الجمهورية الجزائرية الديموقراطية الشعبية

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج

Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Electrotechnique

Spécialité : Energie renouvelable

Par : **Bendaoud Abdelghani**

Messaoudi Adem

Sujet

Modélisation et Commande d'une chaine de conversion éolienne à base de génératrice synchrone à aimants permanents

Soutenu publiquement, le 28 / 06 / 2026, devant le jury composé de :

M. Choudar Adel	MCB	**Univ-BBA**	Président
M. Meghlaoui Issam	MCA	**Univ-BBA**	Examinateur
Mme. Bouguerra Zahira	MCB	**Univ-BBA**	Encadrant

Année Universitaire 2025/2026

Remerciement

Nos sincères remerciements à Dieu le tout puissant pour le courage, la force, la volonté, la persévérance, et la santé qu'il nous a donné afin de réaliser ce mémoire.

Nous tenons à remercier du fond du cœur nos parents qui ont su nous donner une bonne éducation qui nous ont permis d'arriver à ce stade d'études.

Comme nous remercions notre promotrice, Madame **Z. Bouguerra** pour son encadrement, sa disponibilité, son soutien et ses exigences.

Nous tenons à remercier les membres du jury d'avoir accepté de lire et évaluer le travail.

Enfin, nous remercions tous ceux et celles qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Dédicace

A nos familles

Pour votre affection dont vous nous avez toujours comblé, pour l'éducation, les abnégations et les sacrifices infinis que vous n'avez cessé de consentir pour nous.

Pour votre soutien inlassable et vos encouragements le long de notre cursus estudiantin et professionnel. Les mots sont insuffisants pour exprimer combien grande est l'affection que nous vous portons.

Ce simple document ne saurait exprimer notre reconnaissance.

A nos collègues

Aucune dédicace ne saurait exprimer notre gratitude et notre estime. Nous ne pourrions vous remercier pour votre soutien dans les moments difficiles. Puissiez-vous trouver ici l'expression de notre grande reconnaissance.

A nos amis

Avec toute notre affection fraternelle et en hommage des souvenirs qu'on partage. Que vous trouvez ici l'expression de notre amour et fraternité.

A tous ceux qui nous sont chers.

Table des matières

Introduction générale 1

Chapitre I : Généralité sur les Énergies Renouvelables

I. 1 Introduction 3
I.2 Les énergies renouvelables dans le monde 3
I.3 Développement des énergies renouvelables en Algérie 4
I.4 Application des énergies renouvelables 5
I.5 Énergie photovoltaïque (PV) 6
I.5.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque 6
I.5.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque 6
I.6 Énergie Éolienne 7
I.6.1 Avantages de l'énergie éolienne 7
I.6.2 Inconvénients de l'énergie éolienne 8
I.7 Énergie Hydraulique 8
I.7.1 Avantages de l'énergie hydraulique 9
I.7.2 Inconvénients de l'énergie hydraulique 9
I.8 Énergie Biomasse 9
I.8.1 Avantages de l'énergie biomasse 10
I.8.2 Inconvénients de l'énergie biomasse 10
I.9 Énergie Géothermique 10
I.9.1 Avantages de l'énergie géothermique 11
I.11 Conclusion 12

Chapitre II : État de l'art des Systèmes Éoliens

II.1 Introduction 13
II.2 Historique 13
II.3 Les types des éoliennes 14
II.3.1 Eolienne à axe vertical 14

II.3.1.1 Avantages des éolienne à axe vertical 15
II.3.1.2 Inconvénients des éolienne à axe vertical 15
II.3.2 Eolienne à axe horizontal 16
II.3.2.1 Avantages des éolienne à axe horizontal 16
II.3.2.2 Inconvénients des éolienne à axe horizontal 16
II.4 Définition d'un aérogénérateur à axe horizontal 17
II.5.1 Énergie éolienne terrestre(onshore) 17
II.5.2 Éolienne maritime (offshore) 18
II.5.3 La différence Énergie éolienne terrestre(onshore) et maritime (offshore) 19
II.5.4 hybrides maritime (offshore) (OHA) 19
II.5.5 Les éolien domestique 19
II.5.5.1 Avantages des éoliens domestiques 20
II.5.5.2 Inconvénients des éoliens domestiques 20
II.6 Constituants de l'éolienne 21
II.6.1 Zones de fonctionnement d'une éolienne 23
II.7 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne 24
II.8 les chaine de conversion 25
II.8.1.1 Générateur à induction à cage d'écureuil avec réducteur à trois étages (GACE-R3E) 25
II.8.1.1.2 Avantages de générateur à induction à cage d'écureuil avec réducteur à trois étages 26
II.8.1.1.3 Inconvénients de générateur à induction à cage d'écureuil avec réducteur à trois étages 26
II.8.1.2 Générateurs à induction à double alimentation avec réducteur à un étage et à trois étages (GADA-R1E et GADA-R3E) 26
II.8.1.2.1 Avantages de générateurs à induction à double alimentation avec réducteur à un étage et à trois étages 27
II.8.1.2.2 Inconvénients de générateurs à induction à double alimentation avec réducteur à un étage et à trois étages 28
II.8.1.3 Le système SCEE à entraînement direct avec un générateur synchrone à excitation électrique (ED-GSEE) 28
II.8.1.3.1 Avantages de système SCEE à entraînement direct avec un générateur synchrone à excitation électrique 29
II.8.1.3.2 Inconvénients de système SCEE à entraînement direct avec un générateur synchrone à excitation électrique 29

II.8.1.4 Le générateur à aimants permanents à réducteur à un étage et le générateur à aimants permanents à entraînement direct (R1E-GSAP et ED-GSAP) 29
II.8.1.4.1 Avantages de générateur à aimants permanents à réducteur à un étage et le générateur à aimants permanents à entraînement direct 31
II.8.1.4.2 Inconvénients de générateur à aimants permanents à réducteur à un étage et le générateur à aimants permanents à entraînement direct 31
II.9: Conclusion 32

Chapitre III : Modélisation et simulation d'une chaine de conversion éolienne

III.1 Introduction 33
III.2 Energie cinetique du vent 33
III.2.1 Loi de BETZ 34
III.2.2 Model de multiplicateur 36
III.2.3 Equation dynamique de l'arbre de transmission 37
III.3 Méthode de recherche du point maximum de puissance 38
III.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) 39
III.4.1 Eolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) Connectée au réseau électrique 40
III.4.2 Modélisation de la GSAP 40
III.4.3 Equations électriques 41
III.4.4 Equation magnétiques 41
III.4.5 Equation mécanique 42
III.5 Equations électriques et magnétiques de la GSAP dans le repère de Park 42
III.5.1 Equations électriques 43
III.5.2 Equations magnétiques 43
III.5.3 Expression du couple électromagnétique 43
III .6 La Stratégie P&O 44
III .7 Modélisation de DC/DC boost converter 46
III .8 La commande M.L.I 47
III .9 Redresseur à diode 48
III .10 Modélisation de l'onduleur triphasé 49
III .11 Modélisation du réseau électrique 50

III.12 Modélisation du filtre (RL) 51
III.13 Boucle à verrouillage de phase PLL 51
III.14 Système global de simulation 52
III.15 Résultats de Simulation 55
III. 16 Conclusion 66
Conclusion générale 67

List des figures

Chapitre I : Généralité sur les Énergies Renouvelables

Figure I.1: Contribution des énergies renouvelables à la production de d'électricité 4
Figure I.2 : carte de l'irradiation horizontale globale periode 1994-2018..... 5
Figure I.3: Atlas de la vitesse moyenne du vent. Période 2004-2009 5
Figure I.4: Panneaux photovoltaïque..... 6
Figure I.5: éolienne..... 7
Figure I.6: centrale hydraulique 8
Figure I.7: centrale biomasse. 9
Figure I.8: centrale géothermie 11

Chapitre II : L'État de l'art des Systèmes Éoliens

Figure II.1: Les différentes formes d'éoliennes pouvant être conçues en utilisant le principe de Fonctionnement de Darrieux**.**..... 14
Figure II.2: Les différentes formes d'éoliennes Darrieus. 15
Figure II.3: Les différentes formes d'éoliennes à axe vertical..... 15
Figure II.4: l'éoliennes terrestre (onshore). 17
Figure II.5: l'éoliennes maritime (offshore). 18
Figure II.6: L'éolien terrestre (onshore) et maritime (offshore)..... 19
Figure II.7: les éoliens domestiques. 20
Figure II.8: Constitution d'une éolienne tripale 21
Figure II.9: Zones de fonctionnement d'une éolienne 23
Figure II.10: Structure d'un système SCEE à vitesse constante équipé d'un réducteur à trois étages GACE 26
Figure II.11: Configuration of wind energy harvesting system 27
Figure II.12: Structure d'un système de captage d'énergie éolienne sans engrenage équipé d'un GSEE et d'un convertisseur à pleine charge 29

Figure II. 13 : Configuration d'un système de production d'énergie éolienne équipé d'un générateur à aimants permanents (GSAP). 31

Chapitre III : Modélisation et simulation d'une chaine de conversion éolienne

Figure III.1: Schéma de principe d'un système de conversion de l'énergie éolienne 33
Figure III.2: théorie de Betz : schéma de principe 34
Figure III.3: Coefficient de puissance Cp. 35
Figure III.4: Schéma de la turbine éolienne [6]. 36
Figure III.5: Caractéristique de l'éolienne par à port à la vitesse du vent 38
Figure III.6: Différents types de rotors d'une MSAP [13] 39
Figure III.7: Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park [7] 42
Figure III.8: Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O. 45
Figure III.9: Algorithme P&O 46
Figure III.10: Circuit électrique convertisseur élévateur. 46
Figure III.11: schéma de redresseur à diode. 48
Figure III.12: Schéma de l'Onduleur connecté à réseau 49
Figure III.13: schéma de filtre RL 51
Figure III.14: Schéma fonctionnel de base d'une PLL 52
Figure III.15: Schéma de simulation d'un système d'énergie éolienne raccordé au réseau électrique. 52
Figure III.16: Schéma détaillé du système 53
Figure III.17: Turbine éolienne 53
Figure III.18: Schéma du système de commande 54
Figure III.19: Profile de vitesse de vent 55
Figure III.20: couple de GSAP 56
Figure III.21: Vitesse mécanique 57
Figure III.22: Variation du coefficient de puissance Cp 57
Figure III.23: tension triphasée de GSAP 58
Figure III.24: courant statorique de GSAP 58
Figure III.25: tension de sortie 59
Figure III.26: Réponse en courant continu 59

Figure III.27: Puissance générée et Puissance injectée 60
Figure III.28: tension du réseau électrique triphasé 61
Figure III.29: courant du réseau électrique triphasé 62
Figure III.30: tension et courant de réseau (Va et Ia) 62
Figure III.31: THD de courant 63
Figure III.32: THD de tension 63
Figure III.33: Profile de vent 64
Figure III.34: La vitesse de rotation de GSAP 64
Figure III.35: Le couple électromagnétique de GSAP 64
Figure III.36: Le courant de GSAP 65
Figure III.37: La tension de GSAP 65
Figure III.38: La Puissance générée et la Puissance injectée 65

Liste des abréviations et des symboles

Abréviations

VAWT	Vertical axis wind turbine
HAWT	Horizontal axis wind turbine
OHA	Offshore hybrid assests
MAS	Machine asynchrone
MSAP	Machine synchrone à aimants permanents
MLI	Modulation de largeur d'impulsion
MPPT	Maximum power point tracking
PI	Proportionnel Intégrateur
DC	Courant continu
P&O	Perturbation et observation
Pn	Puissance nominal
Vn	Tension nominal
PLL	Phase Locked Loop
THD	Total Harmonic Distortion
GWEC	Global Wind Energy Council
IEA	International Energy Agency

Symboles

Cp	Coefficient de puissance de la turbine
$C_p{}^{opt}$	Coefficient de puissance optimal de la turbine.
λ	La vitesse spécifique.
λ_{opt}	La vitesse spécifique optimale
Ω	La vitesse linéaire périphérique en bout de pale de l'hélice [rad/s].

R	Le rayon de la turbine [m].
m	La masse de l'air [Kg].
V_v	La vitesse du vent [m/s].
P_v	La puissance du vent [W].
P_{max}	La puissance maximale qu'on peut extraire du vent [W].
$P_{eolienne}$	La puissance éolienne [W].
$P_{méc}$	La puissance mécanique [W].
ρ	La densité de l'air [Kg/m3]
J	Inertie total de la turbine et de la génératrice [Kg.m^2].
f	Coefficient de frottement dynamique [kg/m²].
T_{em}	Le couple électromagnétique [N.m].
T_t	Couple développé par la turbine sous l'action du vent [N.m]
G	Gain du multiplicateur de vitesse
V_{sabc}	Les tensions des déférentes phases statorique dans le repère classique [V].
i_{sabc}	Les courants des déférentes phases statorique dans le repère classique [A].
φ_{sabc}	Les flux des déférentes phases statorique dans le repère classique [Wb].
Ω_t	la vitesse de la turbine.
R_s	La résistance des phases statoriques.
φ_e	représente le flux des aimants à travers le circuit équivalent direct
$V_{sd}V_{sq}$	Tensions statoriques dans le repère de Park [V].
L_s	Inductance cyclique statoriques [H].
p	Nombre de pair de pôles de la machine synchrone.
S	Surface active de la turbine ($S = \pi R^2$) [m^2].
ω	Pulsation des tensions [rad/s].
L_d	Inductance directe de la phase statorique dans le repère de Park [H].
L_q	Inductance en quadrature de la phase statorique dans le repère de Park[H]
i_{dq}	Les courants directs et en quadrature de phase statorique dans le repère de Park.
V_{dq}	Les tensions de la phase statorique dans le repère de Park

Introduction Générale

Introduction générale

Depuis la révolution industrielle, le pétrole, le gaz naturel et le charbon constituent les principales ressources énergétiques de la consommation mondiale. La combustion de ces combustibles fossiles émet d'énormes quantités de gaz à effet de serre, principalement du dioxyde de carbone (CO_2), qui provoque le réchauffement de la planète. Pour faire face à ce problème, le monde s'oriente vers l'utilisation des énergies renouvelables, qui sont propres, inépuisables et renouvelables [1].

Selon le rapport de l'International Energy Agency (IEA), la part des énergies renouvelables dans la production mondiale d'électricité a dépassé les 30% en 2023 et continue d'augmenter, atteignant 30,24% en 2023. Cette croissance rapide reflète des investissements accrus dans les énergies renouvelables, des avancées technologiques, ainsi qu'une prise de conscience mondiale accrue des enjeux climatiques et des politiques environnementales visant à réduire les émissions de carbone [2]. L'énergie éolienne, en particulier, a connu une expansion remarquable. Selon le Global Wind Energy Council (GWEC), l'industrie éolienne mondiale a installé un record de 165 GW de nouvelles capacités en 2025, soit une augmentation de 40% par rapport à 2024. La capacité éolienne mondiale totale a atteint 1 299 GW d'ici la fin de 2025, répartie dans 138 pays qui alimentent désormais leurs économies avec l'énergie du vent [3].

L'énergie éolienne constitue aujourd'hui l'une des filières les plus dynamiques de la transition énergétique mondiale. Sa force réside dans la transformation directe de l'énergie cinétique des masses d'air en électricité propre, sans combustion ni émission de polluants atmosphériques. Contrairement au solaire, le vent souffle également la nuit, offrant un complément naturel à l'intermittence photovoltaïque. Les progrès dans l'aérodynamique des pales, les matériaux composites allèges, et surtout l'électronique de puissance ont permis de développer des turbines capables d'extraire le maximum d'énergie à chaque régime de vent. La génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) représente à cet égard une avancée majeure : en supprimant le multiplicateur de vitesse et les bagues collectrices, elle réduit drastiquement les pertes mécaniques et les besoins de maintenance, tout en offrant une plage de fonctionnement à vitesse variable optimale pour le suivi du point de puissance maximale. Cette technologie, particulièrement adaptée aux sites maritime (offshore) où l'accès est difficile, transforme l'éolien en source d'électricité

fiable, performante et compétitive face aux centrales thermiques conventionnelles.

Ce travail modélise et de simule une chaîne de conversion éolienne connectée au réseau électrique, produisant une puissance de 12,3 kW. Le système étudié repose sur une génératrice synchrone à aimants permanents. Afin d'extraire le maximum de puissance disponible au niveau de la turbine, une stratégie de commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) de type P&O (Perturbé and Observe) sera mise en œuvre. La chaîne de conversion comprend ensuite un hacheur survolteur (Boost DC/DC), suivi d'un onduleur commandé en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsion) pour générer une tension alternative synchronisée avec le réseau électrique. Un filtre est intégré en sortie de l'onduleur afin d'atténuer les harmoniques de courant, tandis qu'une PLL (Phase-Locked Loop) assure la synchronisation parfaite avec le réseau.

Il se compose de trois chapitres essentiels :

Le premier chapitre présente les différentes formes d'énergies renouvelables dans le monde et en Algérie, leurs avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre discute une analyse plus approfondie de l'énergie éolienne, en détaillant son fonctionnement, sa technologie et ses enjeux.

Le troisième chapitre modélise et détaille tous les composants de la chaine de conversion éolienne à base d génératrice synchrone à aimants permanents, la commande MPPT (perturbation et observation) appliquée au hacheur Boost pour suivre la puissance maximale, et la commande à hystérésis au niveau de l'onduleur permettant d'injecter efficacement l'énergie dans le réseau électrique. Afin de tester l'efficacité du système face aux variations du vent, deux essais ont été menés : l'un avec une vitesse de vent quasi-variable et l'autre avec une vitesse de vent variable.

Chapitre I : Généralité sur les Énergies Renouvelables

I. 1 Introduction

Depuis plus d'un siècle, les combustibles fossiles, tels que le pétrole et le gaz naturel, constituent la principale source d'énergie. Cependant, les préoccupations croissantes liées au changement climatique, à la pollution et au caractère limité de ces ressources ont poussé les pays à développer des alternatives renouvelables telles que l'énergie solaire photovoltaïque, éolienne, hydraulique, la biomasse et l'énergie géothermique. Contribuant ainsi à diversifier l'approvisionnement énergétique, à réduire l'impact environnemental et à faciliter la transition vers un mix énergétique plus durable.

Le développement et l'utilisation de ces énergies sont devenus une nécessité pour répondre aux contraintes environnementales et aux enjeux de sécurité énergétique.

Ce chapitre présente les énergies renouvelables par une définition et leurs développements à l'échelle mondiale et locale bien précisément l'Algérie, ainsi que leurs applications, par la suite nous allons décrire les différents types et les avantages et inconvénients.

I.2 Les énergies renouvelables dans le monde

À l'échelle mondiale, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité ne cesse de croître, bien qu'elle reste encore dominée par les combustibles fossiles (62,7%) et le nucléaire (17,1%). Globalement, environ 20% de l'électricité mondiale provient de sources renouvelables, mais cette répartition est très inégale [4].

La part des énergies renouvelables dans la production d'électricité mondiale a montré une progression significative. En 1985, les renouvelables représentaient 20,82 % de la production mondiale (presque exclusivement de l'hydraulique), mais cette part a diminué régulièrement jusqu'à atteindre un minimum de 18,09 % en 2005. A partir de 2010, une inversion de cette tendance est observée, avec une part des renouvelables atteignant 19,71 % puis augmentant régulièrement chaque année. En 2020, la part des renouvelables a dépassé les 28 %, atteignant 30,24 % en 2023.

Cette croissance rapide au cours des dernières années reflète des investissements accrus dans les énergies renouvelables, des avancées technologiques, ainsi qu'une prise de conscience mondiale accrue des enjeux climatiques et des politiques environnementales visant à réduire les émissions de carbone [5].

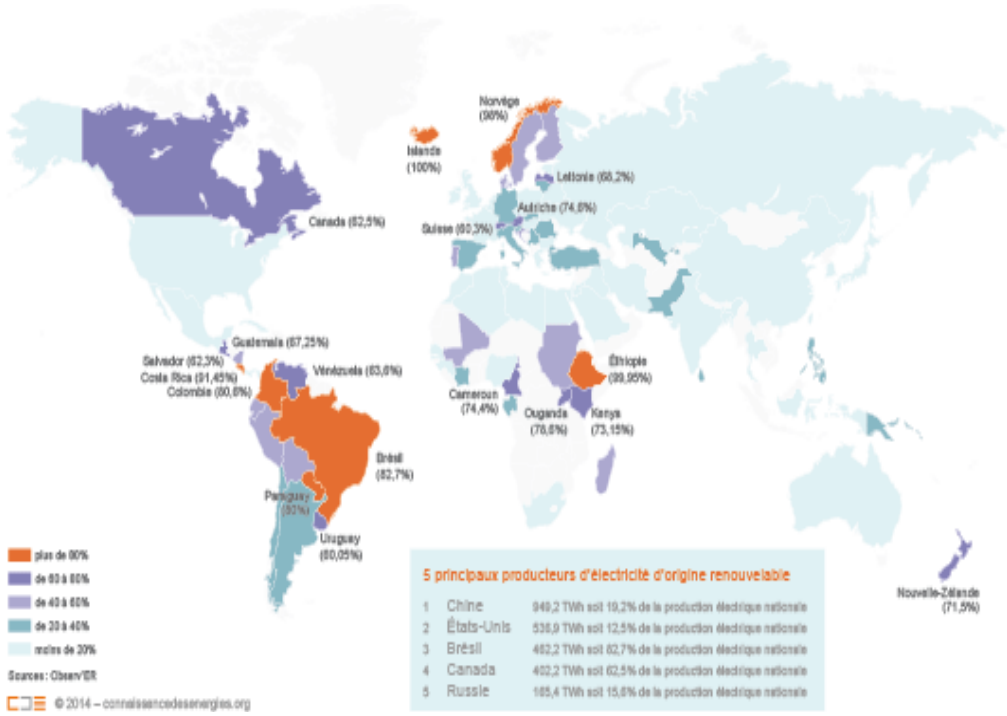


Figure I.1: Contribution des énergies renouvelables à la production de d'électricité [5].

I. 3 Développement des énergies renouvelables en Algérie

L'Algérie dispose d'un potentiel considérable en énergies renouvelables, en particulier solaire (ensoleillement exceptionnel sur la majeure partie du territoire) et éolien. Des études préliminaires ont permis de cartographier les régions les plus ventées, principalement dans le Sud-Ouest (Adrar) où les vitesses moyennes annuelles dépassent 6 m/s, mais aussi sur certains sites côtiers comme Oran, Béjaïa et Annaba, ainsi que sur les hauts plateaux [6]. Bien que le solaire soit plus médiatisé, l'Algérie cherche à percer dans le domaine éolien. La première ferme éolienne, d'une puissance de 10 MW, a été réalisée à Adrar par le groupe français Vergnet. L'évaluation du gisement éolien se poursuit avec l'installation de nouvelles stations de mesure pour affiner les atlas éoliens nationaux [5].

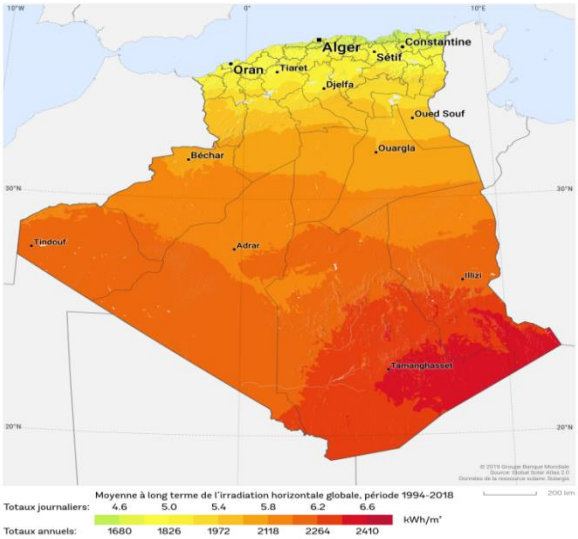


Figure I.2 : carte de l'irradiation horizontale globale periode 1994-2018 [7].

