



Faculté : TECHNOLOGIE
Département : ELECTROTECHNIQUE
Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES
Filière : ELECTROTECHNIQUE
Spécialité : RESEAUX ELECTRIQUE

Mémoire
Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème:

**Intégration des énergies renouvelables
(éoliennes)**

Présenté par :

- Guerbattou ahmed zakaria
- Benhamri baha eddine

Encadrant : *BENAMIMOUR Tariq*

MCB

UBMA

Jury de Soutenance :

BEN SI Ali Nadia	Prof	UBMA	Président
BENAMIMOUR Tariq	MCB	UBMA	Encadrant
KELAIAIA Samia	MCA	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2024/2025

Remerciements :

Nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu le Tout-Puissant pour nous avoir accordé la force et la persévérance nécessaires à l'achèvement de ce projet.

Nous tenons à remercier chaleureusement nos parents pour leur soutien indéfectible et la confiance qu'ils nous ont toujours témoignée.

*Nos remerciements les plus sincères s'adressent également à notre encadrant, **Dr. Tariq Benamimour**, pour le temps qu'il nous a consacré, la pertinence de ses conseils et son accompagnement constant. Sa bienveillance et ses qualités humaines ont été d'une grande valeur tout au long de ce parcours.*

Nous remercions également les membres du jury pour avoir accepté d'évaluer notre travail avec attention.

Enfin, notre reconnaissance va aussi à l'ensemble des enseignants et responsables du département d'électrotechnique, ainsi qu'à nos camarades de promotion, pour leur appui et leur collaboration tout au long de cette expérience académique.

Résumé :

Avec l'augmentation des préoccupations environnementales et la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre, les énergies renouvelables occupent une place centrale dans la transition énergétique mondiale. Parmi ces sources, l'énergie éolienne représente une solution propre, durable et de plus en plus compétitive pour la production d'électricité.

Cette étude porte sur l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques, en analysant le fonctionnement des éoliennes depuis la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, jusqu'à la production d'électricité via des générateurs, notamment les générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG). Le travail inclut la modélisation dynamique du système, ainsi que les techniques de contrôle nécessaires pour optimiser la production électrique malgré la variabilité du vent.

Par ailleurs, cette recherche examine les dispositifs électroniques de puissance utilisés pour la conversion et la connexion sécurisée à la grille électrique, tout en abordant les défis liés à l'intermittence de l'énergie éolienne et aux exigences de stabilité du réseau. , après quoi nous sommes passés à la modélisation mathématique de ce système et nous avons également fait une simulation de cette série en utilisant le programme MATLAB/Simulink .

Mots clés :

Générateur synchrone à aimant permanent. MATLAB/Simulink

Abstract :

The increasing environmental concerns and the urgent need to reduce greenhouse gas emissions have accelerated the adoption of renewable energy sources worldwide. Among these, wind energy stands out as a clean, sustainable, and increasingly cost-effective solution for electricity generation.

This work focuses on the integration of wind energy into power systems. It covers the fundamental principles of wind turbines, including the conversion of wind kinetic energy into mechanical energy and then into electrical energy via permanent magnet synchronous generators. The study includes dynamic modeling and control strategies aimed at maximizing energy extraction despite the variable nature of wind.

Additionally, the research addresses power electronics converters essential for grid connection and energy management, while also discussing challenges such as intermittency and grid stability requirements. This comprehensive approach highlights the potential and challenges of wind energy integration in modern electrical networks.

Keywords: Permanent magnet synchronous generator. MATLAB/Simulink

ملخص:

تشهد أنظمة الطاقة في العالم تحولاً جذرياً نحو استخدام الطاقات المتجددة، وذلك بهدف التقليل من الاعتماد على المصادر التقليدية مثل الوقود الأحفوري، ومواجهة التحديات البيئية الناتجة عنه. ومن بين هذه الطاقات، تحتل الطاقة الريحية (الهوائية) مكانة متميزة لما توفره من كفاءة عالية وتأثير بيئي محدود.

تهدف هذه المذكرة إلى دراسة كيفية إدماج الطاقة المنتجة من التوربينات الرياح في الشبكة الكهربائية، من خلال تحليل المكونات الأساسية لنظام التحويل، بداية من تحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة ميكانيكية عبر التوربين، ثم إلى طاقة كهربائية باستخدام مولد كهربائي، غالباً ما يكون من نوع مولد تزامني ذو مغناطيس دائم (PMSG).

