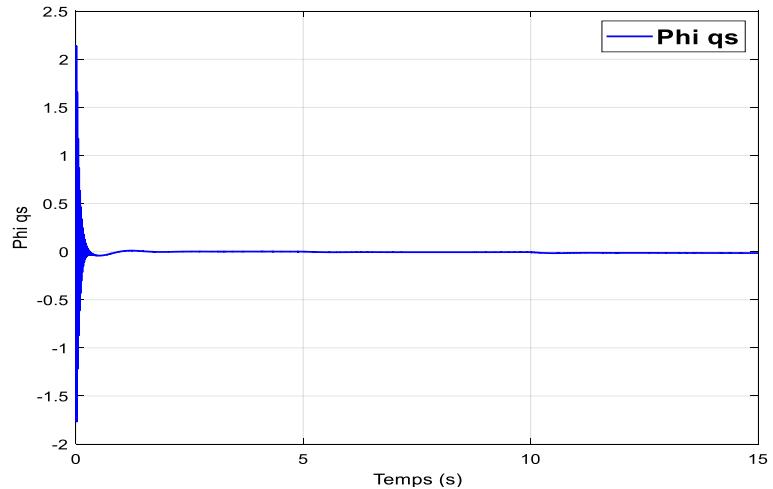
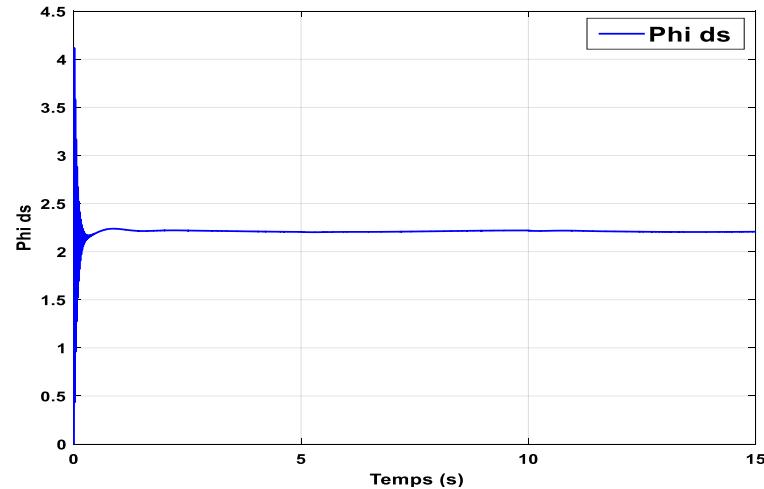
Figure III. 15 Bloc de simulation MADA + turbine éolienne (Système complet)