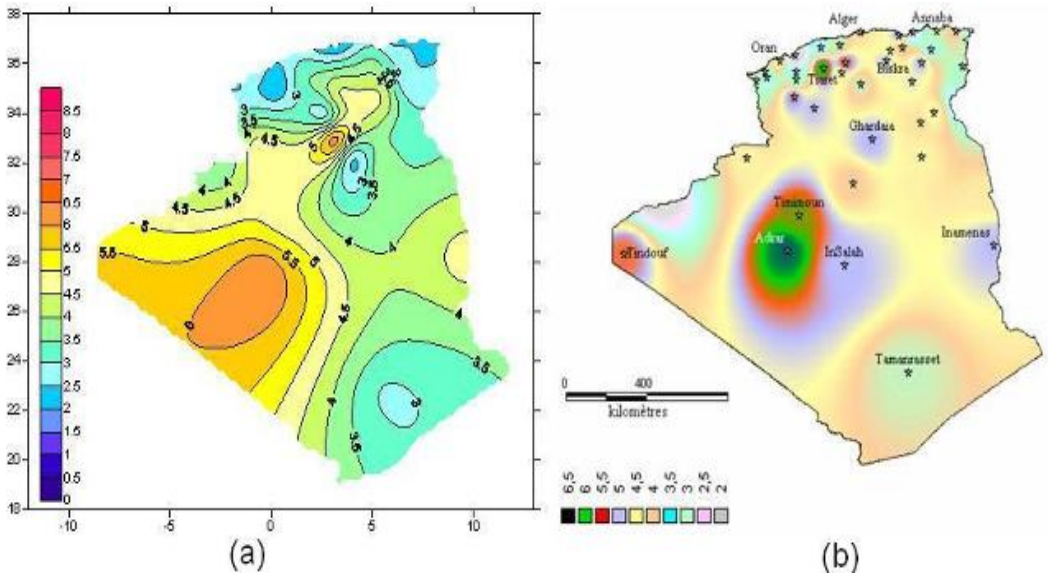


Figure I.3: Atlas de la vitesse moyenne du vent. Période 2004-2009 [8].

I.4 Application des énergies renouvelables

Les applications des énergies renouvelables sont vastes et se répartissent en deux grands modes : les systèmes autonomes (ou isolés) et les systèmes raccordés au réseau. Les systèmes autonomes sont particulièrement adaptés aux sites isolés non desservis par le réseau électrique national (électrification rurale, pompage de l'eau, télécommunications, réfrigération) [4]. Ils nécessitent souvent un système de stockage (batteries) pour pallier l'intermittence de la production. Les systèmes raccordés au réseau injectent l'énergie produite directement dans le réseau de distribution,

permettant de lisser la production nationale et d'agir comme un "grand accumulateur" virtuel. Les énergies renouvelables sont également utilisées pour la production de chaleur (solaire thermique, biomasse, géothermie).

I.5 Énergie photovoltaïque (PV)

L'énergie photovoltaïque (PV) convertit directement la lumière du soleil en électricité grâce à des cellules semi-conductrices (principalement à base de silicium). Un générateur photovoltaïque (GPV) est constitué de l'association série/parallèle de ces cellules pour former des panneaux [4].



Figure I.4: Panneaux photovoltaïque.

I.5.1 Avantages de l'énergie photovoltaïque

- Énergie propre ne produisant ni gaz à effet de serre ni déchets radioactifs en fonctionnement.
- Adaptée aux pays chauds et aux sites isolés, permettant l'autonomie énergétique.
- Frais de maintenance relativement faibles et acceptation du public élevée.
- Énergie maîtrisable et adaptable à différentes échelles, du capteur de quelques watts aux centrales de plusieurs mégawatts [4].

I.5.2 Inconvénients de l'énergie photovoltaïque

- Coût d'investissement initial encore élevé, bien qu'en baisse constante.
- Puissance fournie faible par unité de surface (rendement limité des cellules).
- Production intermittente et dépendante des conditions météorologiques (ensoleillement, température).
- La puissance diminue avec l'augmentation de la température des panneaux [4].

I.6 Énergie Éolienne

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique combinée à la turbine éolienne. Cette conjonction mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre d'ampleur, soit accompli par le médiateur d'un multiplicateur dans le cas inverse. Enfin il existe différent modèle d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des foyers isolés.

Le système de conversion éolien est également des sièges de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion [6].



Figure I.5: éolienne

I.6.1 Avantages de l'énergie éolienne

- Énergie propre et renouvelable : Elle ne produit aucun rejet atmosphérique (pas de CO2, SO2, NOx) ni déchet radioactif.
- Inépuisable : Le vent est une ressource naturelle et abondante.
- Coût de production compétitif : L'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables les moins chères à produire.
- Indépendance énergétique : Elle permet de réduire la dépendance aux importations de combustibles fossiles et de créer des emplois locaux.

- Faible emprise au sol : Les éoliennes (surtout HAWT) ont un impact limité sur les terres agricoles, qui peuvent continuer à être exploitées autour de l'assise [4].

I.6.2 Inconvénients de l'énergie éolienne

- Intermittence et imprévisibilité : La production d'électricité dépend de la force et de la régularité du vent, ce qui nécessite de prévoir des capacités de stockage ou des sources d'appoint.
- Impact visuel et sonore : Les éoliennes peuvent être considérées comme une nuisance esthétique pour le paysage et génèrent un bruit aérodynamique caractéristique.
- Impact sur la faune : Elles peuvent présenter un danger pour les oiseaux et les chauves-souris, notamment lors des migrations.
- Contraintes techniques : Les sites d'implantation doivent être soigneusement choisis en fonction du gisement éolien et de la proximité du réseau électrique.

I.7 Énergie Hydraulique

L'énergie hydraulique (hydroélectricité) utilise l'énergie potentielle de l'eau en mouvement (chute d'eau) pour faire tourner une turbine couplée à un alternateur. Selon la hauteur de chute, on distingue différents types de turbines (Pelton pour hautes chutes, Francis pour moyennes, Kaplan pour basses chutes) [4].



Figure I.6: centrale hydraulique

I.7.1 Avantages de l'énergie hydraulique

- Faible coût du kilowattheure (KWh) produit, surtout pour les grands barrages.
- Souplesse d'utilisation et capacité à répondre rapidement aux pics de demande.
- Permet un stockage d'énergie à grande échelle via les stations de transfert d'énergie par pompage (STEP).
- Fournit environ 13% de l'électricité mondiale et constitue la première source d'énergie renouvelable électrique.
- Contribue également à la gestion des crues et à l'irrigation [4].

I.7.2 Inconvénients de l'énergie hydraulique

- Forte contrainte géographique, nécessitant un site avec un dénivelé et un débit d'eau suffisants.
- Impacts environnementaux majeurs lors de la construction (inondation de vallées, modification des écosystèmes).
- Vulnérabilité aux aléas climatiques (sécheresses).
- Nécessité de concilier les différents usages de l'eau (agriculture, eau potable, loisirs) [4].

I.8 Énergie Biomasse

La biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale (bois, déchets agricoles, déchets ménagers organiques). Son énergie est libérée par combustion directe (pour la chaleur ou l'électricité) ou par des processus biochimiques (méthanisation, fermentation) pour produire du biogaz ou des biocarburants. C'est une énergie très flexible qui utilise des déchets, ce qui en fait une ressource locale par excellence.

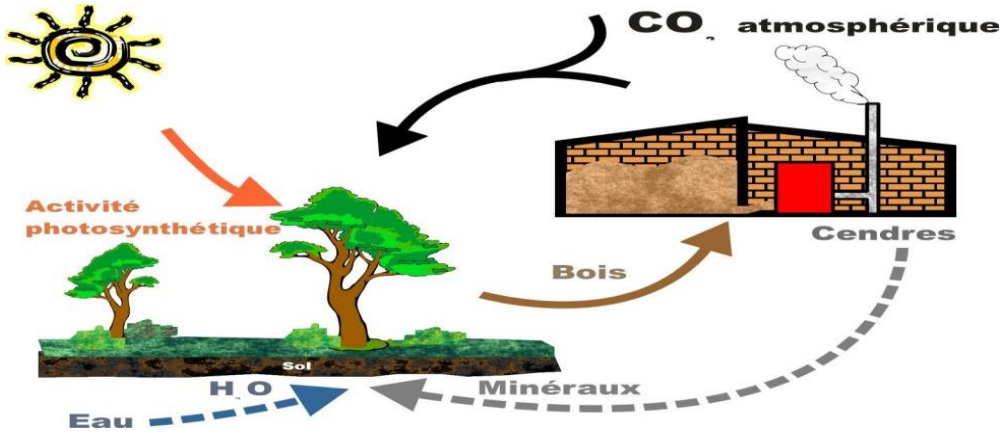


Figure I.7: centrale biomasse.

I.8.1 Avantages de l'énergie biomasse

- Source d'énergie renouvelable et stockable (contrairement au vent ou au soleil).
- Permet de valoriser des déchets organiques et de réduire les émissions de méthane des décharges.
- Contribue à la production de chaleur, d'électricité et de carburants.
- Soutient l'économie circulaire et crée des emplois locaux (collecte, transport, transformation).

I.8.2 Inconvénients de l'énergie biomasse

- Rendement énergétique limité pour certaines filières.
- Concurrence potentielle avec l'usage alimentaire des sols et des cultures (agrocarburants).
- Émissions de polluants (particules fines, CO2) lors de la combustion non maîtrisée, même si le bilan carbone peut être neutre à long terme.
- Logistique de collecte et de stockage complexe et coûteuse.

I.9 Énergie Géothermique

La géothermie exploite la chaleur naturelle contenue dans le sous-sol terrestre. Cette chaleur, issue de la désintégration d'éléments radioactifs dans le manteau terrestre, est accessible via des forages plus ou moins profonds. Elle est utilisée directement pour le chauffage (géothermie basse température) ou pour la production d'électricité (géothermie haute température, >150°C). Elle est souvent citée dans les mémoires comme une source stable et continue comparée à l'éolien ou au solaire [4].

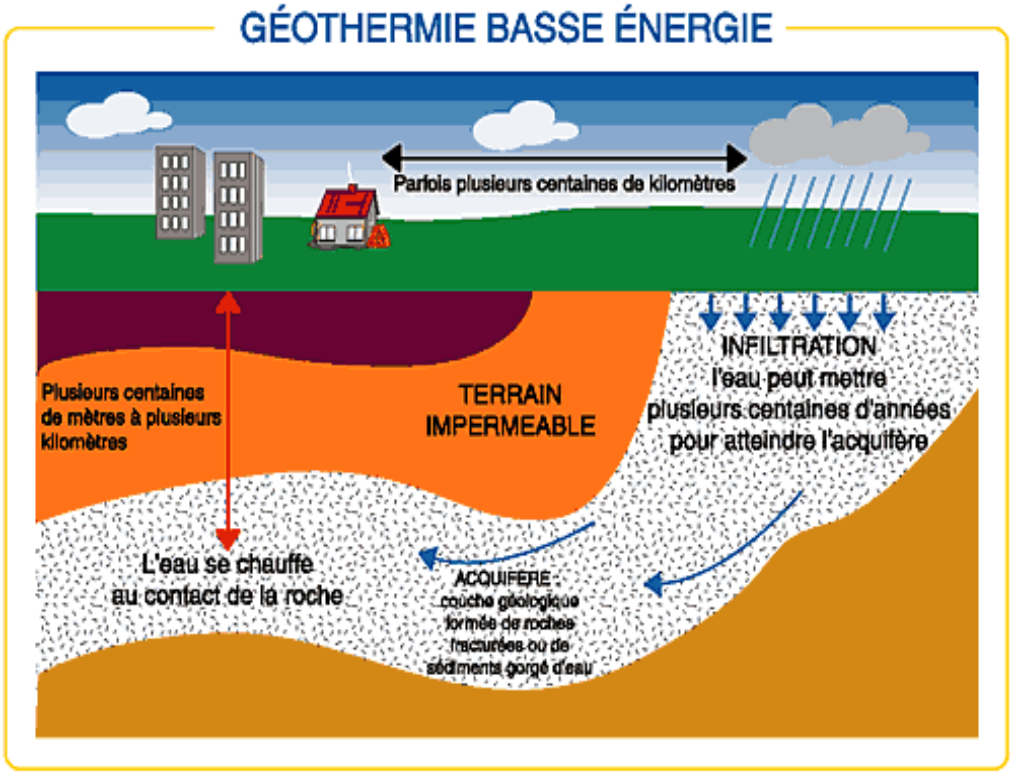


Figure I.8: centrale géothermie

I.9.1 Avantages de l'énergie géothermique

- Source d'énergie renouvelable, propre, avec une très faible empreinte carbone.
- Production continue (base), indépendante des conditions météorologiques (pas d'intermittence).
- Faible emprise au sol et excellent rendement pour la production d'électricité.
- Permet la cogénération (production simultanée de chaleur et d'électricité).

I.9.2 Inconvénients de l'énergie géothermique

- Investissement initial très élevé (forages).
- Ressource localisée géographiquement (accessible surtout dans les zones volcaniques ou tectoniquement actives).
- Risque d'épuisement local de la ressource si la gestion n'est pas durable.
- Possibilité d'émissions de gaz nocifs (hydrogène sulfuré, CO2) et d'affaissements miniers [4].

I.11 Conclusion

Les énergies renouvelables constituent un élément essentiel pour assurer la stabilité énergétique et faire face aux enjeux climatiques. Historiquement, les énergies fossiles ont dominé le secteur énergétique en raison de leur disponibilité et de leur coût compétitif. Toutefois, compte tenu de l'importance croissante des effets du changement climatique induits par les émissions de gaz à effet de serre par les combustibles fossiles et de l'insécurité énergétique qu'ils engendrent à long terme, il devient impératif d'accélérer la transition vers des sources d'énergie propres et renouvelables. La diversité et la complémentarité des sources renouvelables, tout en identifiant les facteurs déterminants qui guident le choix technologique en fonction des contextes géographiques, économiques et environnementaux spécifiques.

Chapitre II :
État de l’art des Systèmes Éoliens

II.1 Introduction

L'énergie éolienne, reconnue comme une ressource non polluante, figure parmi les options les plus durables pour les futurs systèmes énergétiques. L'exploitation de l'énergie éolienne n'entraîne aucun effet néfaste sur l'environnement. De plus, leur rentabilité à long terme en fait une véritable solution pour réduire la consommation énergétique mondiale en constante augmentation.

Ce chapitre expose une analyse des technologies éoliennes. Il commence par retracer l'évolution historique de l'exploitation de l'énergie éolienne, ensuite les principales configurations d'éoliennes, en distinguant les modèles à axe horizontal et à axe vertical, ainsi que les installations terrestres et offshore. Les composants fondamentaux d'une éolienne sont présentés en détail, suivis d'une analyse des zones de fonctionnement définies par des seuils de vitesse du vent. Les systèmes de régulation de la puissance mécanique. Enfin, le chapitre examine les chaînes de conversion électrique, en comparant les systèmes à vitesse fixe et à vitesse variable, et en évaluant les principales technologies de générateurs : les générateurs à induction à cage d'écureuil (GACE), les générateurs à induction à double alimentation (GADA), les générateurs synchrones à excitation électrique (GSEE) et les générateurs synchrones à aimants permanents (GSAP).

II.2 Historique

Le nom "éolienne" vient du nom du dieu du vent grec, Eole. La maîtrise du vent par l'Homme s'est faite au cours des siècles. En l'an 4000 avant J-C, les Chinois s'en servaient déjà pour la navigation. Les premiers dispositifs fonctionnant à l'aide du vent sont apparus dans l'Empire Perse, pour irriguer les terres cultivées [11]. Ainsi que pour moudre le grain. Les croisades ont apporté en Europe ce savoir-faire vers 1180, le développement de l'agriculture entraina une utilisation massive des moulins à vent en Europe de l'ouest. Aux États-Unis, le développement de l'éolienne pour pomper l'eau a été un facteur déterminant permettant l'exploitation de larges étendues.

L'éolienne multi-pale placée au sommet d'une tour en treillis boit ou acier fut pendant de nombreuses années, un trait majeur du paysage de l'Amérique rurale. L'éolienne moderne commença à être développée au début des années 1980. Et en 1888, Charles F. Brush créa la première éolienne. En construisant une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs [11].

Depuis la technologie n'a cessé de s'améliorer de nombreuses recherches sont actuellement en cours pour permettre à l'énergie éolienne de pouvoir jouer le rôle qui l'attend dans les prochaines Années [12].

II.3 Les types des éoliennes

On distingue les éoliennes on shore (terme américain signifiant sur le sol c'est-à-dire sur les continents), et les éoliennes maritime (off-shore). Ces dernières présentent des avantages au niveau des nuisances sonores puisqu'elles sont éloignées des habitations et au niveau des vents car les vents marins sont plus nombreux et plus forts que les vents continentaux. En revanche, elles sont beaucoup plus difficiles à installer et donc beaucoup plus coûteuses [6].

- Les éoliennes à axe horizontal
- Les éoliennes domestiques
- Les éoliennes à axes verticaux
- Les hydroliennes.
- Eolienne de pompage.

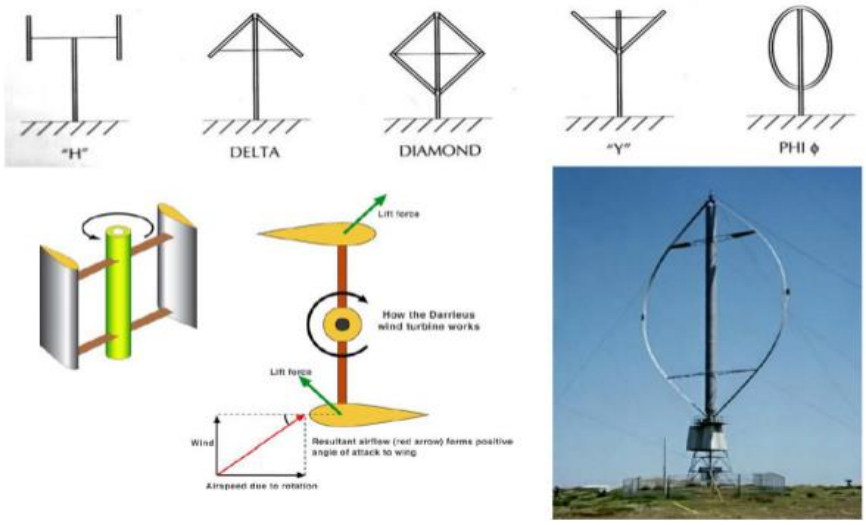


Figure II.1: Les différentes formes d'éoliennes pouvant être conçues en utilisant le principe de Fonctionnement de Darrieux**.**

On distingue deux grands types d'éoliennes :

- Les éoliennes à axe vertical
- Les éoliennes à axe horizontal

II.3.1 Eolienne à axe vertical

Ce type d'éolienne est principalement érigé près du sol ce qui signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain ou aux bâtiments en amont de la machine).

Ces paramètres vont réduire grandement l'efficacité de l'éolienne [6].

-Eoliennes de type Darius :

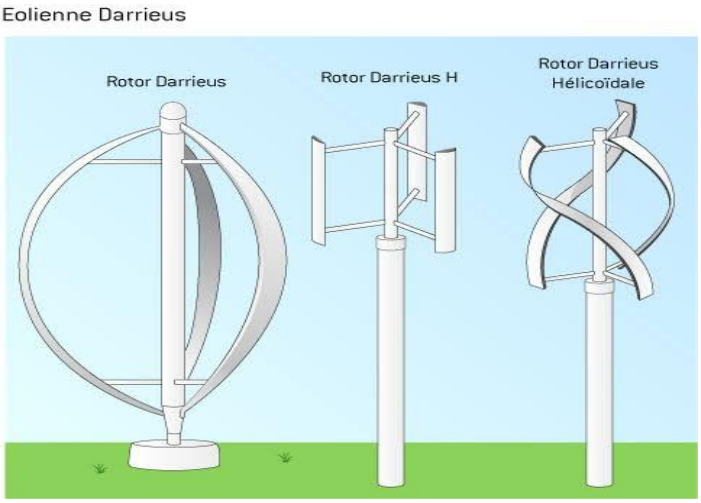


Figure II.2: Les différentes formes d'éoliennes Darrieus.



Figure II.3: Les différentes formes d'éoliennes à axe vertical.

II.3.1.1 Avantages des éolienne à axe vertical

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessaire peu d'entretien.

II.3.1.2 Inconvénients des éolienne à axe vertical

- Elles sont moins performantes que celles ont axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief

- Leurs implantations au sol exigent l'utilisation des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour

II.3.2 Eolienne à axe horizontal

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent. Deux types de configuration sont regroupés sous la terminologie HAWT (horizontal axis Wind turbine) : les éoliennes « amont » et « aval ». Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients.

Le principal intérêt de la formule « aval » est que la machine peut s'orienter naturellement en lacet (autour de l'axe vertical de la tour). En effet, en inclinant les pales vers l'arrière, elles forment en rotation un cône : la surface latérale virtuelle ainsi créée fait alors office de gouvernail. Par ailleurs, dans la configuration aval, la tour perturbe fortement l'écoulement de l'air (effet dit de masque) : les pales, qui passent dans ce sillage, subissent à chaque tour des efforts répétés, source de vibrations et de fatigue. On doit alors modifier l'attache des pales au sein du moyeu pour que le rotor se comporte dans son ensemble comme un balancier et absorbe ces perturbations [6].

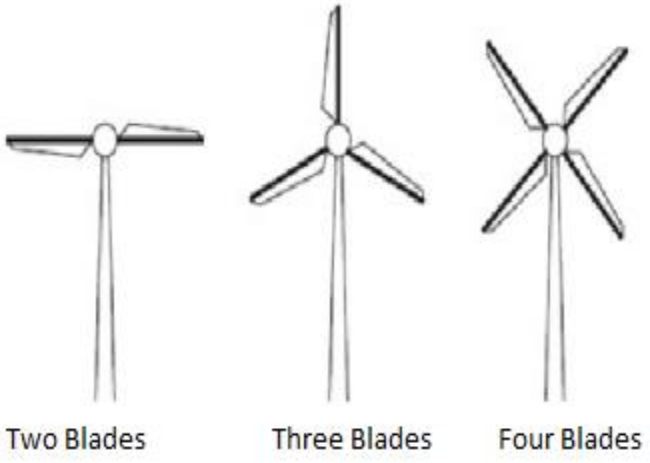


Figure II.4: Les différentes formes d'éoliennes à axe horizontal.

II.3.2.1 Avantages des éolienne à axe horizontal

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes a axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur donc plus fort a plus régulier qu'au voisinage de sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour.

II.3.2.2 Inconvénients des éolienne à axe horizontal

- Cout de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

II.4 Définition d'un aérogénérateur à axe horizontal

Une éolienne est un dispositif permettant d'utiliser l'énergie du vent. Elle convertit l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique. Elle est composée de pâles en rotation autour d'un rotor et actionnées par le vent. Les éoliennes sont généralement.

Utilisées pour produire de l'électricité et pour le pompage d'eau, et entrent dans la catégorie des énergies renouvelables. Exposons les définitions des deux termes suivants, qui seront plus ou moins rencontrés au fil de l'avancement de ce mémoire, données par « l'association Française de Normalisation » [6].

- Aéromoteur (ou Eolienne) : Moteur rotatif actionné par le vent.
- Aérogénérateur : Groupe constitué par une génératrice électrique entraînée par un aéromoteur

II.5.1 Énergie éolienne terrestre(onshore)

En termes simples, l'énergie éolienne terrestre est l'électricité produite par des éoliennes situées sur la terre ferme, actionnées par le mouvement naturel de l'air. On trouve souvent des parcs éoliens terrestres dans les champs ou les zones rurales, car ils sont généralement construits dans des zones moins peuplées où les bâtiments et les obstacles ne perturbent pas le flux d'air.

L'éolien terrestre capte et convertit l'énergie éolienne sous une forme ou une autre depuis les années 1880 (pour moudre du maïs ou actionner des pompes) [13].