تتضمن الدراسة:

- شرحاً مفصلاً لهيكل التوربين الهوائي ومكوناته.
 - عرضاً للنمذجة الرياضية والديناميكية للسلسلة الطاقوية.
 - توضيحاً لدور منظومة التحكم في تحسين أداء التوليد وضمان استقراره.
 - دراسة تأثير الرياح باعتبارها متغيراً غير مستقر وكيفية التعامل مع تقلبها.
 - استخدام محولات إلكترونية للطاقة من أجل التوصيل الآمن بالشبكة الكهربائية.
- كما تسلط المذكرة الضوء على المشاكل التقنية المرتبطة بإدماج هذا النوع من الطاقة في الشبكات الكلاسيكية، وتقتترح مجموعة من الحلول التقنية لضمان الفعالية، الاستمرارية وجودة التزويد بالكهرباء. ، إنتقلنا بعدها لنمذجة هذه المنظومة رياضياً كما قمنا بعمل محاكاة لهذه السلسلة باستخدام برنامج Matlab/Simulink .

كلمات مفتاحية :

المولد المتزامن ذو المغناطيس الدائم (PMSG) ، توربينات الرياح ، Matlab/Simulink

SOMMAIRE :

- RESUME**
- LISTE DES FIGURES**
- LISTE DES TABLEAUX**
- INTRODUCTION GENERALE**

Chapitre 1 **Définition de l'énergie renouvelable**

Introduction	15
1 les différents types d'énergie	15
1.1Énergies fossiles	15
1.2 Énergies renouvelables	16
1.2.1Définition des énergies renouvelables	16
1.2.2Quelles sont les énergies renouvelables	16
1.2.2.1 Énergie solaire	16
1.2.2.1.1 Le solaire photovoltaïque	17
1.2.2.1.2 Le solaire thermique	18
1.2.2.2 L'énergie hydraulique	18
1.2.2.3 L'énergie biomasse	19
1.2.2.4 L'énergie géothermique	19
1.2.2.5 L'énergie éolienne	20
1.2.2.5.1 Contexte historique	21
1.2.2.5.2 Avanatges et inconvénients de l'énergie éolienne	22
1.2.2.5.2.1 Les avanatges	22
1.2.2.5.2.2 Inconvénients	22
1.2.2.5.3 Les différentes utilisations de l'énergie éolienne	23
2 Evaluation de l'énergie éolienne dans le monde	23
2.1 État actuel de l'énergie éolienne mondiale	24
2.2 Part de l'éolien dans la production mondiale d'électricité	25
2.3 Tendances et perspectives	25
2.4 Défis et enjeux	25
3 Eolienne en Algérie	25
3.1 Potentiel éolien de l'Algérie	25
3.2 Projets en cours et réalisations	26
3.3 Programme national des énergies renouvelables (2015–2030)	25
3.4 Défis et perspectives	26
Conclusion	26

Chapitre 2

Technologie de l'énergie renouvelable

Introduction	28
2.1. l'énergie éolienne	28
2.1.1 Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne	28
2.1.2 Types d'éoliennes	29
2.1.2.1 Éoliennes terrestres (On shore)	29
2.1.2.2 Éoliennes en mer (Offshore)	29
2.1.3 Type des turbines éoliennes	30
2.1.3.1 Éolienne à axe vertical	30
2.1.3.2 Éoliennes à axe horizontal	30
2.2 Conversion de l'énergie dans un système éolien	31
2.3 Principaux composants d'une éolienne	32
2.4 Classification des éoliennes	32
2.5 Zones de fonctionnement de l'éolienne	33
2.6 les générateurs utilisés dans les éoliennes	34
2.6.1 Système de génération étudié dans ce mémoire	35
2.6.1.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP)	35
2.6.1.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	35
2.6.1.2.1 Les Avantages	35
2.6.1.2.2 Les inconvénients	36
2.7 Modélisation de la turbine éolienne	36
2.7.1 Modèle de vent	36
2.7.2 Modèle de la turbine éolienne	37
2.7.3 Modèle du multiplicateur	38
2.7.4 Modélisation de l'arbre de la machine	39
2.7.5 Modélisation de la Génératrice synchrone à aimants permanents	40
2.7.5.1 Passage au repéré de Park	41
2.7.5.2 Mise en équations	43
2.7.5.2.1 Equations des tensions	43
2.7.5.2.2 Equations des flux	44
2.7.5.2.3 Expression de la puissance	44
2.7.5.2.4 Equation mécanique	45
2.8 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique	46
2.8.1 Loi de BETZ	46
2.8.2 Coefficient de puissance	47
2.8.3 La vitesse de rotation	49
2.9 Le multiplicateur de vitesse	49
2.10 Schéma bloc de la turbine	50
2.11 Modélisation du redresseur	51
2.12 Modélisation de l'onduleur de tension	52
2.12.1 Le type de commande de l'onduleur	53
2.12.1.1 Principe de la commande MLI	53
Conclusion	54