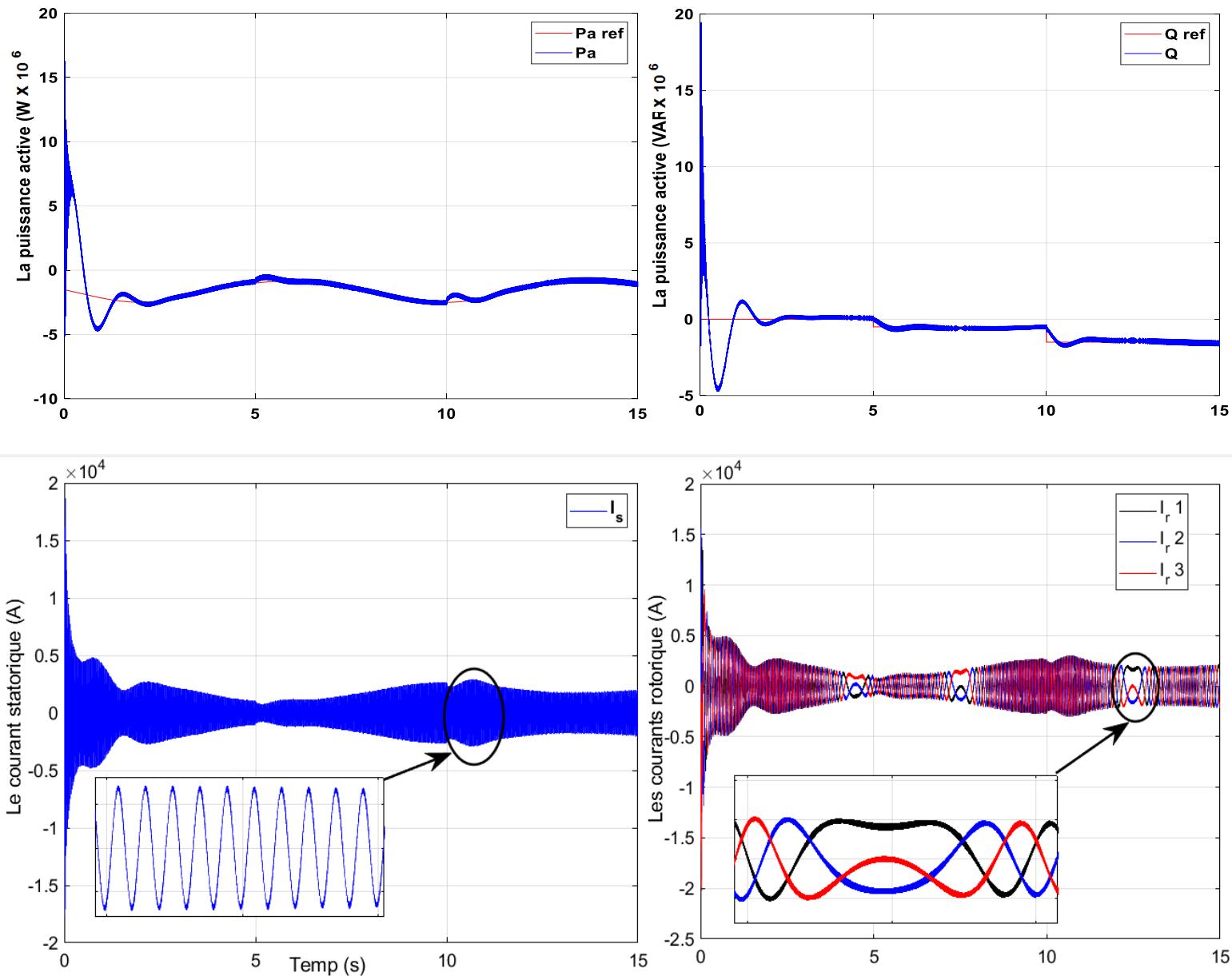
6.1.Les résultats de la simulation pour le cas sans asservissement de la vitesse mécanique au niveau de la turbine éolienne





6.2. Les résultats de la simulation pour le cas avec asservissement de la vitesse mécanique au niveau de la turbine éolienne (Réseau de neurone)





6.3. Interprétation des résultats

Les résultats montrent que les courants statoriques et rotoriques sont nettement plus stables avec l'introduction du réseau de neurones. Le régime transitoire est réduit et les oscillations sont fortement atténuées. Cela indique un fonctionnement plus régulier de la machine, même en présence de perturbations ou de variations de charge. Le comportement des flux ϕ_{ds} et ϕ_{qs} confirme le bon découplage assuré par la commande vectorielle dans les deux cas. Toutefois, en présence d'un asservissement neuronal, leur convergence est plus rapide et moins perturbée. De plus, le couple électromagnétique devient plus fluide et présente moins de variations brusques, ce qui renforce la stabilité mécanique de l'ensemble turbine-génératrice.

Les signaux de tension issus de l'onduleur sont plus cohérents et mieux organisés temporellement avec l'asservissement. Cela indique que le système suit plus efficacement les

consignes, avec un effort de commutation mieux distribué dans le temps, ce qui pourrait aussi contribuer à une réduction du stress sur l'électronique de puissance.