Figure II .4: l'éoliennes terrestre (onshore).

- **Impact environnemental réduit :** la construction et l'exploitation d'un parc éolien terrestre génèrent nettement moins d'émissions que d'autres sources d'énergie, tandis que les sites sur lesquels ils sont implantés peuvent continuer à être exploités à des fins agricoles.
- **Rentabilité** : il s'agit de l'une des formes d'énergie renouvelable les moins coûteuses (avec le photovoltaïque) et nettement moins onéreuse que l'énergie éolienne offshore. Grâce à des

infrastructures et des coûts d'exploitation moins élevés, les parcs terrestres peuvent contribuer à réduire la facture d'électricité.

- **Installation plus rapide et maintenance plus facile :** les parcs éoliens terrestres peuvent être construits en quelques mois, à grande échelle, et leur maintenance est relativement peu coûteuse et rentable par rapport à celle des parcs offshores [13].

II.5.2 Éolienne maritime (offshore)

Les parcs éoliens offshore produisent de l'électricité à partir du vent qui souffle au-dessus de la mer. Ils sont considérés comme plus efficaces que les parcs éoliens terrestres, grâce à la vitesse plus élevée des vents, à une plus grande régularité et à l'absence d'obstacles physiques que peuvent présenter la terre ou les constructions humaines [13].



Figure II.5: l'éoliennes maritime (offshore).

- **Les éoliennes maritimes (offshores) sont plus efficaces :** grâce à des vitesses de vent plus élevées et à une direction plus constante, les installations offshores nécessitent moins d'éoliennes pour produire la même quantité d'énergie que les parcs éoliens terrestres.
- **Impact environnemental réduit : s**ituées à des kilomètres de la côte, les éoliennes offshores sont plus éloignées de la population locale. L'accès restreint à leurs sites peut même contribuer à protéger les écosystèmes marins environnants.
- **Plus d'espace pour la construction :** les océans offrent un emplacement idéal pour construire des parcs éoliens en termes d'échelle et d'espace. La construction d'un plus grand nombre de parcs éoliens permet de produire davantage d'énergie propre et durable [13].

II.5.3 La différence Énergie éolienne terrestre(onshore) et maritime (offshore)

Des parcs éoliens qui parsèment nos paysages aux vastes installations au large de nos côtes, l'énergie éolienne terrestre et offshore joue un rôle central dans la transition vers un système électrique sans carbone.

La technologie utilisée par les éoliennes terrestres et offshore pour produire de l'électricité est fondamentalement la même. Ce qui les distingue, c'est leur emplacement, leur taille, leur envergure et la manière dont l'électricité qu'elles produisent est acheminée.



Figure II.6: L'éolien terrestre (onshore) et maritime (offshore).

II.5.4 hybrides maritime (offshore) (OHA)

Au lieu de raccorder un à un les parcs éoliens offshore à la côte, les OHA (anciennement appelées « interconnexions polyvalentes ») permettront de raccorder simultanément des groupes de parcs éoliens offshore, en les connectant aux réseaux énergétiques des pays voisins et en facilitant encore davantage le partage d'énergie propre entre les pays.

Les OHA réduiront également l'impact sur les communautés locales, car ils permettront de diminuer le nombre de points de raccordement et d'infrastructures terrestres nécessaires pour relier cette énergie propre au rivage [13].

II.5.5 Eoliens domestiques

Un parc éolien domestique en milieu urbain désigne l'ensemble des éoliennes de petite puissance (typiquement 1 à 10 kW) installées sur ou à proximité de bâtiments résidentiels, commerciaux ou

municipaux dans des environnements urbains denses. Ces éoliennes convertissent le vent urbain, caractérisé par des vitesses faibles et une forte turbulence, en énergie électrique pour une consommation locale ou une injection au réseau. Contrairement aux grands parcs éoliens classiques, elles évoluent dans des régimes de vent fortement perturbés, avec des vitesses moyennes basses, une intensité de turbulence élevée et une directionnalité imprévisible due aux sillages des bâtiments et aux effets de canyons urbains.



Figure II.7: les éoliens domestiques.

II.5.5.1 Avantages des éoliens domestiques

- Proximité production-consommation : minimisation des pertes en ligne et allègement de la pression sur les infrastructures de réseau.
- Architecture MSAP à entraînement direct : élimination du multiplicateur de vitesse, réduisant la complexité mécanique, la maintenance, le bruit et les points de défaillance — essentiel pour des installations urbaines difficiles d'accès.
- Haute efficacité à vitesses variables : adaptation optimale aux conditions rafaleuses du milieu urbain grâce au couplage avec convertisseur de pleine puissance.
- Soutien réseau : contrôle de la puissance réactive et régulation de tension via l'électronique de puissance, bénéfique pour les réseaux de distribution urbains.

II.5.5.2 Inconvénients des éoliens domestiques

- Faible qualité de la ressource éolienne : vitesses moyennes basses (3–5 m/s) et forte turbulence limitant les facteurs de charge à 5–15 % ;

- Coût élevé par kW : architecture MSAP avec convertisseur de pleine puissance, aggravé par la complexité d'installation en milieu urbain ;
- Dépendance à l'électronique de puissance : modes de défaillance supplémentaires, contraintes thermiques et problèmes de compatibilité électromagnétique ;
- Intermittence et imprévisibilité : difficulté de modélisation des vents urbains compliquant l'évaluation de la ressource et la rentabilité

II.6 Constituants de l'éolienne

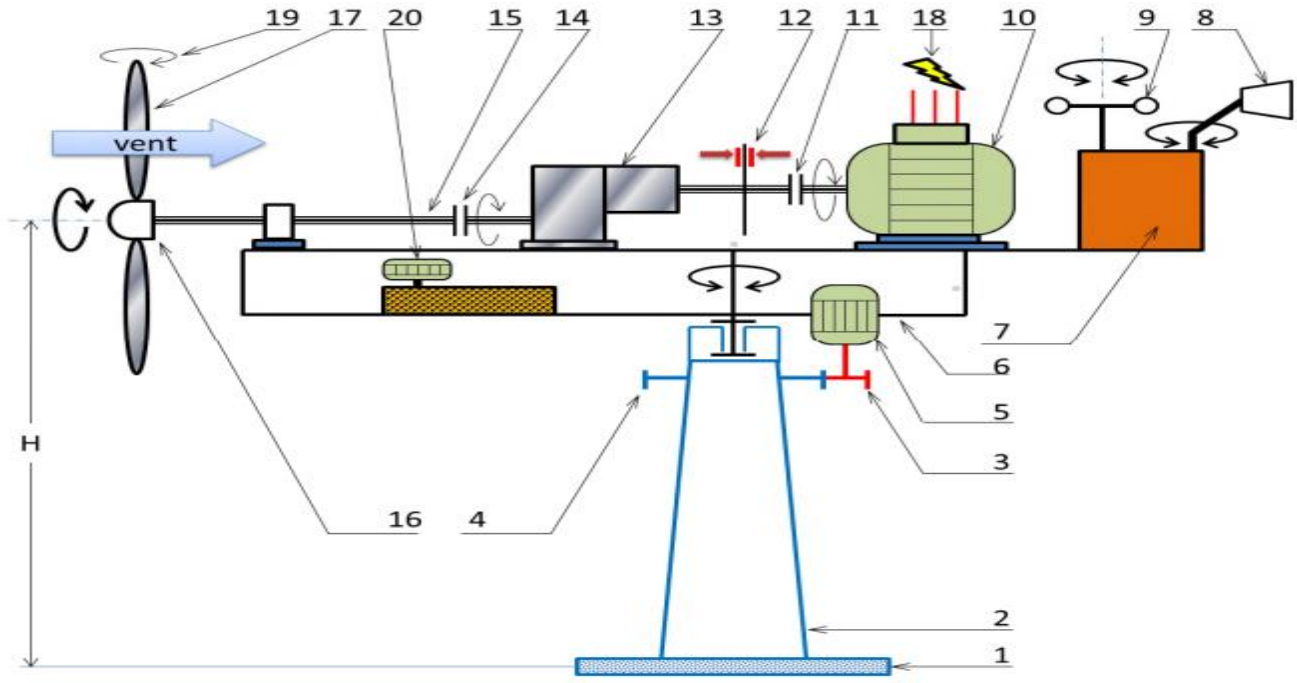


Figure II.8: Constitution d'une éolienne tripale [6].

1-La fondation : c'est généralement conçu en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne

2-La tour (le mat) : la pièce la plus imposante de l'éolienne est une gigantesque structure d'acier ou de béton qui supporte l'éolienne, y amène les raccordements nécessaires et permet d'accéder à la nacelle. Sa hauteur peut atteindre plus de 100 mètres, soit la hauteur d'un édifice de 20 étages. Elle maintient donc la nacelle en altitude, là où le vent est le plus constant et le plus fort.

3- Pignon d'entrainement de la nacelle : il s'agit de courroie de transmissions

4-Roue dentée liée à la tour : c'est un disque d'acier comportant des dents a sa périphérie

5-Le système de direction : est un moteur qui veille à ce que l'éolienne soit toujours placée face au vent. Il est commandé par le système de contrôle, un ordinateur qui surveille en permanence

l'état de la machine et celui de son environnement et à l'aide de la girouette qui indique la direction du vent et l'anémomètre qui en montre la vitesse.

6- La nacelle : contient les principales composantes d'une éolienne, comme le multiplicateur et la génératrice. À l'avant de la nacelle, nous trouvons le rotor de l'éolienne, c'est-à-dire les pales et le moyeu.

7-L'armoire de couplage au réseau électrique : transforme la tension afin de rendre l'énergie produite par l'éolienne compatible à celle du réseau. Le convertisseur synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau.

8- La girouette : indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent.

9-L'anémomètre : mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter.

10-L'alternateur : machine électromécanique fournissant des tensions alternatives de fréquence proportionnelle à leur vitesse de rotation

11-L'arbre rapide : tourne à environ 1 800 tours par minute et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque que l'on peut actionner en cas d'urgence, soit lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

12-Le frein : permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien.

13-Le multiplicateur : relie l'arbre lent à l'arbre rapide en augmentant au passage de plus de 100 fois la vitesse de rotation. La génératrice : est l'endroit où l'énergie cinétique (du mouvement) se transforme en énergie électrique. L'arbre lent : son rôle est de relié le moyeu du rotor au multiplicateur.

14-Le rotor : (les pales et le moyeu). Il tourne assez lentement, environ 16 tours par minute. L'arbre contient des tuyaux pour le système hydraulique permettant l'opération des freins en cas de vents violents.

15- L'arbre lent ou arbre primaire relie au multiplicateur qui tourne lentement

16-Le moyeu : est le point de raccordement entre les pales et l'arbre lent de la machine.

17-Les pales : les pales du rotor captent le vent et transfèrent sa puissance au moyeu du rotor. Chaque pale d'une éolienne de 1.5 MW mesure environ 30 à 35 m de long et sa conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.

18-Un réseau électrique c'est un ensemble d'infrastructures énergétiques plus ou moins disponibles permettant d'acheminer l'énergie électrique

19-Système de régulation du pas des pales : Le principe est de modifier l'angle des pales par rapport au vent de manière à diminuer la vitesse de rotation des pales par une moindre prise au vent

20- Groupe hydraulique : Le groupe hydraulique central fournit la pression requise pour les composants hydrauliques comme des freins, le système pitch, les grues de service et le rotor lock

II.6.1 Zones de fonctionnement d'une éolienne

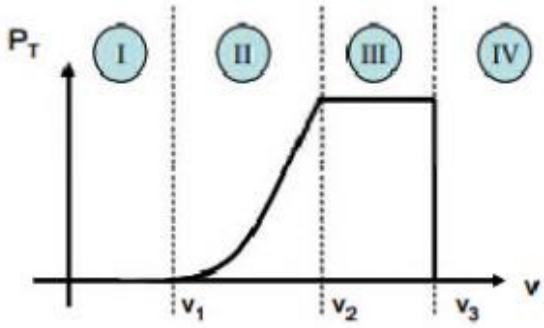


Figure II.9: Zones de fonctionnement d'une éolienne [6].

On peut définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent figure

V1 : Vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, V1 varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

V2 : Vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, V2 varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

V3 : Vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, V3 vaut 25m/s [6].

Zone I : V< V1

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : V1< V< V2

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

Zone III : V2< V< V3

La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de turbine Pn. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

Zone IV : V> V3

La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée (les pales de la turbine sont mises en drapeaux $\beta = 90°$). Donc la puissance extraite est nulle [6].

II.7 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne des vents forts et d'autre part de délimiter la puissance. En effet, la turbine éolienne est dimensionnée pour fournir une puissance nominale Pn à une vitesse de vent nominale Vn, au-delà de cette vitesse les paramètres de la turbine doivent évoluer afin de fournir la puissance nominale et de ne pas produire au-delà d'une vitesse maximale Vmax qui pourrait endommager la turbine. Ils existent plusieurs systèmes de régulation de vitesse pour la turbine, on s'intéressera pour notre part aux systèmes les plus couramment utilisés à savoir :

- **Le système « pitch »**

La régulation active par vérins hydrauliques, dite aussi "pitch control", consiste à faire varier l'angle de calage des pales pour profiter au maximum du vent instantané et limiter la puissance pour des vitesses de vent supérieures à la vitesse nominale. En général, le système de régulation pivote les pales de quelques degrés à chaque variation de la vitesse du vent pour que les pales soient toujours positionnées à un angle optimal par rapport au vent, de façon à extraire la puissance maximale à tout moment. Ce système permet de limiter la puissance en cas de vent fort [6].

- **Le système « stall »**

Dans le cas de la régulation aérodynamique passive, appelée aussi "stall control", les pales de l'éolienne sont fixes par rapport au moyeu de l'éolienne. Elles sont conçues spécialement pour subir des décrochages lors de vents forts. Le décrochage est progressif lorsque le vent atteint sa vitesse critique. En comparaison avec le pitch, le stall a pour avantage l'absence des pièces mobiles et de système de régulation dans le rotor (système de contrôle d'angle de calage). La construction est donc plus simple et moins coûteuse. Par contre la puissance active n'est pas contrôlable [6].

- **Le système « stall actif »**

Le système "stall actif" est la combinaison des deux systèmes décrits précédemment, il est utilisé pour les machines de très forte puissance. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent. L'orientation des pâles étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux [6].

II.8 Chaine de conversion éolienne

II.8.1 Configurations et caractéristiques des principaux systèmes de production d'énergie éolienne

Le réseau de production d'énergie éolienne comprend des sous-systèmes électromagnétiques et électriques indissociables. Outre le générateur électrique et le convertisseur électronique de puissance, il comprend généralement un transformateur électrique permettant d'assurer la conformité à la tension du réseau. Néanmoins,

la structure de conception du système de production d'énergie dépend du type de système de production d'énergie éolienne (SCEE) et de son interface avec le réseau. Les SCEE peuvent présenter diverses configurations. En conséquence, les configurations générales des SCEE ont été nommées en fonction d'une combinaison de deux critères : **(1)** la vitesse applicable du générateur électrique par rapport à la vitesse variable et **(2)** le type d'intégration mécanique entre l'arbre de la turbine et celui du générateur. Ces configurations comprennent :

A. SCEE à vitesse constante avec boîte de vitesses à trois étages.

B. SCEE à vitesse variable à échelle partielle avec boîte de vitesses à trois étages.

C. SCEE à vitesse variable sans boîte de vitesses à pleine échelle.

D. SCEE à vitesse variable à échelle partielle avec boîte de vitesses à un étage.

E. SCEE à vitesse variable à pleine échelle avec boîte de vitesses à un étage.

Sur la base des critères énoncés et dans le cadre des configurations générales

Les structures, les avantages et les inconvénients de ces SCEE sont brièvement abordés dans les sous-sections suivantes. Les comparaisons entre les technologies avancées de conversion de l'énergie éolienne sont également présentées sur la base des principales exigences [12].

II.8.1.1 Générateur à induction à cage d'écureuil avec réducteur à trois étages (GACE-R3E)

Le système GACE-R3E est représenté sans le convertisseur de puissance sur la figure II.9, où le générateur est raccordé au réseau via un démarreur progressif et un transformateur de couplage. Ce

système est traditionnel et a été utilisé dans le secteur de l'énergie éolienne dès les tout débuts de l'exploitation des ressources éoliennes. Les principaux avantages et limites de cette conception de système sont [14] :

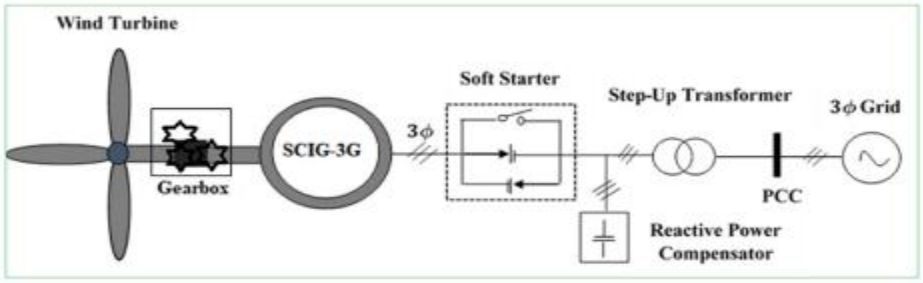


Figure II.10: Structure d'un système SCEE à vitesse constante équipé d'un réducteur à trois étages GACE [14].

II.8.1.1.2 Avantages de générateur à induction à cage d'écureuil avec réducteur à trois étages

- Faible complexité de la structure de captage d'énergie.
- Coûts de démarrage et d'exploitation réduits grâce à son composant bon marché, le démarreur progressif à faible coût.
- Fonctionnement stable, car aucun convertisseur de puissance n'est nécessaire.

II.8.1.1.3 Inconvénients de générateur à induction à cage d'écureuil avec réducteur à trois étages

- Capacité insuffisante de captage de l'énergie éolienne en raison d'une plage de vitesse limitée (1 %).
- Les caractéristiques d'intermittence de la vitesse du vent entraînent des fluctuations de la fréquence du réseau.
- Les perturbations du réseau génèrent des contraintes élevées sur ses sous-systèmes mécaniques.

II.8.1.2 Générateurs à induction à double alimentation avec réducteur à un étage et à trois étages (GADA-R1E et GADA-R3E)

La structure générale d'un système de captage d'énergie éolienne (SCEE) intégrant un générateur à induction à double alimentation (GADA) et un convertisseur électronique de puissance est illustrée à la figure 3. Comme son nom l'indique, l'énergie captée par le GADA est injectée dans le réseau via les enroulements du stator et du rotor. Le convertisseur du circuit du rotor est conçu pour gérer entièrement la puissance de glissement ; par conséquent, le rendement de conversion de ce

système est limité à 30 % de la puissance réelle du générateur électrique. L'utilisation d'un convertisseur à puissance réduite (30 %) présente l'avantage de minimiser le coût, le poids et l'espace nécessaire dans la nacelle. Le convertisseur de puissance comprend généralement des convertisseurs à source de tension (VSC) à deux étages reliés selon une configuration BTB. Un convertisseur côté rotor (RSC) régule le couple/la vitesse du générateur ou la puissance active/réactive, tandis que le R3E gère la tension nette du bus CC.

De plus, étant donné que la puissance nominale du convertisseur pour les deux GADAs équipés d'une boîte de vitesses à un ou trois étages ne représente que 30 % de celle des systèmes, cela présente des avantages particuliers en termes d'investissement initial et de performances de récupération d'énergie par rapport aux technologies utilisant des convertisseurs de puissance à gamme complète, en particulier les GSEE.

D'autre part, en raison de l'optimisation de la vitesse à un seul niveau, la vitesse du générateur est sensiblement faible, tandis que le couple est sensiblement élevé, et par conséquent, le GADA-R1E doit être conçu avec un diamètre et un entre fer croissants. Cela se traduit par la génération [14].

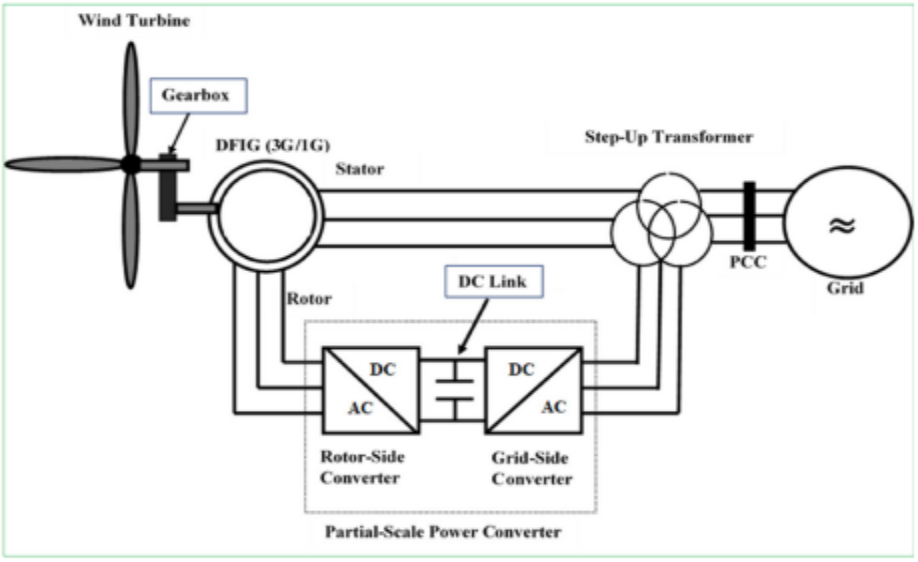


Figure Ⅱ.11: Configuration of wind energy harvesting system [14].

II.8.1.2.1 Avantages de générateurs à induction à double alimentation avec réducteur à un étage et à trois étages

- Le convertisseur de puissance permet un transport bidirectionnel de l'énergie dans le circuit du rotor.

La vitesse du générateur peut être synchronisée à une valeur supérieure ou inférieure de 30 % à la vitesse synchrone.

- De ce fait, la capacité de récupération d'énergie est exceptionnelle et les charges de fatigue sur les sous-systèmes mécaniques sont négligeables.
- Le convertisseur de puissance sert de solution de lissage pour l'intégration au réseau et la réserve de puissance réactive côté réseau. Par conséquent, les démarreurs progressifs et les bancs de condensateurs ne sont pas nécessaires.
- Le convertisseur de puissance offre en outre une capacité dynamique et une fiabilité supérieure en atténuant les instabilités du système électrique, contrairement au GADA-R3E [14].

II.8.1.2.2 Inconvénients de générateurs à induction à double alimentation avec réducteur à un étage et à trois étages

- Augmentation de l'investissement dans l'installation du système et de la complexité de sa conception
  due à l'intégration du convertisseur électronique de puissance.
- Incompatible avec les industries éoliennes offshore en raison des besoins de maintenance constants [14].

II.8.1.3 Système SCEE à entraînement direct avec un générateur synchrone à excitation électrique (ED-GSEE)

Le système SCEE à vitesse variable sans engrenage, équipé d'un GSEE et d'un convertisseur à pleine charge, est illustré à la figure II.12. La conception du ED-GSEE repose sur un rotor associé au système de champ et doté d'une excitation en courant continu.

Le générateur doit être configuré avec un nombre croissant de pôles afin d'améliorer le système sans réducteur. De ce fait, le volume et le poids de ce générateur à faible vitesse sont nettement supérieurs à ceux des générateurs à réducteur à trois étages, à savoir le GADA-R1E et le GADA-R3E. Les bagues collectrices et les balais sont indispensables dans le ED-GSEE pour alimenter les enroulements, ce qui accroît les besoins en maintenance du système. De plus, l'enroulement de champ entraîne des pertes de puissance, ce qui détériore les performances du système.