Chapitre 3

Simulation de la chaîne de production

Introduction	57
3.1 Simulation de la chaîne éolienne turbine + génératrice + redresseur + onduleur + réseaux	57
3.2 Résultats de la simulation	62
Conclusion	67
Conclusion generale	68
Références bibliographiques	69

LISTE DES FIGURES :

Chapitre 1 Définition de l'énergie renouvelable

Fig1.1 : Énergies fossiles	15
Fig1.2 : Énergies renouvelables	16
Fig1.3 : Énergie solaire	17
Fig1.4 : Le solaire photovoltaïque	17
Fig1.5 : Le solaire thermique	18
Fig1.6 : L'énergie hydraulique	19
Fig 1.7 : L'énergie biomasse	19
Fig1.8 : L'énergie géothermique	20
Fig1.9: L'énergie éolienne	20
Fig 1.10 : historique des eolienne	21
Fig1.11 : production d'électricité eolienne dans le monde 2000-2022	23
Fig1.12 : Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)	25

Chapitre 2 Technologie de l'énergie renouvelable

Fig 2.1: Un parc éolien	28
Fig 2.2 : Éoliennes terrestres	29
Fig2.3 : Éoliennes en mer	29
Fig 2.4 : Eolienne à axe vertical	30
Fig 2.5 : Éoliennes à axe horizontal	30
Fig 2.6:Conversion de l'énergie cinétique du vent.	31
Fig 2.7 :Principaux organes du système de conversion éolienne.	31
Fig 2.8 : Correspondance taille et puissance des éoliennes	32
Fig 2.9 :Zones de fonctionnement d'une éolienne	33
Fig 2.10 : Schéma de conception d'une turbine éolienne	37

Fig 2.11 : Modèle mécanique de la turbine éolienne	38
Fig 2.12 : Circuit simplifié d'une phase du stator du GSAP	39
Fig 2.13 : Représentation de la GSAP dans le repère (d,q) de Park	41
Fig 2.14 : Passage de Repère naturel du stator au repère (d,q) de Park	41
Fig 2.15 : Schémas équivalents du GSAP selon les deux axes d et q.	43
Fig 2.16 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.	46
Fig 2.17 : Schéma d'une éolienne Adaptée de singh	46
Fig 2.18 : Coefficient de puissance.	47
Fig 2.19 : Courbes du Coefficient de Puissance (C_p) en fonction du Rapport de Vitesse de Pointe (λ) pour une Éolienne ⁴⁸	
Fig 2.20 : modèle mécanique du multiplicateur.	49
Fig 2.21 : Schéma bloc du modèle de la turbine.	49
Fig. 2.22 : Schéma équivalent d'un redresseur à commande MLI.	51
Fig 2.23 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.	51
Fig. 2.24 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.	53

Chapitre 3

Simulation de la chaîne de production

Fig 3.1 : Modèle Simulink d'une chaîne de conversion éolienne avec génératrice et contrôle de couple	57
Fig 3.2 : Paramétrage d'une éolienne à pas variable dans Simulink	58
Fig 3.4 : Paramètres du bloc : Machine Synchrone à Aimants Permanents	59
Fig 3.5 : Diagramme Simulink d'une chaîne de conversion d'énergie (Machine - Redresseur - Onduleur)	60
Fig 3.6 : Schéma Simulink d'un redresseur triphasé à diodes avec charge RLC	60
Fig 3.7 : Génération de signaux de commande PWM triphasés sous Simulink	61
Fig 3.8 : Évolution de la vitesse de rotation en fonction du temps	62
Fig 3.9 : Évolution du couple en fonction du temps	63
Fig 3.10 : Courant généré par les phases (A,B,C)	63

Fig 3.11 : Évolution de la tension (v_{ac}) en fonction du temps	64
Fig 3.12 : Évolution de la tension (v_{eq}) en fonction du temps	64
Fig 3.13 : Évolution d'un signal alternatif en fonction du temps	65

LISTE DES TABLEAUX :

Tab 2.1 : Catégories des éoliennes	33
------------------------------------	----

Liste des symboles :