L'utilisation d'un réseau de neurones pour l'asservissement de la vitesse rotorique offre une capacité d'adaptation supérieure aux méthodes classiques. Il permet d'anticiper les variations du système et d'y répondre rapidement, sans nécessiter de modélisation exacte du comportement dynamique. Cette intelligence artificielle améliore la robustesse et optimise la régulation énergétique.

7. Conclusion

Ce chapitre a permis d'exposer en détail la structure de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), retenue pour son adéquation avec les systèmes de conversion éolienne. Ce choix s'appuie sur ses nombreux atouts, notamment la réduction des coûts d'exploitation, l'amélioration significative du rendement énergétique, ainsi qu'une grande flexibilité de commande due à la possibilité d'agir indépendamment sur les circuits statorique et rotorique.

Après avoir développé le modèle mathématique de la machine dans le repère d'axe direct et d'axe quadrature, une stratégie de commande linéaire a été adoptée. Celle-ci repose sur l'asservissement indépendant des puissances active et réactive statoriques, via une commande vectorielle orientée selon le flux statorique. Ce choix permet un découplage efficace des variables de commande, rendant le système plus réactif et performant en régime transitoire comme en régime permanent.

Par ailleurs, l'onduleur à modulation de largeur d'impulsion (MLI) a été modélisé afin d'assurer un couplage optimal avec le rotor de la génératrice. Cette modélisation est essentielle pour garantir une commande précise du flux rotorique injecté, condition sine qua non pour le bon fonctionnement de la MADA en mode générateur.

Conclusion générale

Dans un contexte mondial marqué par une prise de conscience accrue des enjeux environnementaux, le développement des énergies propres et durables s'impose aujourd'hui comme une priorité stratégique. À l'instar de nombreux pays, l'Algérie manifeste un intérêt croissant pour ces sources d'énergie renouvelables, notamment pour la filière éolienne, qui connaît un essor notable sous l'impulsion de la recherche scientifique et des innovations technologiques.

Ce mémoire s'inscrit dans cette dynamique. Il propose, dans un premier temps, un aperçu général des systèmes éoliens et de leurs domaines d'application. Ensuite, il s'attache à présenter les différents types de conversions électromagnétiques envisageables, avant d'aborder la modélisation et la simulation du système étudié.

Le premier chapitre est consacré à une introduction aux énergies renouvelables de manière générale, puis à l'énergie éolienne en particulier. Y sont traités l'historique, les différentes typologies d'éoliennes, leur constitution, ainsi que leur principe de fonctionnement. Par ailleurs, une attention particulière est portée aux génératrices et aux convertisseurs utilisés dans les systèmes à vitesse fixe et à vitesse variable.

Le deuxième chapitre s'attarde sur le principe de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, en introduisant l'équation de la puissance du vent, le coefficient de puissance C_p , ainsi que la loi de Betz. L'effet de la variation de l'angle de calage β sur le rendement de l'éolienne est également analysé. La modélisation mathématique de la turbine est ensuite développée, en incluant l'équation dynamique de l'arbre de transmission. Enfin, ce chapitre se conclut par l'étude des méthodes et stratégies de maximisation de la puissance extraite.

Le troisième chapitre est dédié à la modélisation et à la commande de la machine asynchrone à double alimentation (MADA), couplée à une turbine à calage variable. Cette structure permet à la fois la maximisation de la puissance récupérée et sa limitation en fonction des conditions d'exploitation. En prenant en compte un ensemble d'hypothèses simplificatrices, un modèle mathématique réduit de la MADA a été établi. Pour permettre un contrôle indépendant des puissances active et réactive injectées au réseau, une commande vectorielle a été mise en œuvre. Celle-ci repose sur l'orientation du flux statorique, en exprimant les grandeurs statoriques en fonction des grandeurs rotoriques, ce qui permet un pilotage efficace via le rotor. Les performances de cette stratégie ont été validées par des simulations, confirmant la pertinence du modèle et de la commande retenue.