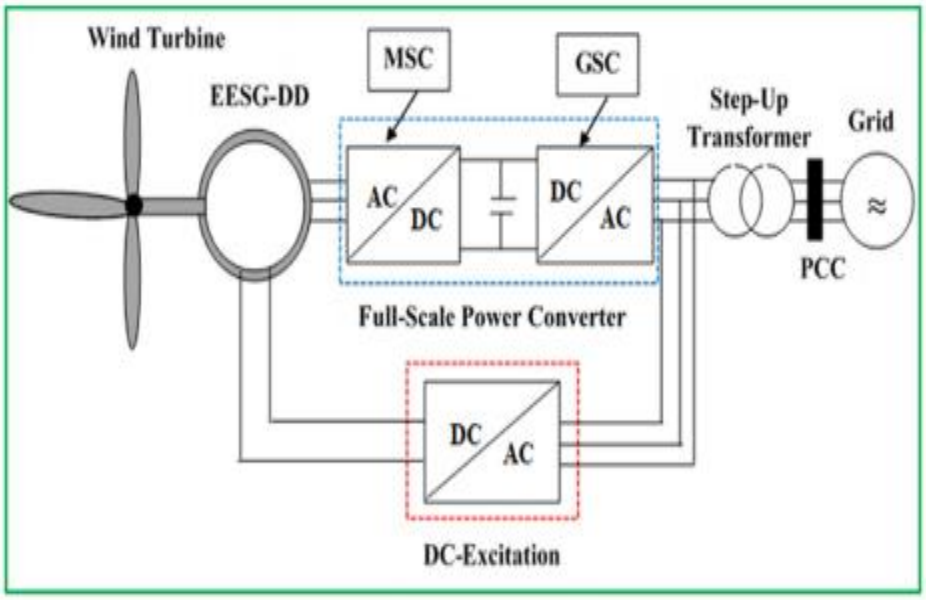


Figure II.12: Structure d'un système de captage d'énergie éolienne sans engrenage équipé d'un GSEE et d'un convertisseur à pleine charge [19].

II.8.1.3.1 Avantages de système SCEE à entraînement direct avec un générateur synchrone à excitation électrique

- Le PEC à grande échelle lui permet de gérer entièrement la fréquence et l'amplitude de la tension côté machine.
- Génère une puissance électrique relativement élevée par rapport aux SCEE GADA
- Génère moins de bruit du fait de l'absence d'engrenages.

II.8.1.3.2 Inconvénients de système SCEE à entraînement direct avec un générateur synchrone à excitation électrique

- Coût d'installation élevé en raison de l'utilisation de composants électroniques onéreux.
- Nécessite l'utilisation d'une source de courant continu avec balais et bagues collectrices pour l'excitation de l'enroulement du rotor.
- Dimensions géométriques plus importantes et poids élevé du générateur.

II.8.1.4 Le générateur à aimants permanents à réducteur à un étage et le générateur à aimants permanents à entraînement direct (R1E-GSAP et ED-GSAP)

La configuration d'un GSAP raccordé au réseau (à réducteur à un étage et sans réducteur) avec un générateur éolien et un convertisseur de puissance à plage complète, comprenant le convertisseur côté machine électrique (CME), le condensateur de liaison CC et le CGE, est illustrée à la figure II.13. Contrairement aux SCEE basés sur des GADA, pour lesquels le convertisseur de puissance est relié au circuit du rotor afin de générer de la puissance de glissement, les SCEE basés

sur des GSAP utilisent un convertisseur de puissance connecté entre les bornes du stator de l'éolienne et le réseau électrique pour acheminer toute l'énergie électrique produite. Par conséquent, le rendement du convertisseur de puissance est porté de 30 % à 100 %. Le prix commercial d'un convertisseur de puissance dans les GADA et les SCEE équipés d'un convertisseur de puissance à vitesse variable sur toute la plage, y compris ceux basés sur des GSAP et des GSEE, représente respectivement près de 5 % et 7 à 12 % (selon la version de la technologie de conversion) du prix total de chaque SCEE [8]. Un convertisseur de puissance à pleine charge (100 %) permet une plage de vitesse variable complète (0 %–100 %) et la puissance générée par les SCEE à PMSG est extrêmement élevée. Comparé aux groupes de générateurs éoliens, le PMSG est le plus performant dans les SCEE à vitesse variable équipés de convertisseurs de puissance à pleine échelle.

De plus, le système SCEE à GSAP sans engrenage est à ce jour la technologie la plus prometteuse. Contrairement à la technologie GSEE à entraînement direct, le système GSAP sans engrenage ne nécessite pas d'activation externe ni de bagues collectrices, ce qui lui confère une meilleure capacité de récupération d'énergie et de meilleures performances dynamiques par rapport à l'GSEE. Par ailleurs, par rapport aux SCEE à engrenages à un ou trois étages, l'avantage du ED-GSAP réside dans le fait que le bruit de la turbine est minimisé, puisqu'il s'agit d'une technologie sans engrenages dotée d'un système d'activation indépendant. Cependant, jusqu'à récemment, il n'était pas envisageable pour l'industrie éolienne de concevoir des éoliennes avec un diamètre extérieur accru en raison des complications logistiques et technologiques liées à la construction, qui limitent le développement des SCEE sans engrenage à haute puissance (MW).

Le transformateur élévateur peut être évité dans les SCEE GSAP en ajustant les convertisseurs de puissance à une échelle MT. En général, les principaux avantages et inconvénients des technologies GSAP à convertisseur de puissance à grande échelle sont les suivants :

Rendement de récupération d'énergie supérieur et absence de charge de fatigue sur les sous-systèmes mécaniques grâce à la mise en œuvre d'une application à pleine charge (0–100 %) [14].

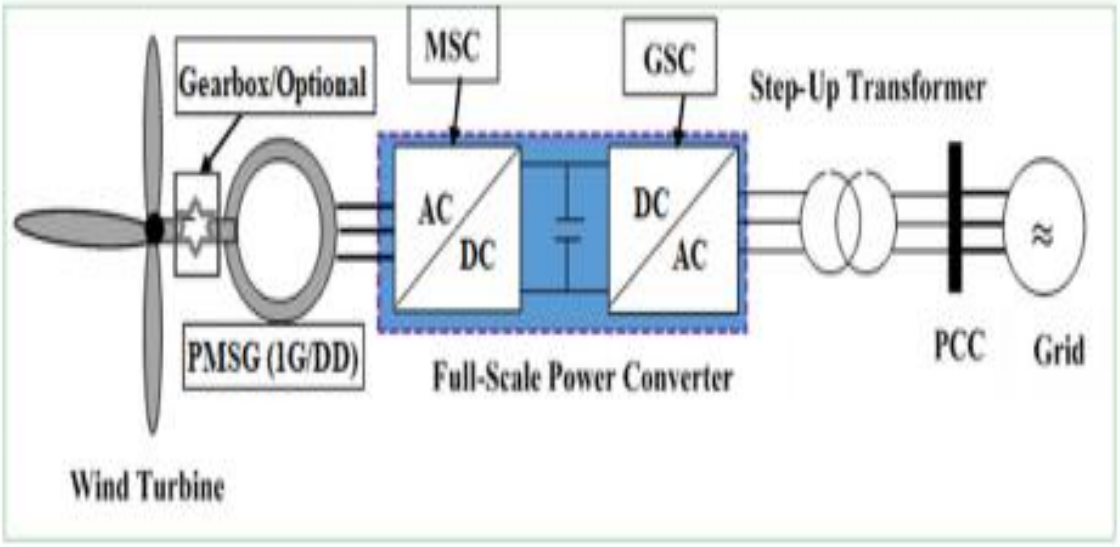


Figure II 13 Configuration d'un système de production d'énergie éolienne équipé d'un générateur à aimants permanents (GSAP).

II.8.1.4.1 Avantages de générateur à aimants permanents à réducteur à un étage et le générateur à aimants permanents à entraînement direct

- La régulation autonome de la puissance active et réactive contribue à maintenir une capacité FRT exceptionnelle.
- La machine électrique est entièrement déconnectée du réseau. Les convertisseurs de puissance garantissent en outre une intégration en douceur au réseau [14].

II.8.1.4.2 Inconvénients de générateur à aimants permanents à réducteur à un étage et le générateur à aimants permanents à entraînement direct

- En raison du convertisseur de puissance à pleine échelle, les coûts de démarrage et l'espace nécessaire dans la nacelle, ainsi que la complexité de l'ensemble du système, augmentent.
- L'augmentation des pertes de puissance dans le convertisseur détériore les performances de l'ensemble du système d'alimentation.
- La complexité de la conception du système de commande numérique pour les convertisseurs de puissance s'accroît.

II.9: Conclusion

L'énergie éolienne est aujourd'hui un secteur mature, solide et en pleine expansion. L'éolienne à axe horizontal (HAWT) s'est imposée comme la technologie dominante pour la production d'électricité à grande échelle, grâce à son rendement aérodynamique et à son rendement énergétique supérieurs. Malgré certains défis tels que l'impact visuel, les nuisances sonores et l'intermittence inhérente aux ressources éoliennes.

Les progrès constants en matière de modélisation aérodynamique fondés sur la limite de Betz et l’optimisation de la courbe de puissance, associés aux innovations dans le domaine de la science des matériaux et de l’électronique de puissance, améliorent progressivement le rendement, la fiabilité et la maniabilité des turbines. Les systèmes modernes à vitesse variable, équipés d’algorithmes MPPT sophistiqués, de stratégies de commande vectorielle et de techniques de commande directe de la puissance pour les machines à aimants permanents et à double alimentation, rendent l’énergie éolienne de plus en plus compétitive par rapport aux sources de production conventionnelles. Le développement des parcs éoliens offshore, des plateformes flottantes et des îlots énergétiques hybrides élargit encore le potentiel de déploiement de cette ressource renouvelable abondante.

Chapitre III: Modélisation et Simulation de la chaine de conversion éolienne

III.1 Introduction

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie renouvelables les plus utilisées au monde grâce à son faible coût, à son rendement élevé, aux progrès technologiques et même à sa capacité à s'intégrer dans les zones urbaines. Le système d'éolienne à vitesse variable optimise la production d'énergie grâce à des convertisseurs électriques qui isolent la fréquence du réseau de la fréquence de fonctionnement de l'éolienne.

Ce chapitre est consacré à la modélisation d'une éolienne basée sur un générateur synchrone à aimants permanents connecté au réseau électrique via un onduleur triphasé. Il fournit un modèle détaillé des différents composants qui constituent le système : l'éolienne, GSAP, le redresseur à diodes, l'hacheur et l'onduleur. Il aborde également un système de commande MPPT permettant de suivre le point de puissance maximale. L'ensemble du système sera validé par simulation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK.

III.2 Energie cinetique du vent

L'éolienne est un système intégré qui convertit le mouvement du vent (son énergie mécanique) en électricité. Trois facteurs déterminants influent sur la quantité d'énergie mécanique que le vent fournit à la turbine : la densité de l'air, la surface du cercle balayé par les pales et la vitesse du vent. La densité et la vitesse dépendent directement du site géographique et du climat de la centrale.

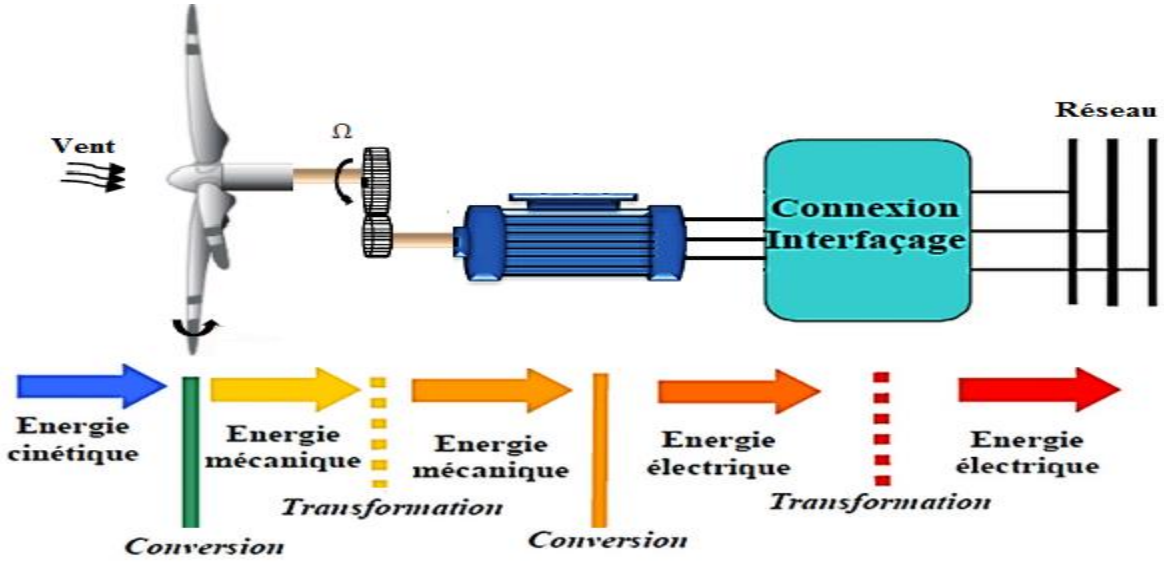


Figure III.1: Schéma de principe d'un système de conversion de l'énergie éolienne

III.2.1 Loi de BETZ

La puissance du vent est :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} S_{éolienne}\, \rho v^3 \qquad \text{(Ⅲ-1)}$$

Avec $S_{éolienne}$ la surface balayée par l'éolienne, ρ la masse volumique de l'air (1.25kg /m3) et v la vitesse du vent.

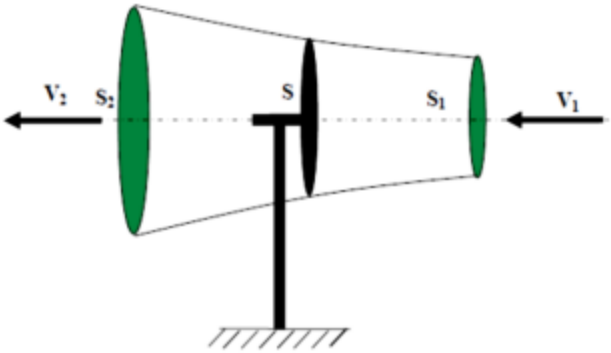


Figure III.2: théorie de Betz : schéma de principe

Selon le théorème de Betz, l'énergie maximale que le rotor peut récupérer à partir du vent représente environ 59 % de l'énergie venteuse totale. La puissance aérodynamique est alors égale à l'énergie éolienne multipliée par un facteur de puissance qui caractérise la turbine [15] :

$$P_{éolienne} = C_p P_{vent} \qquad \text{(Ⅲ-2)}$$

Selon la théorie de Betz, le coefficient de performance (C_p) possède une limite maximale théorique qui ne peut être dépassée, estimée à 16/27 (soit environ 59,3%). Il convient de noter que la valeur réelle de C_p varie d'une turbine à l'autre, car elle est influencée dynamiquement à la fois par l'angle d'inclinaison des aubes (β) et par le rapport de vitesse en bout d'aube (λ).

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \qquad \text{(Ⅲ-3)}$$

Avec R le rayon des pales de l'éolienne, Ω la vitesse de rotation de l'éolienne et v la vitesse du vent.

Le coefficient de puissance Cp est souvent issu de mesures pratiques.

Le coefficient de puissance est souvent modélisé par l'expression analytique suivante :

$$C_p = (\lambda, \beta) = \left(\frac{C_2}{\lambda_t} - C_3\beta - C_4\right) e^{\frac{-C_5}{\lambda_i}} + C_6\lambda \qquad \text{(Ⅲ-4)}$$

$$\frac{1}{\lambda_i} = \left(\frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3+1}\right) \qquad \text{(Ⅲ-5)}$$

C1=0.5, C2=116, C3=0.4, C4=5, C5=-21, C6=0.0068

Avec β exprimé en degrés.

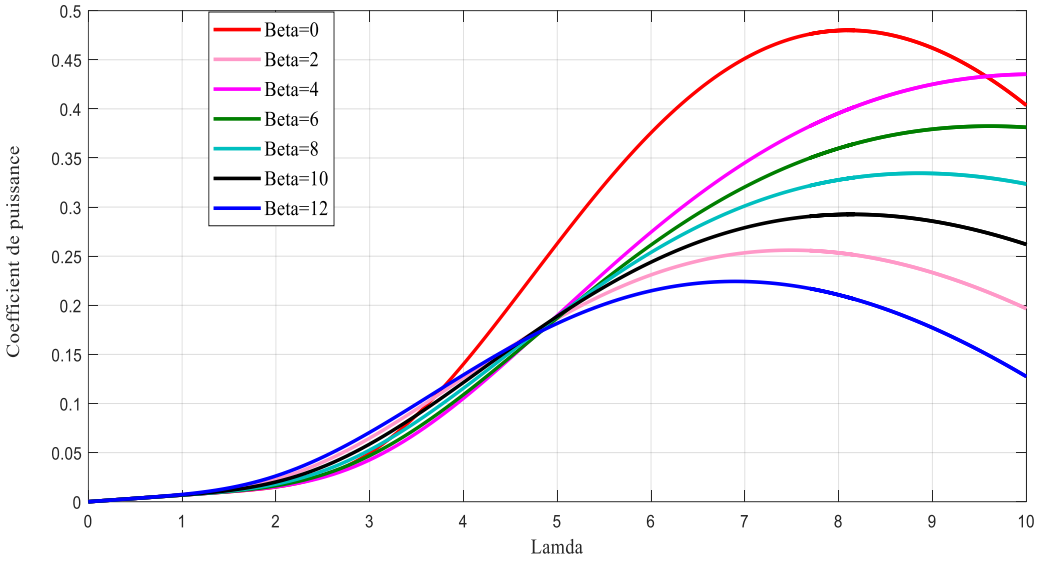


Figure III.3: Coefficient de puissance Cp

La figure III-3 représente le coefficient de puissance Cp (calculé à partir de l'équation Cp (λi, βi) en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales βi. On remarque que si, pour un angle constant βi, on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à λ optimal à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. La figure III-3 montre le λoptimal correspondant à un angle d'inclinaison des pales βi.

Cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir λ = λoptimal, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur avec les variations de vitesse du vent (équation Ⅲ-3).

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient λ varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (Généralement la vitesse nominale de fonctionnement).

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande, ce qui entraîne un surcoût par rapport à la vitesse fixe. La littérature donne un gain de puissance extraite variant
Entre 2% et 38% [16].

III.2.2 Model de multiplicateur

Le rôle du multiplicateur de générateur consiste à convertir la vitesse mécanique de la turbine en une vitesse adaptée aux exigences du générateur, ainsi qu'à convertir le couple aérodynamique en un couple adapté au multiplicateur, conformément aux équations mathématiques suivantes :

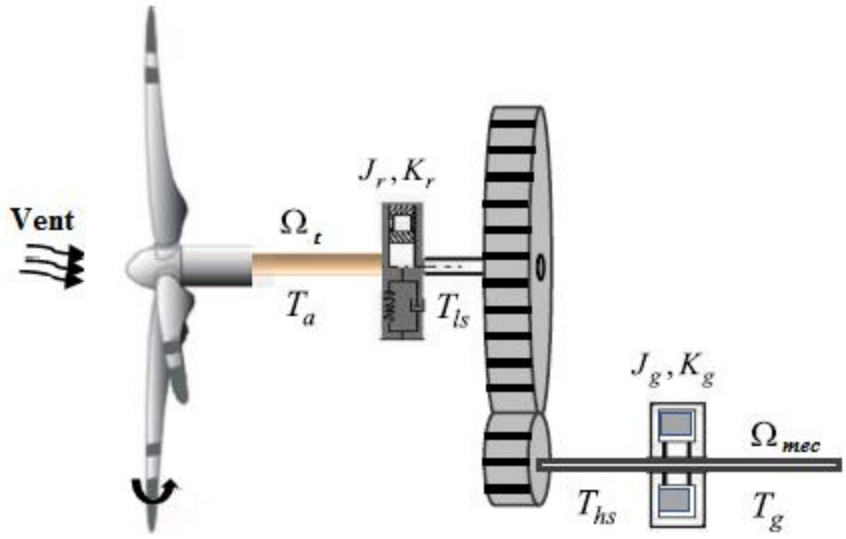


Figure III.4: Schéma de la turbine éolienne [6].

Avec :

$$G=\frac{C_{aer}}{C_g} \qquad (Ⅲ\text{-}6)$$

$$G=\frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t} \quad (\text{III-7})$$

C_{aer}: Couple aérodynamique

C_g: Le couple issu du multiplicateur

Ω_{mec} : La vitesse mécanique transmise à la sortit du multiplicateur a la génératrice

Ω_t : La vitesse de la turbine

III.2.3 Equation dynamique de l'arbre de transmission

Le modelé mécanique proposé est de considérer l'inertie totale J constituée de l'inertie de la Turbine reportée sur le rotor de la génératrice.

$$J=\frac{J_{turbine}}{G^2} \quad (\text{III-8})$$

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse Mécanique à partir du couple mécanique totale (Cméc) appliqué au rotor :

$$C_{em} = J\frac{d\Omega_{mec}}{dt} \quad (\text{III-9})$$

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 :

$$C_{mec=}\, C_g - C_{em} - C_f \quad (\text{III-10})$$

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

$C_{g:}$: Le couple issu du multiplicateur.

$C_{f:}$ Le couple résistant duaux frottements.

$$C_{f=} f.\Omega_{mec} \quad (\text{III-11})$$

Avec :

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique

III.3 Méthode de recherche du point maximum de puissance

Nous allons présenter dans ce point, deux stratégies de commande de la turbine éolienne en zone

2(zone d'extraction de la puissance maximale) : commande directe de la vitesse ou commande avec asservissement de vitesse où on contrôle la vitesse mécanique par un régulateur PI et commande indirecte de la vitesse mécanique ou commande sans asservissement de vitesse où le couple électromagnétique est contrôlé de façon à poursuivre la courbe du rendement maximal.

Le système doit trouver la puissance maximale ce qui équivaut à la recherché de la vitesse de rotation optimale [6]. Dans la figure suivante, les courbes caractéristiques de l'éolienne représentent la puissance et la vitesse de rotation de l'éolienne

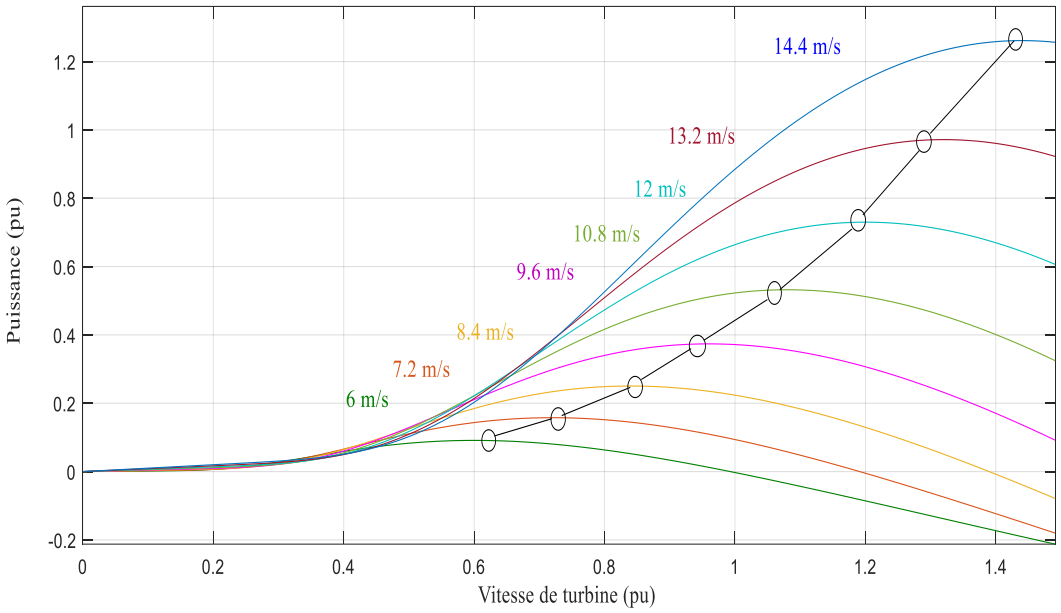


Figure III.5: Caractéristique de l'éolienne par à port à la vitesse du vent

Chaque courbe représente une vitesse de vent spécifique (V_v). L'ensemble des sommets de ces courbes détermine les points de fonctionnement optimaux, ce qui trace la courbe de puissance maximale exprimée par l'équation suivante [17]:

$$P_{opt} = \frac{1}{2}\,\rho.C_p^{opt}(\lambda_{opt}).S.V_v^3 \qquad \text{(III-12)}$$

Pour garantir un rendement optimal des turbines, cette courbe doit être suivie avec une grande précision grâce à une technique de contrôle spécifique appelée Maximum Power Point Tracking (MPPT), qui est la technique adoptée dans la zone II.

III.4 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP)

L'une des pièces maîtresses d'une chaine de conversion d'énergie éolienne est la génératrice. A l'heure actuelle, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevés, les machines à aimants sont de plus en plus utilisées. Lorsque leur nombre de pôles est élevé, leurs puissances peuvent atteindre quelques centaines de kilowatts. Toutefois, Elles sont surtout utilisées pour les petites et moyennes puissances de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts. Dans ce cas, l'aimant permanent permet d'obtenir, à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que pour les machines à rotor bobiné. Par ailleurs, l'emploi d'aimants permanents annule les pertes par effet joule au rotor et augmente le rendement [18].

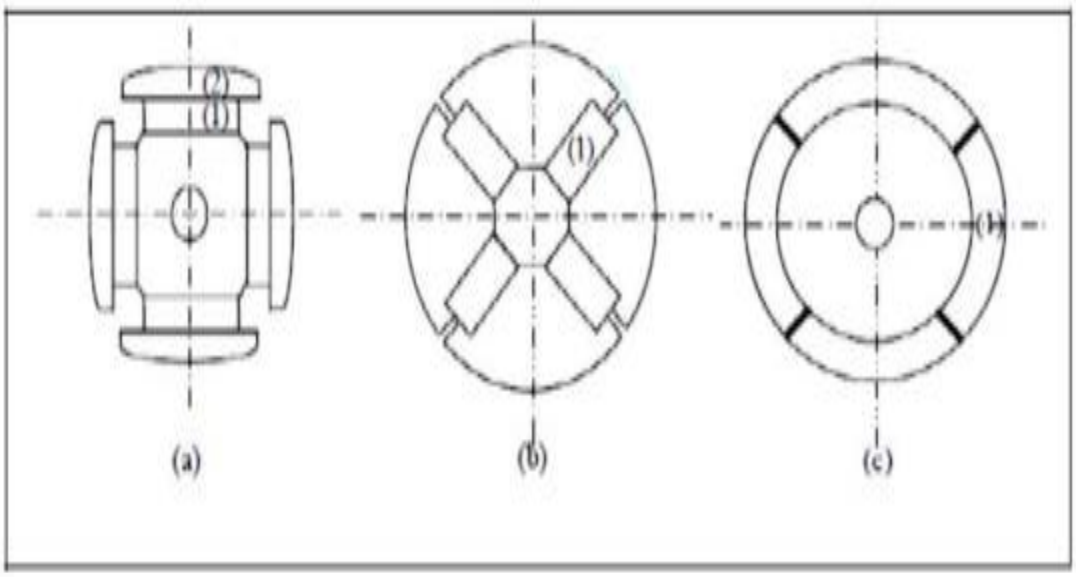


Figure III.6: Différents types de rotors d'une MSAP [13]

(a) aimants permanents (1) et pièce polaire saillante (2).

(b) aimants permanents (1) noyés.

(c) aimants permanents (1) distribués sur la surface du rotor.

III.4.1 Eolienne à base de la Génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) connectée au réseau électrique

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables

Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau. Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que celui connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau. Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration [18].

III.4.2 Modélisation de la GSAP

Le modèle mathématique de la machine synchrone est établi sur la base de certaines hypothèses simplificatrices essentielles :

- Absence de saturation dans le circuit magnétique.
- Distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator.
- Hystérésis, courants de Foucault et effet de peau négligés.
- Effet d'encochage négligeable.
- Résistance des enroulements ne variant pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

III.4.3 Equations électriques

Les équations électriques des machines électriques triphasées dans un repère fixe lié au stator sont décrites par [9] :

$$\begin{cases} V_a = R_a i_a + \frac{d\phi_a}{dt} \\ V_b = R_b i_b + \frac{d\phi_b}{dt} \\ V_c = R_c i_c + \frac{d\phi_c}{dt} \end{cases} \quad \text{(Ⅲ-17)}$$

Où :

$[V_s] = [V_a\ V_b\ V_c]^t$: Vecteur de tension des phases statoriques.

$[i_s] = [i_a\ i_b\ i_c]^t$: Vecteur courant des phases statoriques.

$[\phi_s] = [\phi_a\ \ \phi_b\ \ \phi_c]^t$: Vecteur des flux totaux traversent les bobines statoriques.

La forme matricielle du système d'équations de l'enroulement statorique est :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = [R_s] \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_a \\ \phi_b \\ \phi_c \end{bmatrix} \quad \text{(Ⅲ-18)}$$

Ou bien on peut réécrire sous la forme suivante :

$$[\phi_s]_{abc} = [R_s]\,[i_s]_{abc} + \frac{d}{dt}\,[\phi_s]_{abc} \quad \text{(Ⅲ-19)}$$

Où : $[R_s] = \begin{bmatrix} R_a & 0 & 0 \\ 0 & R_b & 0 \\ 0 & 0 & R_c \end{bmatrix}$: Matrice des résistances statoriques.

III.4.4 Equation magnétiques

Les flux statoriques peuvent être décomposés en flux auto-induits par les enroulements du stator et ceux dû au flux des aimants permanents, tel que [19] :

$$[\varphi_s]_{abc} = [L_{ss}]\,[i_s]_{abc} + [\varphi_f] \quad \text{(Ⅲ-20)}$$

Où :

$$[L_{ss}] = [L_{s0}] + L_{s1}(\theta) \quad \text{(Ⅲ-21)}$$

Avec :

$$[L_{s0}] = \begin{bmatrix} L_{s0} & M_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & L_{s0} & M_{s0} \\ M_{s0} & M_{s0} & L_{s0} \end{bmatrix} \quad \text{(Ⅲ-22)}$$

Où : $[M_{s0}]$: Inductance mutuelle entre deux phases statoriques.

$[L_{s0}]$: Inductance propre d'une phase statorique.

$[L_{ss}]$: Matrice des inductances statoriques.

$[\varphi_f]$: Flux des aimants permanents.

Et :

$$[L_{s1}(\theta)] = [L_{s1}]\begin{bmatrix} \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) \\ \cos(2\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad \text{(Ⅲ-23)}$$

Avec : θ : Position angulaire du rotor par rapport au stator.

III.4.5 Equation mécanique

L'évolution dynamique de la machine est représentée par l'équation mécanique suivante :

$$J\frac{d\Omega_g}{dt} = C_t - C_{em} - f\Omega_g \quad \text{(Ⅲ-24)}$$

III.5 Equations électriques et magnétiques de la GSAP dans le repère de Park

Dans un souci de simplification et pour passer de la représentation triplet (abc) à la représentation binomiale (dq0), nous avons utilisé dans ce cas la transformation Park modifiée, qui correspond essentiellement au produit de la matrice de rotation de Park par la matrice de transformation de Concordia.

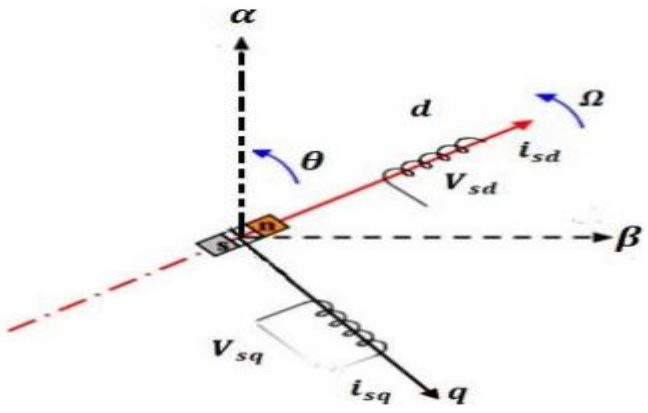


Figure III.7: Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park [7]

La matrice de la transformation de Park pour le stator est donnée comme suit :

$$p(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(Ⅲ-25)}$$

La matrice de la transformation de Park inverse pour le stator est donnée comme suit :

$$[p(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} -\cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(2\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos(2\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(Ⅲ-26)}$$

Les équations de tension seront de cette forme :

$$[V_{dq0}] = [p(\theta)]\,[V_{abc}] \quad \text{(Ⅲ-28)}$$

$$[V_{abc}] = [p(\theta)]^{-1}[V_{dq0}] \quad \text{(Ⅲ-29)}$$

III.5.1 Equations électriques

Les équations statoriques de la GSAP dans le référentiel de Park lié au rotor sont décrites par [20]:

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + \frac{d\varphi_{sd}}{dt} - p\Omega_g \varphi_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + \frac{d\varphi_{sq}}{dt} + p\Omega_g \varphi_{sd} \end{cases} \quad \text{(Ⅲ-30)}$$

III.5.2 Equations magnétiques

Les équations de flux magnétiques sont données comme suit [19] :

$$\begin{cases} \varphi_{sd} = L_d i_{sd} + \varphi_f \\ \varphi_{sq} = L_q i_{sq} \end{cases} \quad \text{(Ⅲ-31)}$$

Où : L_d et L_q : Inductances direct et en quadrature, elles sont supposées indépendantes de θ.

En remplaçant les expressions des flux dans l'équation (Ⅲ.30), on aboutit à :

$$\begin{cases} V_{sd} = R_s i_{sd} + L_d \frac{d}{dt} i_{sd} - p\Omega_g L_q i_{sq} \\ V_{sq} = R_s i_{sq} + L_q \frac{d}{dt} i_{sq} + p\Omega_g L_d i_{sd} + p\Omega_g \varphi_f \end{cases} \quad \text{(Ⅲ-32)}$$

III.5.3 Expression du couple électromagnétique

Selon Park modifié, l'expression de la puissance absorbée s'écrit comme suit [19] :

$$P_a = (V_{sd} i_{sd} + V_{sq} i_{sq}) \quad \text{(Ⅲ-33)}$$

En remplaçant V_{sd} et V_{sq} par leur expression (Ⅲ.40), on aura :

$$P_a(t) = \left[(R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2)\right] + \left[i_{sd}\frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq}\frac{d\varphi_{sq}}{dt}\right] + \left[\varphi_{sd}i_{sq} - \varphi_{sq}i_{sd}\right]\omega_e \quad (\text{Ⅲ-34})$$

Avec :$\omega_e = p\,.\,\Omega_g$: Pulsation électrique

Où :

Le premier terme $R_s(i_{sd}^2 + i_{sq}^2)$: Pertes par effet Joule.

Le deuxième terme $i_{sd}\frac{d\varphi_{sd}}{dt} + i_{sq}\frac{d\varphi_{sq}}{dt}$: Variation de l'énergie magnétique emmagasinée.

Le troisième terme $(\varphi_{sd}i_{sq} - \varphi_{sq}i_{sd})$: Puissance électromagnétique.

On peut écrire :

$$C_{em} = p\big(L_d - L_q\big)i_{sd}i_{sq} + p\varphi_f i_{sq} \quad (\text{Ⅲ-35})$$

Dans les GSAP avec rotor à pôles lisses, les inductances statoriques sur les deux axes d et q sont égales ($L_d = L_q$) et l'expression du couple électromagnétique devient alors :

$$C_{em} = p(\varphi_f i_{sq}) \quad (\text{Ⅲ-36})$$

III .6 La Stratégie P&O

L'énergie produite par le système éolien varie en fonction des variations de la vitesse du vent, ce qui peut affecter son fonctionnement. C'est raison pour laquelle diverses méthodes MPPT sont utilisées afin de faire fonctionner le système éolien avec un rendement maximal [21]. La méthode Perturbation et observation (P&O) est la technique MPPT la plus couramment utilisée dans les systèmes éoliens en raison de sa simplicité. Son principe repose essentiellement sur une perturbation périodique (augmentation ou diminution) de la vitesse du rotor de l'éolienne par petits incréments, puis sur l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance de sortie P du générateur PMSG, en comparant la valeur actuelle de la puissance à sa valeur précédente. Cependant, pour faire varier la puissance mécanique en modifiant la vitesse de rotation, il faut utiliser des capteurs mécaniques, ce qui rend le système trop complexe et trop coûteux. Afin de le simplifier, nous utilisons la puissance électrique équivalente en surveillant la puissance de sortie du générateur, puis en ajustant la tension d'entrée du hacheur en contrôlant son rapport cyclique.

Au point de puissance maximale, on a :

$$\frac{dP}{d\Omega} = 0 \quad (\text{Ⅲ-37})$$

En appliquant la règle de dérivation en chaîne :

$$\frac{dP}{d\Omega} = \frac{dP}{dV}\frac{dV}{d\Omega} = 0 \qquad (\text{III-38})$$

La vitesse de rotation du MSAP est proportionnelle à sa tension de phase ; on a donc :

$$\frac{dV}{d\Omega} > 0 \qquad (\text{III-39})$$

Alors :

$$\frac{dP}{d\Omega} = 0 \Leftrightarrow \frac{dP}{dV} = 0 \qquad (\text{III-40})$$

Au MMP, on a dP / dV = 0. Si l'on se trouve dans la région gauche (dP / dV > 0), il faut augmenter la tension pour atteindre le MPP. Si l'on se trouve dans la région droite (dP / dV < 0), il faut diminuer la tension pour atteindre le MPP (figure III.8).

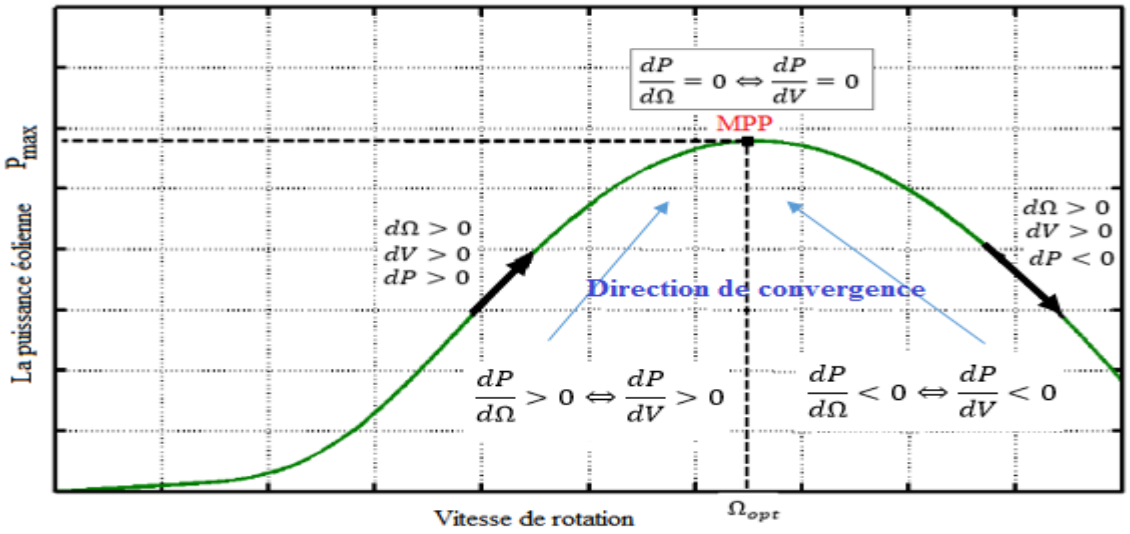


Figure III.8: Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.

Il est clair maintenant que cette méthode ne nécessite aucune connaissance préalable des paramètres mécaniques ou électriques du système éolien. Elle a besoin seulement de deux capteurs qui mesurent la tension et le courant à l'entrée de hacheur Boost. Figure III-9 représente l'algorithme P&O utilisé :

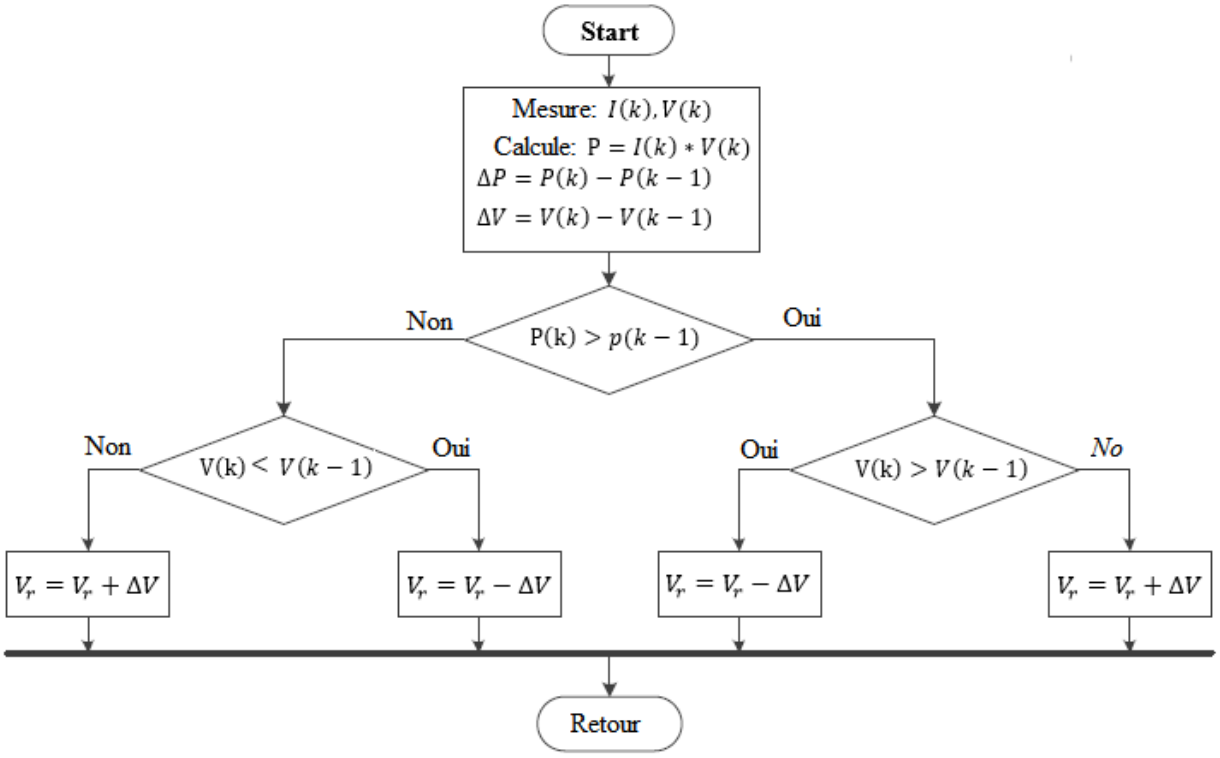


Figure III.9: Algorithme P&O

III .7 Modélisation de DC/DC boost converter

La dynamique du convertisseur en mode courant continu (CCM) peut être décrite à l'aide des équations de Kirchhoff pour le circuit représenté dans Figure III. 10.

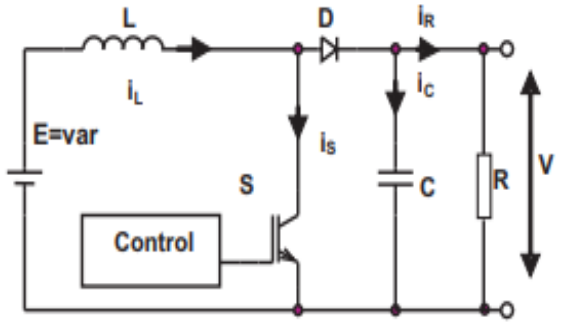


Figure III.10: Circuit électrique convertisseur élévateur.

Les variables d'état sont le courant traversant l'inductance L et la tension continue V.

La commande ajuste le rapport cyclique de manière à augmenter la tension continue du redresseur, tout en maintenant un rapport de puissance constant proche de l'unité. Le courant de l'inductance est

$$\frac{di_l}{dt} = -(1-u)\frac{V}{L} + \frac{E}{L} \qquad (\text{Ⅲ-41})$$

où E peut être n'importe quelle tension continue d'entrée (par exemple, provenant d'un redresseur ou d'une batterie) et V est la tension continue de sortie. Normalement, dans le cas d'un circuit élévateur, V est au moins égale ou supérieure à E. L'équation de la tension aux bornes du condensateur devient alors

$$\frac{dV}{dt} = -(1-u)\frac{i_L}{C} - \frac{V}{RC} \qquad (\text{Ⅲ-42})$$

III .8 La commande M.L.I

La technique de modulation de largeur d'impulsion (MLI) repose essentiellement sur la comparaison entre deux signaux : l'un appelé « signal modulé » et l'autre « signal porteur ». Afin de garantir des performances optimales et d'éliminer les harmoniques gênantes, nous avons choisi d'appliquer la méthode de « modulation de largeur d'impulsion sinusoïdale-triangulaire » pour contrôler nos convertisseurs. Cette méthode repose sur la comparaison d'un signal triangulaire à haute fréquence (le signal porteur) avec un signal sinusoïdal ayant la même fréquence que le signal de référence à produire (le signal modulé). Les caractéristiques de ces deux signaux sont définies selon les critères suivants [9] :

- La modulante est une onde sinusoïdale V_{ref}(t) d'amplitude Ur et de fréquence f_r.
- La porteuse est une onde triangulaire ou en dents de scie V_p(t), d'amplitude |Up| ≥ |Ur|, et d'une fréquence fp≫fr.
- L'indice de modulation $m = \frac{F_p}{F_r}$
- Le coefficient de réglage en tension r, qui est égal au rapport de l'amplitude de la tension de référence à celle de la porteuse $r = \frac{U_r}{U_p}$

Le principe de cette commande est que la valeur de la fonction F qui correspond à la première cellule de commutation soit égale à 1 si Up≥ Ur sinon elle prend la valeur zéro. La valeur des autres fonctions se déduit facilement par la complémentarité qui existe entre deux cellules d'un même bras et le décalage de $\frac{2\pi}{3}$ pour deux phases qui se suivent [9].

III .9 Redresseur à diode

Un redresseur à diodes est utilisé pour la conversion AC/DC et ne laisse passer le courant que dans le sens de l'entrée vers la sortie. Un redresseur à double alternance convertit les demi-ondes positives et négatives de la forme d'onde sinusoïdale d'entrée en demi-ondes positives de la même forme d'onde, ce qui donne essentiellement l'amplitude absolue du courant alternatif d'entrée. Un filtre de sortie est alors nécessaire pour conditionner la sortie en courant continu. En réalité, la sortie contient une certaine quantité d'ondulation, mais le filtrage permet d'atteindre un objectif spécifique de réduction de la distorsion à haute fréquence. La tension de sortie est calculée par [22]:

$$V_{Out} = \frac{2.V_{peak}}{\pi} \qquad (\text{III-43})$$

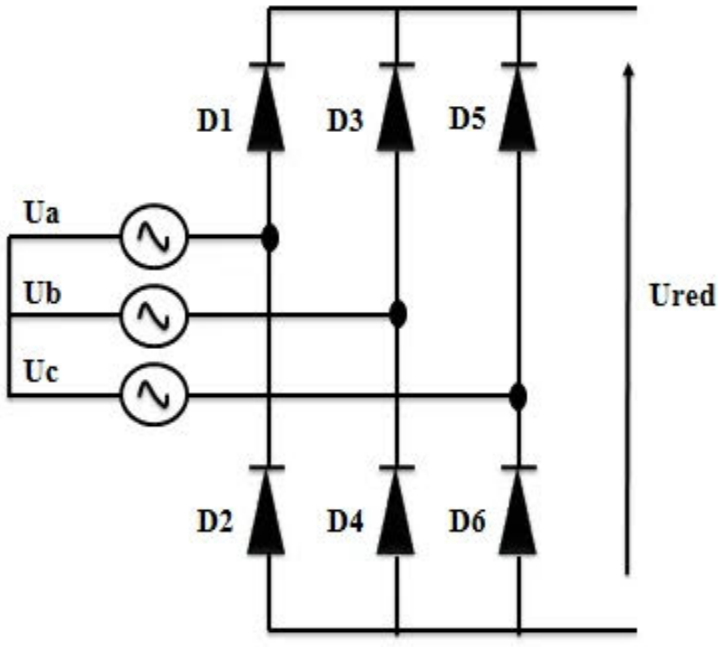


Figure III.11: schéma de redresseur à diode

III .10 Modélisation de l'onduleur triphasé

Le fonctionnement de l'onduleur principal se limite à la conversion du courant continu en courant alternatif ; il est alimenté par une source de tension continue. De plus, dans le domaine de l'énergie éolienne, les signaux générés par l'onduleur sont de type sinusoïdal.