En conclusion, ce travail de recherche, bien que modeste, met en évidence les avantages d'un système de conversion basé sur une machine asynchrone à double alimentation. Ce type de système offre une double fonctionnalité : il contribue à la réduction des harmoniques dans le réseau électrique tout en permettant un contrôle indépendant des puissances active et réactive. De surcroît, sa capacité à fonctionner à vitesse variable avec des convertisseurs de dimension réduite constitue un atout majeur pour les systèmes de forte puissance.

Conclusion générale

Enfin, il convient de souligner que le domaine de la production décentralisée demeure vaste et complexe. Faute de temps, certains aspects n'ont pu être traités dans le cadre de ce mémoire, ouvrant ainsi la voie à de nombreuses perspectives d'amélioration et de recherche future.

Annexe

Les paramètres électrique et mécanique utilisés dans le système éolien qu'on a étudié sont comme le suivant :

Caractéristiques techniques d'éolienne :

Coefficient maximal de puissance : $C_{p_{\max}} = 0,475$

Vitesse spécifique optimale : $\lambda_{\text{opt}} = 8,1$

Moment d'inertie : $J_t = 148,4 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Longueur de la pale : $R = 45 \text{ m}$

Gain du multiplicateur de vitesse : $G = 95$

Densité d'air : $\rho = 1,225 \text{ kg/m}^3$

Nombre de pales : 3

Vitesse du vent nominale : $V_n = 11 \text{ m/s}$

Paramètres de la MADA :

Puissance nominale : 3 MW

Tension statorique et rotorique : $U_s = U_r = 690 \text{ V}$

Fréquence d'alimentation : 50 Hz

Résistance statorique : $R_s = 2,97 \text{ m}\Omega$

Résistance rotorique : $R_r = 3,82 \text{ m}\Omega$

Inductance cyclique statorique : $L_{\sigma s} = 121 \mu\text{H}$

Inductance cyclique rotorique : $L_{\sigma r} = 57,3 \mu\text{H}$

Inductance cyclique mutuelle : $L_m = 12,12 \text{ mH}$

Nombre de paires de pôles : $p = 2$

Moment d'inertie : $J_g = 21 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$