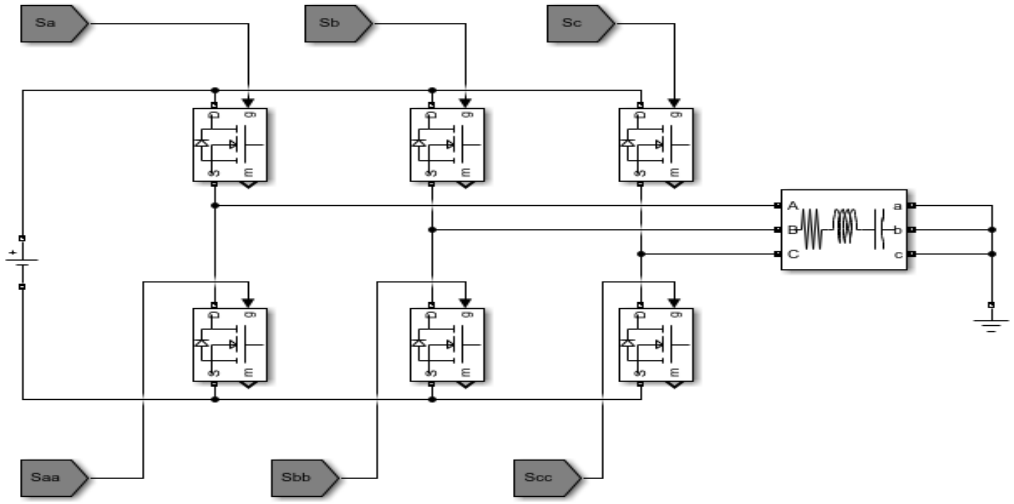


Figure III.12: Schéma de l'Onduleur connecté à réseau

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques $S_i = (i = a, b, c)$. On appelle $T_i \; et \; T'_i$ les transistors (supposée des interrupteur idéaux), on a

- $si \; S_i = +1 \; alors \; T_i \; est \; fermé \; et \; T'_i est \; ouver,$
- $si \; S_i = -1 \; alors \; T_i \; est \; ouvert \; et \; T'_i est \; fermé,$

Dans ces conditions, on peut écrire les tensions V_{in0} en fonction des signaux de commande $S_i = (i = a, b, c)$:

$$\begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{bn0} \\ V_{cn0} \end{bmatrix} = \frac{V_{cd}}{2} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \qquad (\text{Ⅲ-44})$$

Les tensions composées U_{ab}, U_{bc}, U_{ca} sont définies par les relations suivantes :

$$\begin{cases} V_{ab} = \mathrm{V}_{an} - V_{bn} \\ V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} \\ V_{ca} = V_{cn} - V_{an} \end{cases} \qquad (\text{Ⅲ-45})$$

En considérant un système triphasé équilibré $(V_{an} + V_{bn} + V_{cn})$, on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ab} - V_{ca}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(V - V) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(V_{ca} - V_{bc}) \end{cases} \quad \text{(Ⅲ-46)}$$

Ou encore :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3}(2V_{an0} - V_{bn0} - V_{cn0}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3}(-V_{an0} + 2V_{bn0} - V_{cn0}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3}(-V_{an0} - V_{bn0} + 2V_{cn0}) \end{cases} \quad \text{(Ⅲ-48)}$$

Alors :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_{an0} \\ V_{bn0} \\ V_{cn0} \end{bmatrix} \quad \text{(Ⅲ-49)}$$

En remplaçant 1dans 2, on obtient les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande $S_i(i = a, b, c)$ et on aboutit au modèle mathématique du convertisseur [23]:

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{6}\begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad \text{(Ⅲ-50)}$$

III .11 Modélisation du réseau électrique

Notre réseau électrique est modélisé par les équations suivantes [24] :

$$E_a = V_m.\sin(\omega t) \quad \text{(Ⅲ-51)}$$

$$E_b = V_m.\sin(\omega t - \frac{2}{3}\pi) \quad \text{(Ⅲ-52)}$$

$$E_c = V_m.\sin(\omega t - \frac{4}{3}\pi) \quad \text{(Ⅲ-53)}$$

Avec :

$V_m = \sqrt{2}.V$

Tel que :V_m est la tension maximale, V : Tension efficace

III.12 Modélisation du filtre (RL)

L'insertion d'un filtre RL permet de garantir la conformité de l'énergie injectée dans le réseau en réduisant le taux de distorsion harmonique (THD) à une valeur inférieure à 5 %, neutralisant ainsi les perturbations dues au découpage. Quant à l'évaluation des courants du filtre côté réseau, elle repose directement sur la résolution de la loi des mailles :

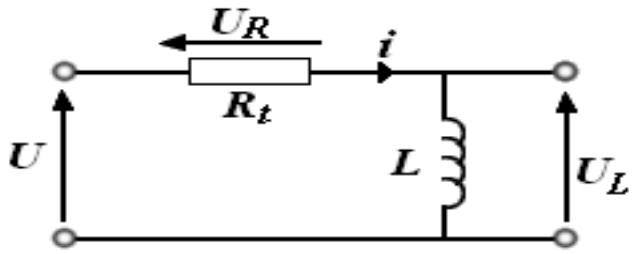


Figure III.13: schéma de filtre RL.

$$\begin{cases} V_{ondA} - R_f I_a - \frac{1}{L_f}\frac{dI_a}{dt} - V_a = 0 \\ V_{ondB} - R_f I_b - \frac{1}{L_f}\frac{dI_b}{dt} - V_b = 0 \\ V_{ondC} - R_f I_c - \frac{1}{L_f}\frac{dI_c}{dt} - V_c = 0 \end{cases} \quad \text{(Ⅲ-54)}$$

Avec : R_f : Résistance du filtre, L_f : Inductance du filtre, V_a, V_b, V_c : sont les tensions aux points de raccordements communs, I_a, I_b, I_c : représentent les courants sortant de l'onduleur

Les puissances sont données par cette fonction :

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(V_d I_d + V_q I_q) \\ Q = \frac{3}{2}(V_d I_q + V_q I_d) \end{cases} \quad \text{(Ⅲ-55)}$$

III.13 Boucle à verrouillage de phase PLL

Dans les dispositifs raccordés au réseau électrique, Un convertisseur de puissance connecté au réseau correspond parfaitement à la philosophie des boucles à verrouillage de phase puisqu'il doit travailler en harmonie avec le réseau [25]. PLL est un circuit électronique qui synchronise la phase d'un signal de sortie s(t) avec celle d'un signal d'entrée e(t).

Elle comprend principalement de trois blocs : Le détecteur de phase, 'DP', le correcteur et l'oscillateur commandé en tension, 'OCT'.

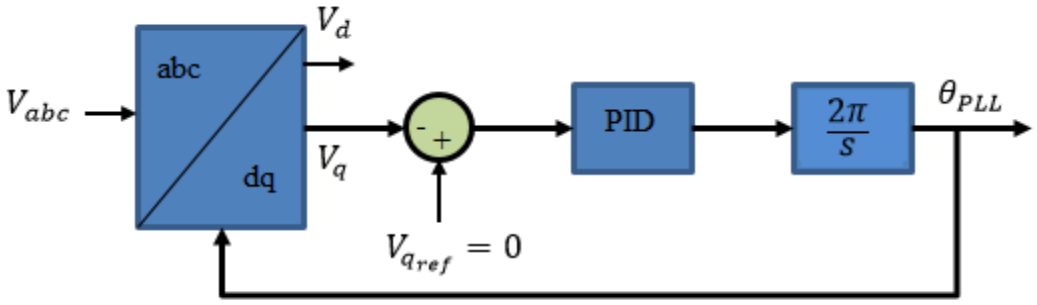


Figure III.14: Schéma fonctionnel de base d'une PLL

III.14 Système global de simulation

La figure III. 15 représente le modèle global d'un système de production d'énergie éolienne raccordé au réseau. Ce système se compose d'une éolienne et d'un générateur permettant de convertir l'énergie éolienne en énergie électrique, ainsi que d'un convertisseur de courant continu (DC) piloté par la technique P&O afin d'optimiser la puissance. Pour le raccordement au réseau électrique, nous avons utilisé un Onduleur triphasé commandé par la technologie PWM, puis nous avons utilisé un filtre RL pour éliminer les harmoniques du courant électrique.

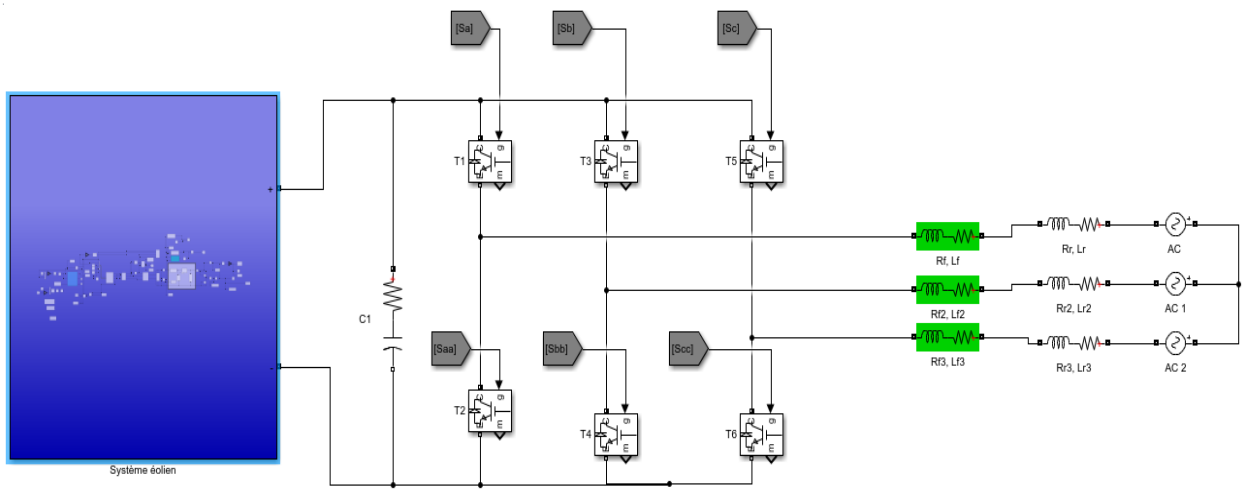


Figure III.15: Schéma de simulation d'un système d'énergie éolienne raccordé au réseau électrique.

La figure III. 16 est plus détaillée : on y voit un système de conversion de l'énergie éolienne d'une puissance nominale pouvant atteindre 12,3 kW, spécialement conçu pour fonctionner avec un

rendement élevé dans des conditions de vitesses de vent variables. Sur le plan mécanique, le système repose sur une turbine à trois pales reliées à un générateur synchrone à aimants permanents (PMSG), qui se charge de convertir l'énergie mécanique rotative récupérée en énergie électrique sinusoïdale triphasée à tension et fréquence variables. Compte tenu de l'instabilité de la sortie du générateur, la puissance électrique est acheminée vers un redresseur à diodes non régulé (Redresseur-Diode) afin de la convertir en courant continu ; pour optimiser l'utilisation de la puissance produite, un filtre parallèle et un condensateur sont intégrés en aval afin de lisser le signal et de stabiliser la tension. Le système comprend un convertisseur élévateur de tension (Boost Converter) soumis à un système de commande intelligent basé sur l'algorithme de perturbation et d'observation (P&O MPPT). Cet algorithme surveille les mesures de tension et de courant continus et ajuste le rapport cyclique (Duty Cycle) via la technique de modulation d'impulsions en largeur (PWM), ce qui garantit que la turbine fonctionne en permanence au point de puissance maximale.

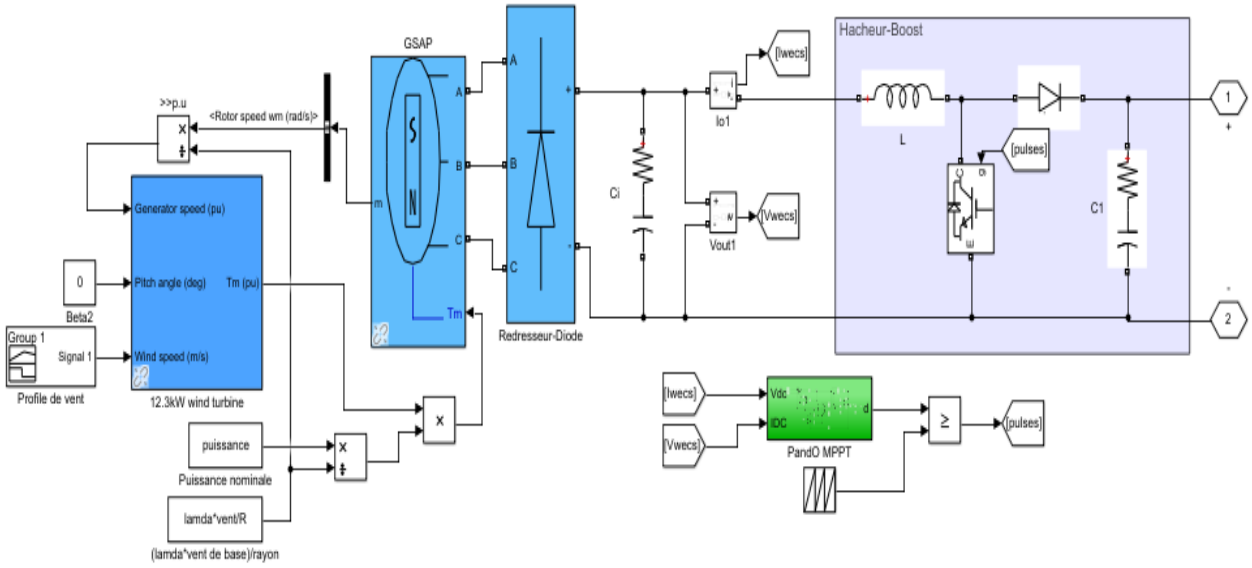


Figure III.16: Schéma plus détaillé du système

La turbine éolienne utilisée dans notre simulation est directement tirée de la bibliothèque Simulink, son diagramme fonctionnel est donné en détail dans la figure II. 17.

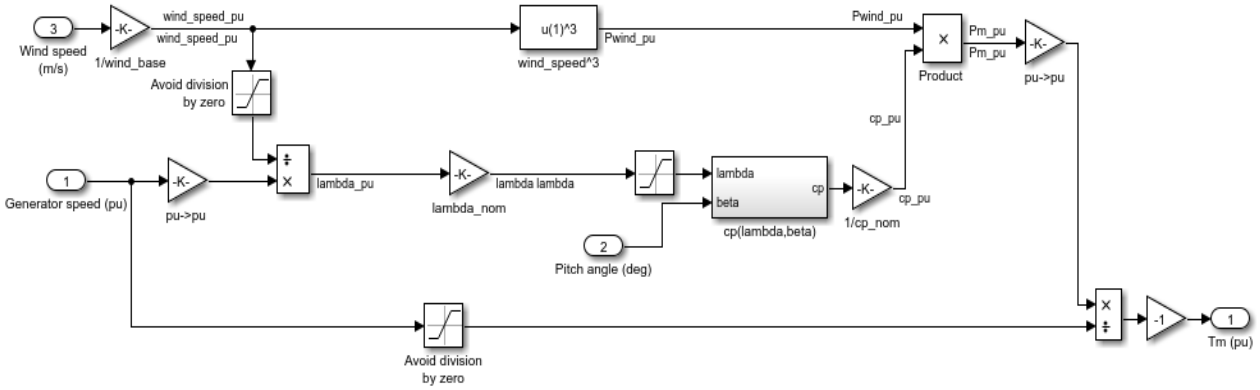


Figure III.17 : bloc de la turbine éolienne

La commande appliquée à l'onduleur est illustrée à la figure 18. Cette commande est divisée en trois axes : le contrôleur de tension continue (Vdc contrôleur), le circuit de verrouillage de phase (PLL) et le contrôleur de courant à hystérésis (Commande hystérésis). Le processus commence au niveau du régulateur de tension continue (Vdc Controller), où la tension continue effective (Vdc) est mesurée et comparée à une valeur de référence fixe fixée à 700 volts (Vref), L'erreur de comparaison passe par un régulateur proportionnel-intégral (PI) afin de générer la composante active de courant de référence qui représente la puissance réelle à injecter. Parallèlement, la boucle à verrouillage de phase (PLL) surveille les tensions du réseau triphasé (Va, Vb, Vc) et les convertit dans le système d'axes tournants (dq0) à l'aide d'une transformation de Park afin de déterminer l'angle de phase précis du réseau (θ) et d'assurer une synchronisation parfaite.

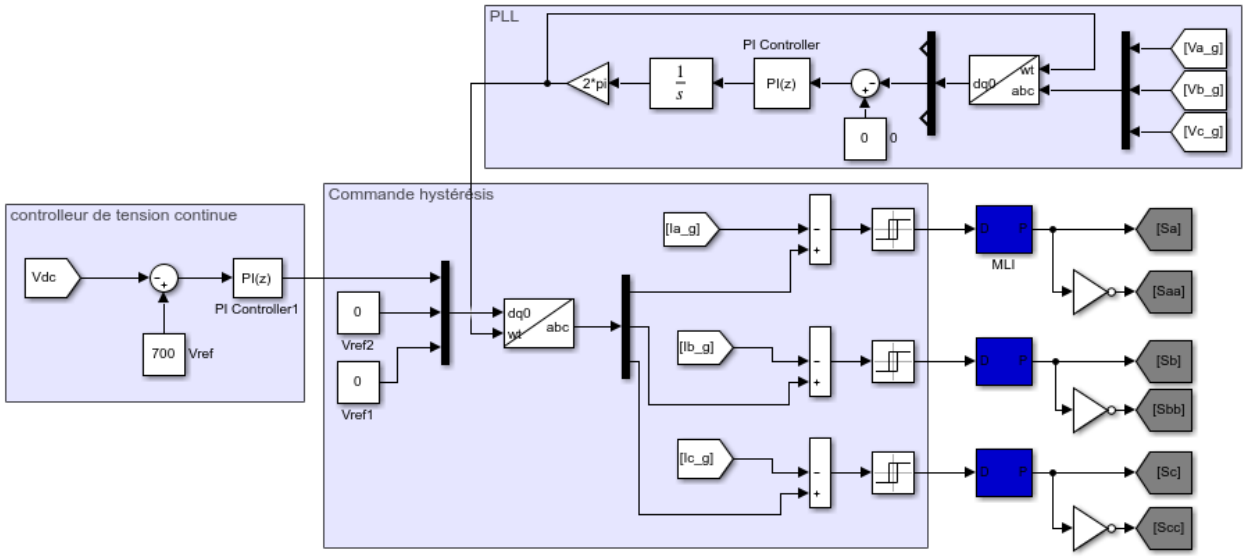


Figure III.18: Schéma du système de commande

III.15 Résultats de Simulation

Afin d'analyser l'efficacité du système de contrôle mis en place, deux scénarios de simulation sont utilisés : le premier consiste à appliquer une vitesse de vent quasi constante afin de visualiser clairement le comportement du système. Dans le deuxième test, une vitesse de vent plus variable est appliquée afin de vérifier la capacité du système à la suivre.

Test 1 :

La courbe représentée sur la figure illustre l'évolution de la vitesse du vent en fonction du temps sur une période totale de 12 secondes, Le comportement de la vitesse du vent sur ce graphique se divise en trois phases temporelles principales, stables et progressives ; le signal commence par une valeur constante et stable de 10 m/s pendant la première seconde ($0s \leq t < 4s$), suivie d'une baisse soudaine et progressive (baisse en escalier) pour se stabiliser à une valeur de 7 m/s au cours de la période comprise entre les secondes ($4s \leq t < 8s$). À la seconde $t = 8s$, le signal subit un saut positif ascendant abrupt pour atteindre une valeur maximale constante estimée à 12 m/s, où il reste stable à ce niveau élevé jusqu'à la fin de la simulation. Cette variation soudaine et contrastée de la vitesse du vent permet de tester la capacité de l'éolienne, du transformateur élévateur et du MPPT à suivre le point de puissance maximale avec une grande rapidité et une grande souplesse.

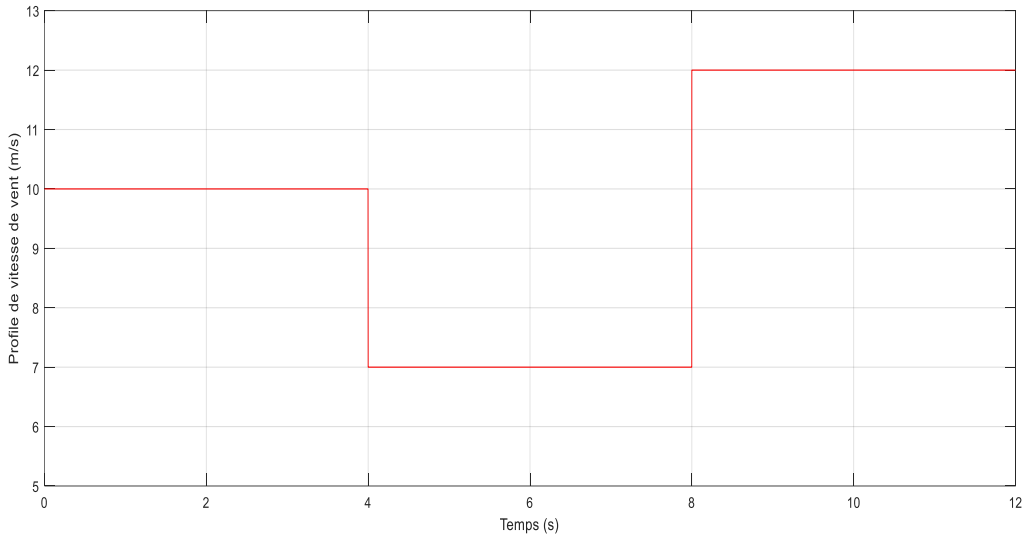


Figure III.19: Profile de vitesse de vent

La courbe montre une excellente correspondance et un suivi direct des variations progressives de la vitesse du vent et de l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT). En effet, une fois passée la phase de démarrage et les perturbations initiales instantanées des premières secondes, le couple du générateur se stabilise à une valeur constante proche de 25,8 N.m pendant la première phase, et à l'instant t = 4 s, le couple diminue pour se stabiliser à environ 14,8 N·m, parallèlement à la baisse de la vitesse du vent à 7 m/s, afin d'alléger la charge mécanique et de s'adapter à la diminution de la puissance. Enfin, à l'instant t = 8 s, la forte augmentation de la vitesse du vent provoque un bond ascendant rapide et stable du couple, qui atteint sa valeur maximale à environ 35 N·m. Ce comportement dynamique, exempt d'oscillations de longue durée, démontre l'efficacité de la réponse électromagnétique du générateur aux variations atmosphériques rapides.

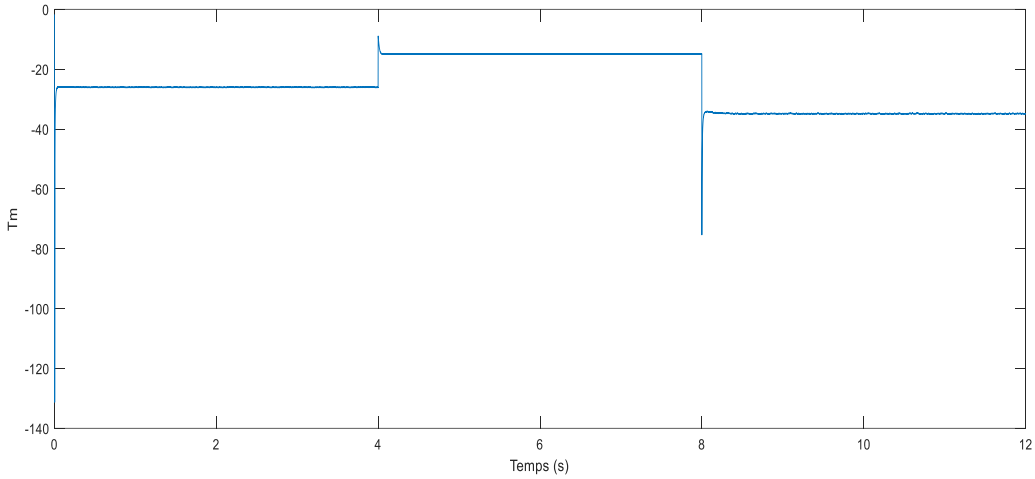


Figure III.20: couple de GSAP

Le graphe (III. 21) représente la courbe de la vitesse mécanique ; on y observe un excellent suivi de la vitesse du rotor en fonction des variations de la vitesse du vent : la vitesse part de zéro pour se stabiliser rapidement à une valeur proche de 178 rad/s au cours de la première phase ($0 \leq t < 4s$) et, à l'instant t = 4s, la vitesse mécanique diminue progressivement pour se stabiliser à 100 rad/s, parallèlement à la baisse de la vitesse du vent à 7 m/s. Enfin, à l'instant t = 8s, la vitesse augmente brusquement pour atteindre sa valeur maximale à environ 220 rad/s

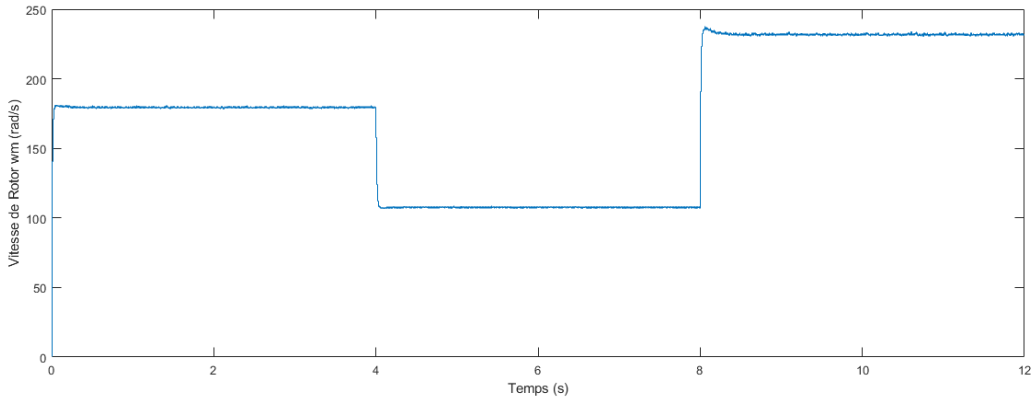


Figure III.21: Vitesse mécanique

Malgré ces perturbations instantanées et transitoires, l'algorithme de contrôle fait preuve d'une grande souplesse et d'une réactivité élevée : en quelques fractions de seconde, il parvient à rétablir la stabilité du coefficient et à le maintenir autour de valeurs d'équilibre optimales, dans une plage de fonctionnement sûre et stable tout au long de la simulation.

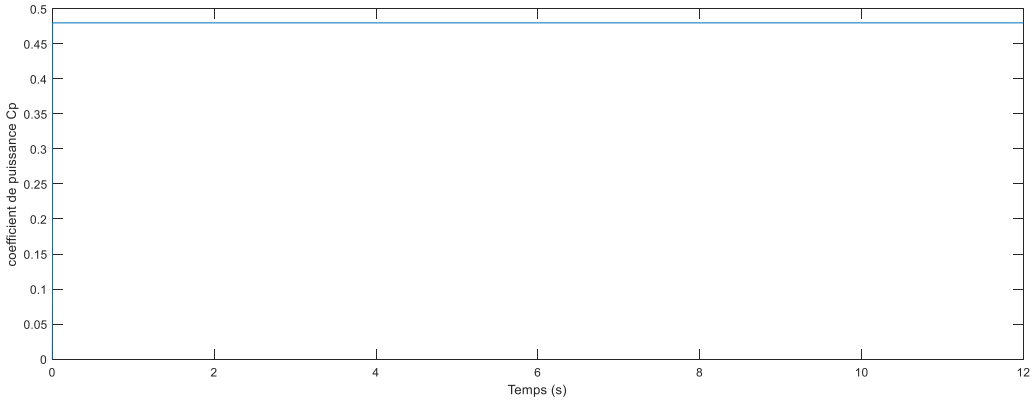


Figure III.22: Variation du coefficient de puissance Cp

La courbe (III.23) représentée sur cette figure correspond à la tension de GSAP, elle suit de manière dynamique et directe les variations de la vitesse de référence du vent et de la vitesse de rotation de l'alternateur. La tension se stabilise dans la première phase à une valeur moyenne proche de 190V, avec des ondulations dues au processus de redressement et de commutation électronique. À l'instant t = 4s, la tension diminue parallèlement à la baisse de la vitesse du vent pour se stabiliser à environ 100 V, Enfin, à l'instant t = 8s, sa valeur se stabilise à 220V. Ce comportement démontre la capacité du convertisseur « boost » et de l'algorithme de contrôle à s'adapter instantanément à la tension variable générée par le système éolien, en vue de l'augmenter et de la stabiliser.

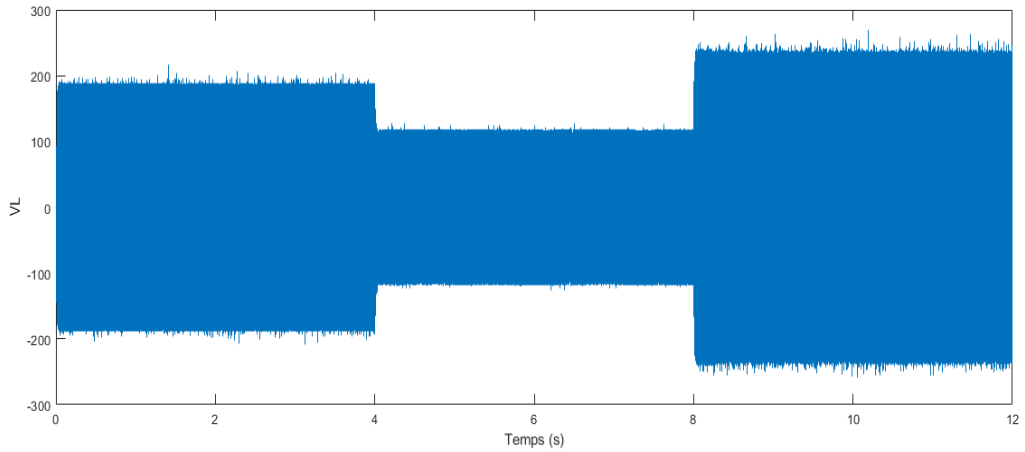


Figure III.23: tension triphasée de GSAP

Ce graphe représente la réponse du courant statorique du GSAP en fonction du temps ; il reflète la nature sinusoïdale et alternative du courant produit avant le processus de redressement. On observe clairement l'influence directe des variations de vitesse du vent sur l'intensité et la fréquence du courant ; au cours de la première phase, l'amplitude du courant se stabilise à une valeur maximale proche de 40 A. À l'instant t = 4 s, l'amplitude du courant diminue de manière discontinue pour se stabiliser à une valeur maximale d'environ 20 ampères, en raison de la baisse de l'énergie éolienne. À l'instant t = 8 s, Le courant se stabilise de manière sûre et régulière à une valeur maximale proche de 40 A. Ce comportement confirme l'adéquation électromagnétique dynamique du générateur avec toutes les perturbations de l'aérien extérieur.

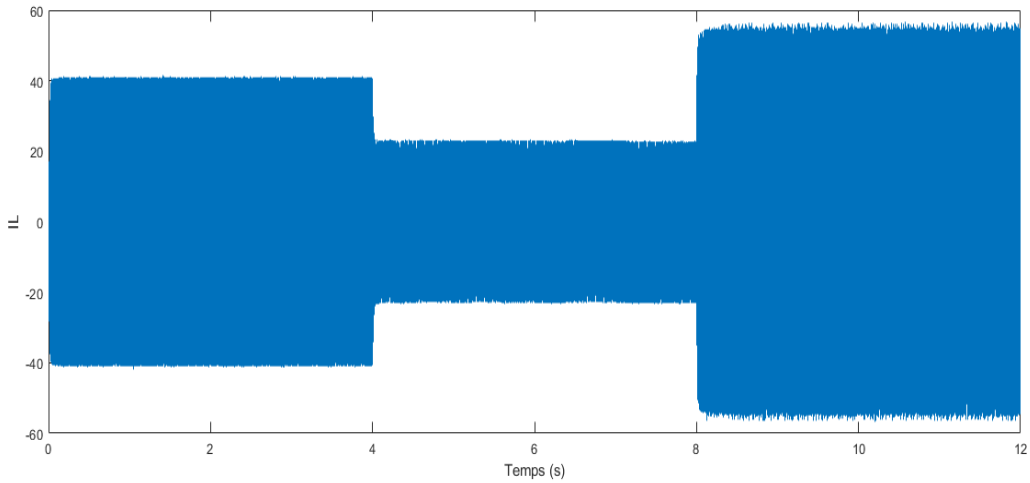


Figure III.24: courant statorique de GSAP

Ce graphe illustre la réponse de la tension de sortie ; il représente la tension régulée appliquée à l'onduleur. On constate clairement l'efficacité du système de régulation PID : la tension augmente rapidement au début pour dépasser légèrement la valeur de consigne (dépassement) avant de se stabiliser avec une grande précision à la valeur cible fixée, soit 700 V.

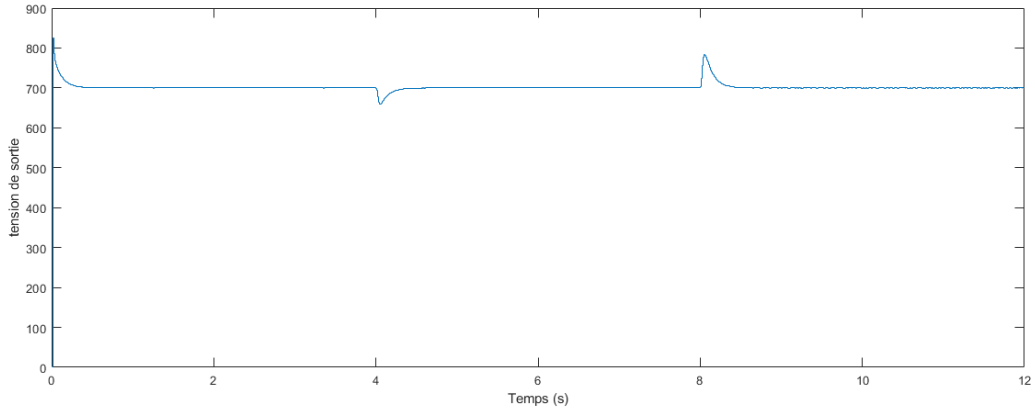


Figure III.25: tension de sortie

Ce graphe illustre l'évolution du courant continu (Idc) en fonction du temps. Suite à un régime transitoire initial à l'amorçage, le courant se stabilise à environ 6A durant le premier $(0 \leq t < 4s)$. À l'instant t= 4s, il chute pour se stabiliser à 2 A en réponse à la baisse de la vitesse du vent. Enfin, à t= 8s, une nette augmentation dynamique propulse le courant vers un niveau maximal stable d'environ 11 A. Ce comportement reflète fidèlement les variations de la puissance extraite et confirme le bon fonctionnement de l'asservissement.

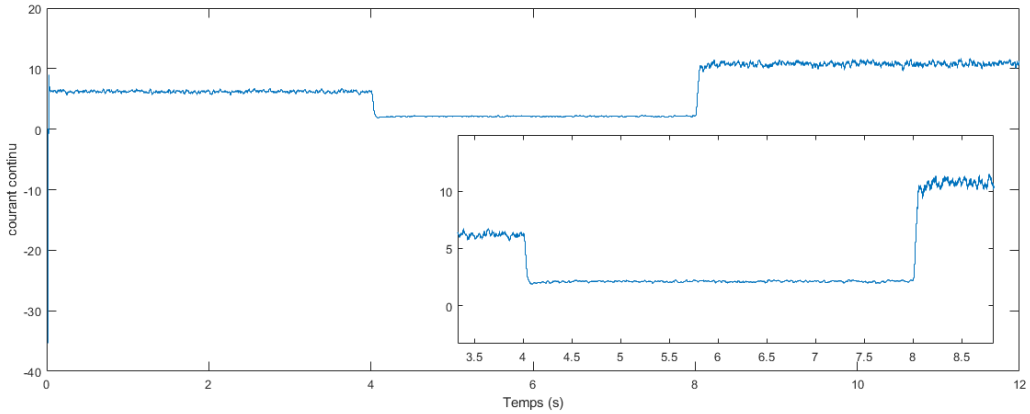


Figure III.26: Réponse en courant continu

Cette figure présente la comparaison dynamique entre la puissance électrique générée (en bleu) et la puissance active injectée dans le réseau électrique (en orange), exprimées en (kW) en fonction du temps, accompagnée d'une fenêtre de zoom explicative. Les deux courbes affichent un suivi parfaitement synchrone et rigoureux des variations échelonnées de la vitesse du vent à travers les trois phases de fonctionnement. Durant le premier palier, la puissance générée et la puissance injectée se stabilisent respectivement autour de 5 kW et 4.5 kW, Suite à la chute en échelon du vent à l'instant t=4s, les deux puissances diminuent instantanément pour atteindre des valeurs stationnaires d'environ 1.8 kWet 1.5kW, Enfin, lors de l'augmentation brutale du vent à t=8s, la puissance générée grimpe pour se stabiliser à 9 kW, tandis que la puissance injectée se fixe à 8 kW. L'écart constant et mineur observé entre les deux courbes est attribué de manière évidente aux pertes par effet Joule et commutations au sein des différents étages de puissance. Ces résultats concrets confirment la haute efficacité globale du système de conversion et sa capacité à acheminer l'énergie propre vers le réseau avec un rendement optimal.

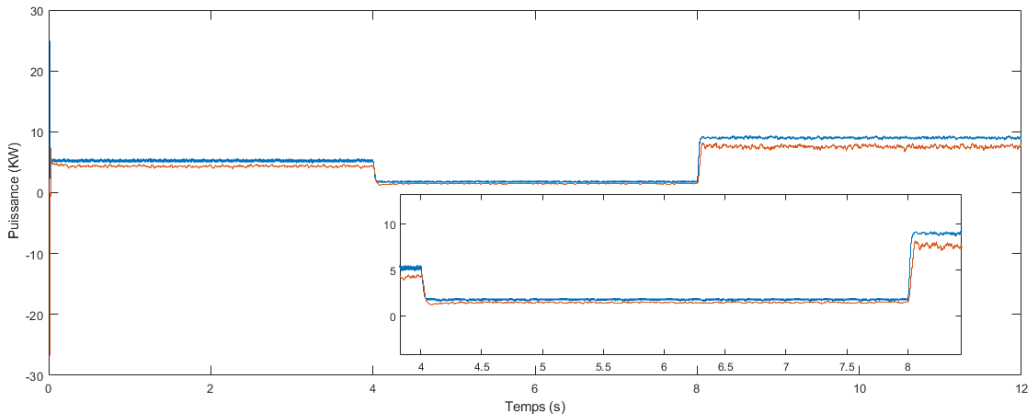


Figure III.27: Puissance générée et Puissance injectée

Cette figure représente les tensions du réseau triphasé en fonction du temps, accompagnée de deux fenêtres de zoom permettant de mettre en évidence l'enveloppe capacitive et le signal sinusoïdal. Les résultats montrent une excellente stabilité et une grande pureté des ondes sinusoïdales des trois phases équilibrées et déphasées d'un angle 120°, la valeur maximale de la tension restant stable à une amplitude de crête estimée à environ 311 V, et la fenêtre de zoom de gauche montre que la tension reste parfaitement isolée et stable face aux variations soudaines de la vitesse du vent grâce à la grande efficacité de la boucle de verrouillage de phase (PLL) et du système de régulation de la tension de liaison continue. Ces résultats confirment le succès de la stratégie de contrôle pour

obtenir un raccordement sûr et stable, parfaitement conforme aux normes de qualité de l'énergie électrique du réseau classique.

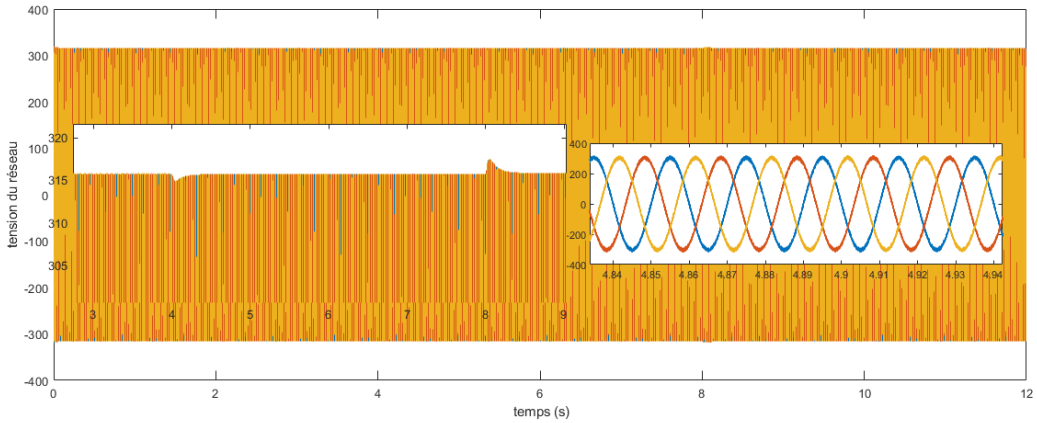


Figure III.28: tension du réseau électrique triphasé

Cette courbe représente la réponse des courants du réseau électrique triphasé, exprimés en ampères (A), en fonction du temps, avec une fenêtre de zoom détaillée. Les résultats montrent des courants sinusoïdaux équilibrés et déphasés de 120°, parfaitement synchronisés avec les tensions du réseau grâce à la boucle PLL. L'enveloppe capacitive des courants est directement influencée par les variations de la puissance éolienne et de la puissance injectée : l'amplitude maximale du courant dans la première phase se stabilise à environ 6 A, puis diminue de manière progressive pour se stabiliser à 2 A dans la deuxième phase, avant d'enregistrer un pic qui se stabilise à une valeur maximale proche de 11 A après l'instant t = 8s. Cette transition fluide et sans distorsion démontre la grande efficacité du régulateur à hystérésis dans le suivi rapide et la fourniture de courants propres de haute qualité, conformes aux exigences du réseau.

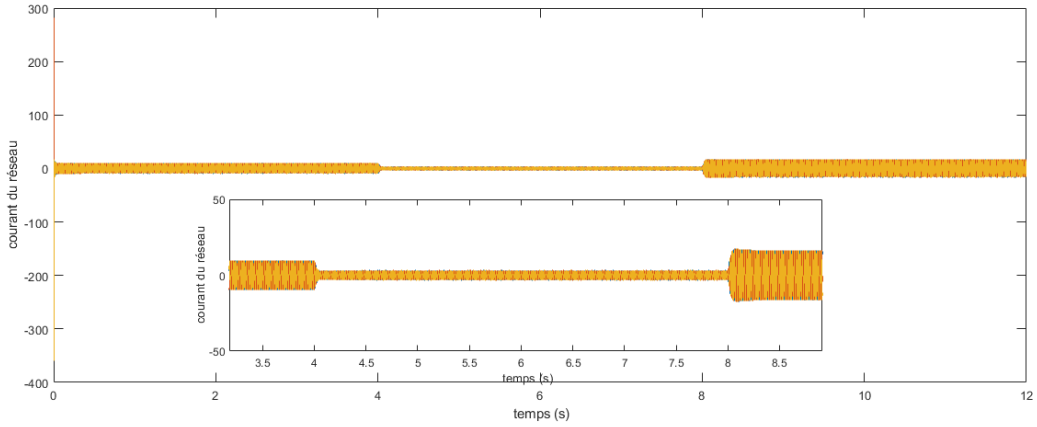


Figure III.29: courant du réseau électrique triphasé

Ce graphique montre la synchronisation phase-à-phase précise entre la tension de la première phase du réseau (Va) et le courant injecté (Ia) sur la période comprise entre 5,35 s et 5,8 s. On constate clairement que les deux signaux sont parfaitement en phase. Cette coïncidence et cette synchronisation temporelle parfaites constituent une preuve irréfutable du bon fonctionnement de la boucle à verrouillage de phase (PLL).

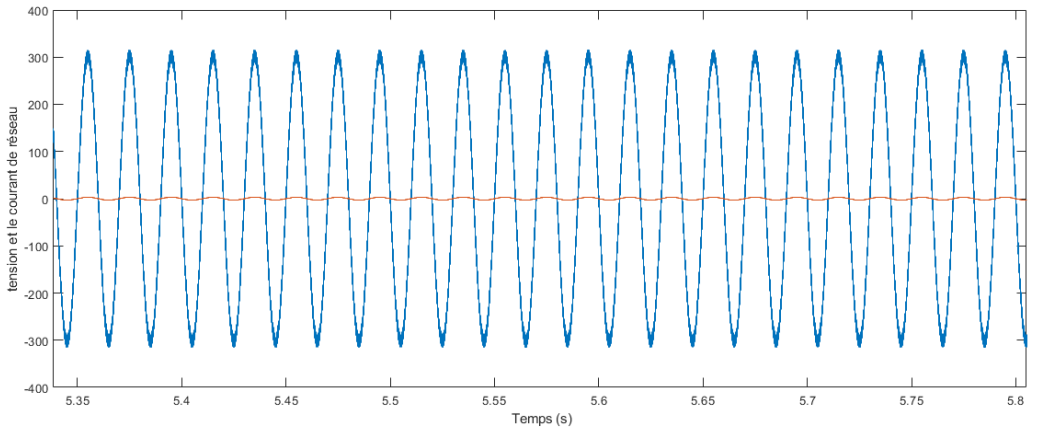


Figure III.30: tension et courant de réseau (Va et Ia)

Le taux de distorsion harmonique THD est compétitif et très satisfaisant, et respecte pleinement les normes requises (moins de 5%).