Convertisseur

Type de convertisseur : IGBT à modulation de fréquence

Fréquence de commutation: 2 kHz

Tension du bus continu: 1200 V

Réseau électrique

Tension : $U = 690 \text{ V}$

Fréquence : 50 Hz

Bibliographie

- [1] Renewables 2022 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat.
- [2] Renewable Capacity Statistics 2023. International Renewable Energy Agency.
- [3] Hau, E. (2013). Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics. Springer.
- [4] Ackermann, T. (2005). Wind Power in Power Systems. Wiley
- [5] Wood, D. (2011). Small Wind Turbines: Analysis, Design, and Application. Springer.
- [6] Burton, T., Jenkins, N., Sharpe, D., & Bossanyi, E. (2011). Wind Energy Handbook (2nd ed.). Wiley.
- [7] Livre : "Advances in Renewable Energies and Power Technologies Volume 1 Solar and Wind Energies"Imen yahyaoui
- [8] Livre : "Power Electronics for Renewable Energy Systems, Transportation and Industrial Applications"Haitham Abu-Rub | Mariusz Malinowski | Kamal Al-Haddad
- [9] Livre : "Renewable Energy Resources"John Twidell and Tony Weir (Third Edition)
- [10] WIND ENERGY EXPLAINED Theory, Design and Application Second Edition J. F. Manwell and J. G. McGowan Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Massachusetts,
- [11] Production d energie electrique partir des sources renouvelables Benoit reobins,Arnaud davigny,brunos francois
- [12] Shockley, W., & Queisser, H. J. (1961). Detailed Balance Limit of Efficiency of p-n Junction Solar Cells. *Journal of Applied Physics*, 32(3), 510-519.
- [13] NREL. (2023). PV Degradation Rates: An Analytical Review. National Renewable Energy Laboratory.
- [14] IRENA. (2023). Future of Solar Photovoltaic. International Renewable Energy Agency.
- [15] REN21. (2022). Renewables Global Status Report.
- [16] IRENA. (2021). Geothermal Energy: Technology Brief. International Renewable Energy Agency.
- [17] Muyeen, S. M. (2011). Wind Energy Conversion Systems: Technology and Trends. Springer.
- [18] Manwell, J. F., McGowan, J. G., & Rogers, A. L. (2010). Wind Energy Explained: Theory, Design and Application. Wiley.
- [19] Peña, A., Hasager, C. B., & Gryning, S. E. (2009). Remote sensing for wind energy. Risø National Laboratory.
- [20] Gipe, P. (2004). Wind Power: Renewable Energy for Home, Farm, and Business. Chelsea Green Publishing.
- [21] Sovacool, B. K. (2009). *Contextualizing the costs and benefits of wind power*. *Energy Policy*, 37(11), 4492–4499.
- [22] Fitzgerald, A. E., Kingsley, C., & Umans, S. D. (2003). *Electric Machinery* (6th ed.). McGraw-Hill.
- [23] Iqbal, A., & Ahmed, N. (2010). *Performance Analysis of Induction Motor Drive with VVVF Control*. IEEE Conference.
- [24] Hanselman, D. C. (2006). *Brushless Permanent Magnet Motor Design*. McGraw-Hill.

- [25] Bruyerre, P. (2020). *La Puissance du vent. Des moulins à vent aux éoliennes modernes.* Presses universitaires du Midi
- [26] Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* Wiley, 2009 (2nd Edition)
- [27] Manwell, J.F., McGowan, J.G., Rogers, A.L *Wind Energy Explained: Theory, Design and Application* Wiley, 2009.
- [28] Betz, A *Wind Energy and its Application to Windmills*, 1966.
- [29] Harris, R., & Wood, D. *Wind Turbine Operation and Control for Safe Performance*, international Journal of Renewable Energy Engineering, 2020.
- [30] J.F. MANWELL ,J.G. MCGOWAN WIND ENERGY EXPLAINED THEORY, DESIGN AND APPLICATION SECOND EDITION
- [31] "Wind Energy Handbook" par Tony Burton, David Sharpe, Nick Jenkins et Ervin Bossanyi
- [32] Intelligent Control for Doubly Fed Induction Generator Connected to the Electrical Network Anass Bakouri, Hassane Mahmoudi, Ahmed Abbou Department of Electrical Engineering, Mohammed V University, Mohammadia School of Engineers Rabat, Morocco
- [33] <https://fr.blog.businessdecision.com/tutoriel-machine-learning-comprendre-ce-que-un-reseau-de-neurones-et-en-creer-un/>
- [34] <https://www.math.univ-toulouse.fr/~besse/Wikistat/pdf/st-m-app-rn.pdf>
- [35] <https://www.cea.fr/multimedia/documents/infographies/reseaux-neurones.pdf>
- [36] EDITION UNIVERSITAIRE EUROPEENNES koudria mouhamed abdljebbar Commande floue de la machine asynchrone à double alimentation
- [37] ÉDITIONS UNIVERSITAIRES EUROPÉENNES Abdeslam Jabal ,Laafou Abdessalam, Ait Madi ,Modélisation et contrôle robuste d'une éolienne à base de la MADA
- [38] Krause, P. C., Wasynczuk, O., & Sudhoff, S. D.
"Analysis of Electric Machinery and Drive Systems", 2nd Edition, Wiley-IEEE Press, 2002.
- [39] Modelisation et simulation des machine electrique RACHID ABDESEMED