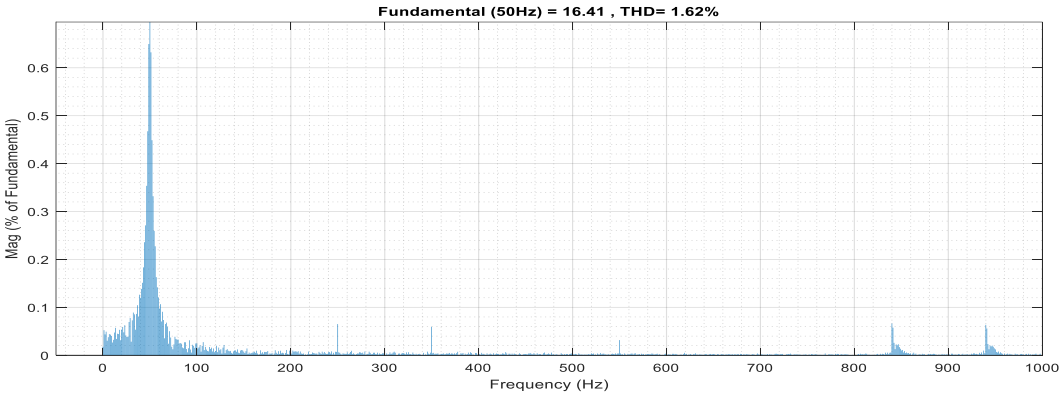


Figure III.31: THD de courant

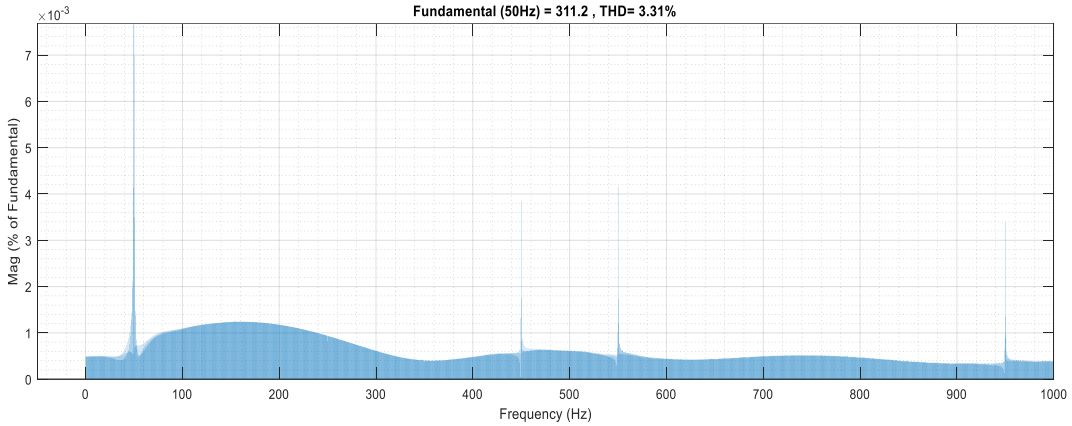


Figure III.32: THD de tension

Test 2 :

Le deuxième test est réalisé en utilisant une vitesse de vent réaliste, qui reflet le fonctionnement réel du système éolien afin de vérifier la robustesse du système face à cette perturbation.

Tous les paramètres suivent parfaitement le profil du vent, ce qui démontre l'efficacité du système de contrôle.

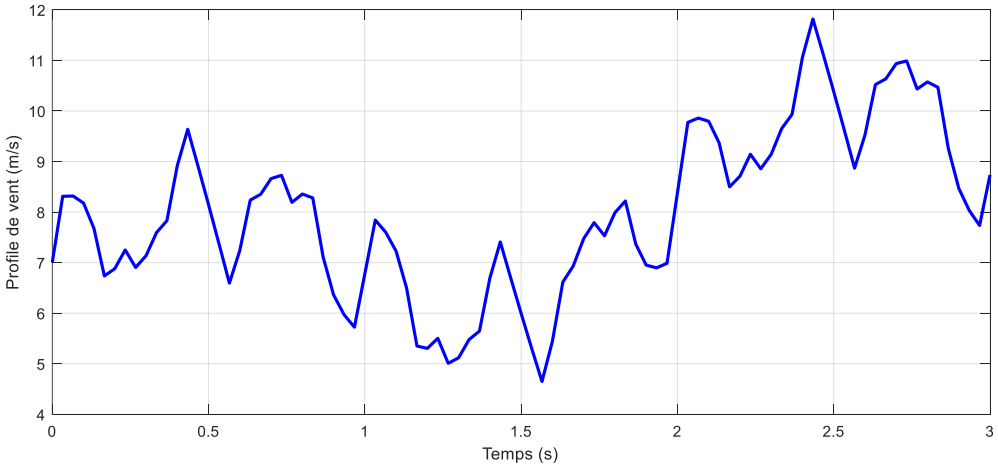


Figure III.33: Profile de vent

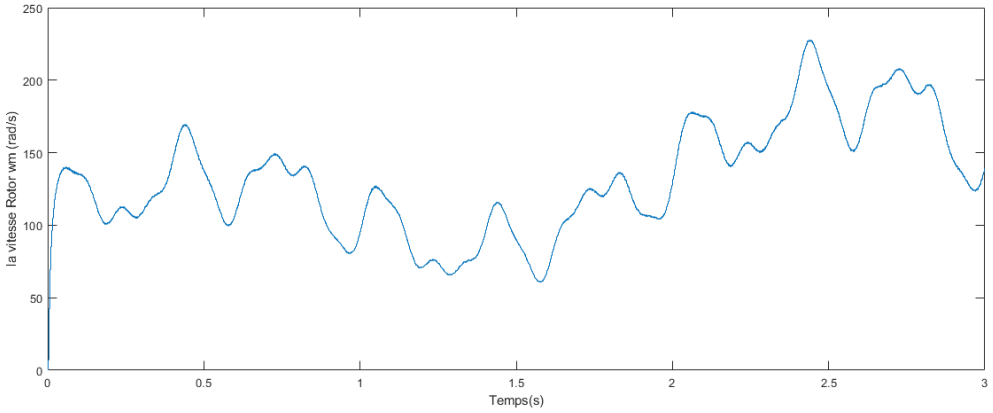


Figure III.34: La vitesse de rotation de GSAP

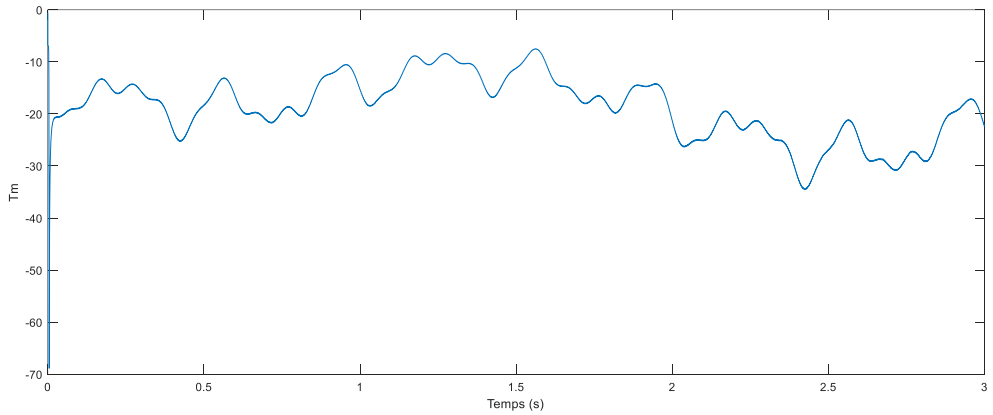


Figure III.35: Le couple électromagnétique de GSAP

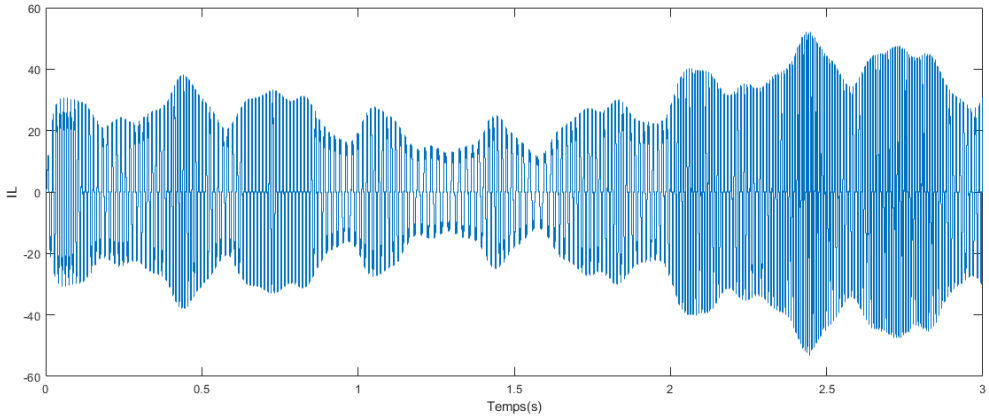


Figure III.36: Le courant de GSAP

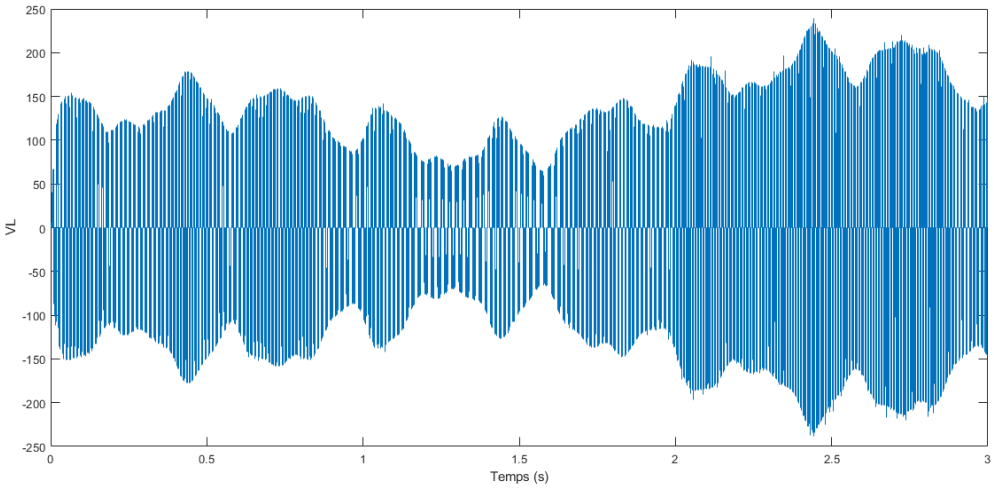


Figure III.37: La tension de GSAP

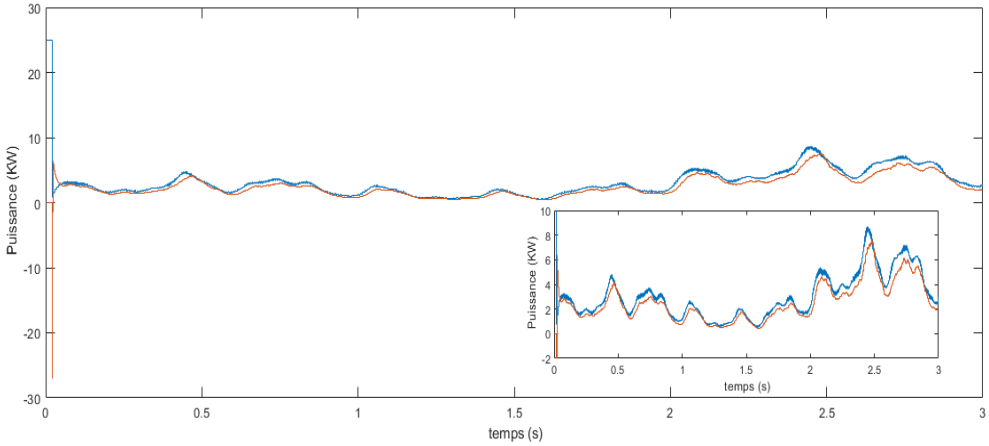


Figure III.38: La Puissance générée et la Puissance injectée

III. 16 Conclusion

En conclusion de ce chapitre, nous avons présenté une étude exhaustive et une modélisation précise de la chaîne de conversion de l'énergie éolienne basée sur un générateur synchrone à aimants permanents (GSAP). La simulation du système dans l'environnement MATLAB/Simulink nous a permis d'évaluer les performances dynamiques des différents composants, de l'éolienne jusqu'au réseau électrique. Les résultats obtenus ont démontré la grande efficacité de l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour extraire la puissance maximale possible malgré les variations soudaines de la vitesse du vent. De même, les résultats relatifs au contrôle de l'onduleur et à la synchronisation (PLL) ont confirmé le succès de l'injection d'une énergie propre et sinusoïdale dans le réseau, avec un facteur de puissance unitaire et un taux de distorsion harmonique totale (THD = 3,33) conformes aux normes.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le remplacement des ressources d'énergie fossiles par les énergies renouvelables constitue une solution adéquate et obligatoire pour sauver notre monde du réchauffement climatique qui met notre vie en danger. Ces ressources permettent de satisfaire les besoins énergétiques croissants de l'humanité. La diversité des énergies renouvelables offre plusieurs opportunités pour les installer dans n'importe quelle zone selon leur disponibilité, leur coût total et, le plus important, leur rendement énergétique.

L'énergie éolienne est une ressource abondante disponible dans des contextes géographiques divers, avec des coûts compétitifs par rapport aux autres sources renouvelables. Les progrès significatifs dans la fabrication de différents types d'éoliennes configurations à axe horizontal et vertical, installations onshore et offshore encouragent les sociétés à investir de plus en plus dans leur déploiement.

Il existe plusieurs technologies de génératrices pour les systèmes éoliens : les machines asynchrones à cage d'écureuil, les génératrices asynchrones à double alimentation (DFIG), les machines synchrones à excitation électrique (EESG), et les machines synchrones à aimants permanents (PMSG). Le rendement d'une éolienne est directement lié à la conception aérodynamique de ses pales, aux propriétés des matériaux employés dans sa construction, et aux conditions de vent sur le site d'installation notamment la vitesse du vent et la densité de l'air qui produisent une puissance variable. Par conséquent, pour satisfaire la puissance demandée par la charge, le générateur éolien doit être contrôlé de manière optimale.

La comparaison des technologies de génératrices a révélé que, bien que les DFIG offrent des avantages en termes de coût grâce aux convertisseurs à échelle partielle, les PMSG avec convertisseurs à pleine échelle offrent un rendement énergétique supérieur, des capacités améliorées de support réseau, et des besoins de maintenance réduits. Le choix entre ces technologies implique des compromis entre investissement initial, efficacité opérationnelle, fiabilité et conformité aux codes réseau.

Ce mémoire détaille la modélisation mathématique complète de la chaîne de conversion éolienne à base de GSAP. Les équations de la machine synchrone à aimants permanents ont été établies dans le repère triphasé puis dans le repère de Park, incluant les équations électriques,

magnétiques et mécaniques. L'algorithme P&O, la modélisation du convertisseur DC/DC boost, la commande MLI ont été détaillés pour l'optimisation de l'énergie extraite et l'interface avec le réseau électrique.

Le premier chapitre a présenté les différentes formes d'énergies renouvelables, leurs avantages et inconvénients, ainsi que le contexte éolien mondial et algérien.

Le deuxième chapitre a détaillé les principes de fonctionnement des éoliennes à axe horizontal, les modèles mathématiques régissant l'extraction de puissance aérodynamique, et l'impact des paramètres de conception de la turbine sur les performances. L'analyse a démontré la supériorité des systèmes à vitesse variable sur les configurations à vitesse fixe, et les avantages des génératrices à aimants permanents à entraînement direct pour les applications offshore.

Le chapitre 3 décrit en détail le raccordement d'un générateur photovoltaïque de 12,3 kW au réseau électrique via un onduleur triphasé à régulation PID. Les résultats de simulation de ce système dans des conditions de vent variables sont présentés afin de démontrer l'efficacité de la stratégie de régulation. Les résultats démontrent l’efficacité de la technique PO pour fournir une puissance maximale au système éolien, malgré quelques oscillations. L’onduleur stabilise efficacement la tension continue à la valeur souhaitée (700 V). Le filtre élimine les harmoniques de courant (THD inférieur à 5 %).

Enfin, pour l'amélioration de ce travail, quelques perspectives sont proposées :

- L'utilisation d'autres stratégies de commande (MPPT) comme la logique floue, les réseaux de neurones, ou la commande prédictive modèle (MPC).
- L'utilisation d'autres stratégies de commande de l'onduleur côté réseau.
- L'hybridation de cette topologie avec d'autres sources d'énergie (solaire photovoltaïque, stockage par batteries) pour améliorer la fiabilité globale du système.

Références bibliographiques

[1] https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quels-sontles-pays-qui-produisent-le-plus-delectricite-dorigine-renouvelable

[2] https://www.iea.org

[3] https://www.gwec.net

[4] T. Massitan, « gestion de système photovoltaïque d'une alimentation privée connecte au réseau ». Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, Algerie, 2017.

[5] https://www.connaissancedesenergies.org/questions-et-reponses-energies/quels-sont-les-pays-qui-produisent-le-plus-delectricite-dorigine-renouvelable

[6] A. Meddour, Y. Moussaoui. « Etude et mise en œuvre d'une éolienne à axe horizontale (essais expérimentaux et équilibrage) ». Mémoire de Master, Université de Bejaïa, Algérie. 2019/2020.

[7] .https://commons.wikimedia.org/w/index.php?search=wind+map+Algeria+&title=Special%3AMediaSearch&wprov=acrw1_-1&type=image

[8] https://www.cder.dz/spip.php?article1765

[9] M. Chalane, Cherfi Yanis. « Etude et commande d'une éolienne à base d'une machine synchrone à aimants permanents ». Mémoire de Master, Université de Bejaïa, Algérie. 2022.

[10] https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/energie-renouvelable-energie-eolienne-france-2025-22744/

[11] https://tpeeoliennelll.wordpress.com/introduction/

[12] C. Masson, "Wind technology", Department of Mechanical Engineering, Ecole de Echnologiesupérieure SYS84, 2011.

[13] C. Chazallon, « Conception d'éoliennes » INSA de Strasbourg- RIZZO Danien, Mémoire d'ingénieur, 2008

[14] https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/onshore-vs-offshore-wind-energy

[15] Z. Bouguerra, Comparative Study between Common and Individual MPPT Controller Using Fuzzy Logic Control for Hybrid System (Photovoltaic/Wind Energy Conversion System), Periodica Polytechnica Electrical Engineering and Computer Science, 69(1), pp. 53–62, 2025

[16] [15]C. Boulaiche, « Optimisation et Gestion d'un système hybride éolien photovoltaïques avec le stockage par batterie pour une production énergétique durable », Mémoire de master, Dépt. Sci. et Tech., Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf - Mila, Mila, Algérie, 2025

[17] Z. Bouguerra, "Comparative study between PI, FLC, SMC, and Fuzzy sliding mode controllers of DFIG wind turbine", Journal of Renewable Energies, 26(2), pp. 209–223, 2023.

[18] F. Louar, Modélisation et simulation d'une chaine de conversion d'énergie éolienne à base d'une machine synchrone à aimant permanent (Thèse de doctorat). Université de Annaba, Algérie. 2016

[19] M. Slimanou et I. Chelghoum , « Etude d'un système de pompage éolien à base de deux machines synchrone à aimants permanents », Mémoire de master en Electrotechnique, Université de béjaia, Algérie, 2020.

[20] F. Merahi, H. Mernache, D. Aouzelag, A. E. Badoud, M. Bajaj, I. Zaitsev, Power control of an autonomous wind energy conversion system based on a permanent magnet synchronous generator with integrated pumping storage, scientific reports, 2024, 14:29776

[21] Z. Bouguerra, A. Benfdila, Comparative Study of Individual and Hybrid Renewable Energy Systems (Photovoltaic, Wind Energy and Hybridization). Controlled by Fuzzy Logic Control", Journal of Engineering Science and Technology Review, 14(5), pp. 180–186, 2021.

[22] A. Zaimi, "Optimisation de la commande d'une éolienne à base de machine synchrone à aimants permanents," Mémoire de master, 2014.

[23] C. Bousba, T. Zouaoui, « Etude d'une éolienne autonome avec un système de stockage », Mémoire de Master, Université de Bejaïa, Algérie, 2021.

[24] F. Benhamma, « Injection de l'énergie photovoltaïque dans le réseau électrique », Mémoire de Master, Université Mohamed El-Bashir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Algérie, 2025

[25] Freijedo, F. D., A. G. Yepes, O. Lopez, P. Fernandez-Comesana, J. Doval-gandoy, An optimized implementation of phase locked loops for grid applications. IEEE transactions on instrumentation and measurement, vol. 60, no. 9, pp. 3110–3119, 2011.

Annexe

Paramètres	**Valeur**
Turbine éolienne	
Puissance mécanique nominale de sortie	12.3kW
Facteur de puissance de GSAP	0.9
Vitesse de vent de base (m/s)	12 m/s
Vitesse de rotation de base (p.u. de la vitesse de base du générateur)	1.2
GSAP	
Résistance de phase du stator R_s (ohm)	0.0485 ohm
Inductance L_d	0.395e-3 H
Inductance L_q	0.395e-3 H
Flux magnétique	0.1194 V. s
Inertie (J)	0.0027 J(kg.m^2)
Amortissement visqueux	0.0004924 N.m.s
Frottement statique	0 N.m
Paires de pôles	4

Résumé

Ce mémoire, intitulé « Modélisation et Commande d'une Chaîne de Conversion Éolienne à Base de Génératrice Synchrone à Aimants Permanents », détaille la modélisation mathématique et la simulation d'une chaîne de conversion éolienne complète. Le système étudié est constitué d'une turbine éolienne à axe horizontal couplée à une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP) via un entraînement direct, suivi d'un redresseur à diodes double alternance et d'un convertisseur DC/DC boost pour l'adaptation de la tension. La commande de la chaîne repose sur la technique de perturbation et d'observation (P&O) pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT), permettant d'extraire l'énergie éolienne optimale indépendamment des variations de la vitesse du vent. La modélisation de la GSAP est réalisée dans le repère triphasé puis simplifiée dans le repère de Park. Les résultats de simulation sous Simulink/Matlab montrent l'efficacité de la méthode P&O pour maximiser la puissance extraite, ainsi que l'efficacité de la commande appliquée au niveau de l'onduleur pour maintenir la tension continue à 700V avec un THD inférieur à 5%.

Mots clés : énergie éolienne, GSAP, MPPT, perturbation et observation, RL filtrer, THD.

Abstract

This master's thesis, titled "Modeling and Control of a Wind Power Conversion System Based on a Permanent Magnet Synchronous Generator," details the mathematical modeling and simulation of a complete wind power conversion system. The system under study consists of a horizontal-axis wind turbine coupled to a permanent magnet synchronous generator (PMSG) via a direct drive, followed by a full-wave diode rectifier and a DC/DC boost converter for voltage conversion. The control of the system is based on the perturbation and observation (P&O) technique for tracking the maximum power point (MPPT), enabling the extraction of optimal wind energy regardless of wind speed variations. The PMSG is modeled in the three-phase coordinate system and then simplified in the Park coordinate system. Simulation results using Simulink/MATLAB demonstrate the efficiency of the P&O method in maximizing extracted power, as well as the efficiency of the control applied at the inverter level in maintaining the DC voltage at 700 V with a THD below 5%.

Keywords: wind energy, PMSG, MPPT, perturbation and observation (P&O), RL filter, THD.

الملخص

تتناول أطروحة الماستر هذه، التي تحمل عنوان «نمذجة والتحكم في نظام تحويل طاقة الرياح القائم على مولد متزامن بمغناطيس دائم»، تفاصيل النمذجة الرياضية والمحاكاة لنظام كامل لتحويل طاقة الرياح. يتكون النظام قيد الدراسة من توربين رياح ذي محور أفقي مقترن بمولد متزامن مغناطيسي دائم (MSGل) عبر محرك مباشر، يليه مقوم ديود كامل الموجة ومحول رفع الجهد DC/DC لتحويل الجهد. يتم التحكم في النظام باستخدام تقنية الاضطراب والمراقبة (P&O) لتتبع نقطة الطاقة القصوى (MPPT)، مما يسمح باستخراج طاقة الرياح على النحو الأمثل بغض النظر عن تقلبات سرعة الرياح. تم نمذجة المولد المتزامن ذي المغناطيس الدائم (GSAP) في نظام الإحداثيات ثلاثي الأطوار ثم تم تبسيطه في نظام إحداثيات بارك. تُظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها باستخدام Simulink/MATLAB فعالية طريقة الاضطراب والمراقبة (P&O) في تعظيم استخراج الطاقة، فضلاً عن فعالية التحكم المطبق على مستوى العاكس للحفاظ على جهد التيار المستمر عند 700 فولت مع تشوه إجمالي (THD) أقل من 5%.

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح, GSAP, MPPT, الاضطراب و المراقبة, مرشح RL