C_p	Coefficient de puissance
S	Surface balayée par l'hélice
ρ	Masse volumique de l'air
V	Vitesse moyenne du vent
R	La longueur de la pale
λ	Ratio de vitesse
β	Angle d'orientation des pales
Ωt	Vitesse de rotation de la turbine
Ωm	Vitesse de rotation du générateur
G	Rapport de Multiplicateur
C_g	Couple du multiplicateur de vitesse
C_{em}	Couple électromagnétique
C_m	Couple issue de la turbine
C_{vis}	Couple des frottements visqueux
J_t	Inerties de la turbine
J_m	Inerties de la machine
f_m	Coefficient de frottement de la machine
f_t	Coefficient de frottement des pâles
f	Coefficient de frottement visqueux
W_r	Vitesse électrique du rotor.
θ	représente la position du rotor
M	L'inductance mutuelle entre phase statorique
L_d, L_q	L'inductance sur l'axe 'd', L'inductance sur l'axe 'q'
φ_{dq}	Les flux statoriques dans le repère (d, q)

φ_f	Flux induit par les aimants permanents
R_s	Résistance statorique
i_{dq}	Les courants statoriques dans le repère (d, q)
v_{dq}	Les tensions statoriques dans le repère (d, q)
E_a	La valeur efficace de la f.é.m de l'induite
V_a	Tension aux bornes du générateur en couplage étoile
I	Courant alternatif du stator du générateur
R	Résistance du bobinage de stator du générateur

Introduction Générale

Introduction Générale

Au cours des dernières décennies, l'humanité a connu une croissance économique et démographique sans précédent, engendrant une demande énergétique croissante. Historiquement, cette demande a été principalement couverte par les énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz naturel), qui représentent encore près de 80 % de la consommation énergétique mondiale (IEA, 2023)¹. Toutefois, l'exploitation massive de ces ressources a conduit à de lourdes conséquences environnementales : changement climatique, émissions de gaz à effet de serre (GES), pollution atmosphérique et raréfaction des ressources naturelles.

Face à cette situation, le développement des énergies renouvelables s'impose comme une nécessité stratégique et environnementale. Issues de ressources naturelles disponibles localement et inépuisables – comme le soleil, le vent, l'eau ou la biomasse – elles offrent une alternative propre et durable aux énergies conventionnelles. Parmi elles, l'énergie éolienne se distingue par son potentiel élevé de production et sa maturité technologique (REN21, 2023)². À travers le monde, la capacité installée d'énergie éolienne a considérablement augmenté, dépassant les 950 GW en 2023, avec une forte dynamique en Europe, en Chine, en Inde et en Afrique du Nord.³

Cependant, malgré ses nombreux avantages, l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques nationaux n'est pas sans défis. En raison de son caractère intermittent et non contrôlable, la production éolienne dépend étroitement des conditions météorologiques, ce qui peut générer des déséquilibres dans la gestion du réseau électrique.⁴ L'intégration efficace de cette source d'énergie requiert donc des solutions techniques avancées : systèmes de prévision, stockage d'énergie, renforcement du réseau et algorithmes de gestion intelligente.

Dans ce contexte, cette étude de fin de cycle se propose d'analyser les aspects fondamentaux liés à l'énergie éolienne et aux méthodes d'intégration dans les systèmes électriques modernes. Elle abordera dans un premier temps une vue globale sur les énergies renouvelables, puis une étude détaillée du fonctionnement et des caractéristiques des systèmes éoliens. Ensuite, l'étude se penchera sur les stratégies d'intégration au réseau, les problèmes rencontrés, ainsi que les technologies utilisées pour améliorer la stabilité et la fiabilité. Enfin, une simulation ou étude de cas permettra de valider les concepts étudiés.

L'objectif principal est de contribuer à la compréhension et à l'optimisation de l'utilisation de l'énergie éolienne dans un contexte de transition énergétique mondiale vers un modèle plus durable, plus propre et plus résilient.

Dans le premier chapitre, nous parlerons des types d'extraction d'énergie, de l'importance des énergies renouvelables et des types d'énergies renouvelables, y compris l'énergie éolienne. Dans le deuxième chapitre, nous avons parlé de l'énergie éolienne, de son fonctionnement, de ses types, de ses composants et de toute la technologie utilisée dans l'énergie éolienne. Dans le troisième et dernier chapitre, nous avons parlé de la simulation de la chaîne de production.

Chapitre 1

Définition de l'énergie renouvelable

Introduction

Les énergies renouvelables proviennent de ressources naturelles capables de se reconstituer rapidement, souvent plus vite qu'elles ne sont consommées. Le soleil et le vent en sont des exemples emblématiques, puisqu'ils sont disponibles en permanence et partout sur la planète. Ces sources d'énergie sont inépuisables à l'échelle humaine et accessibles dans la plupart des régions du monde.

À l'opposé, les énergies issues des combustibles fossiles comme le charbon, le pétrole ou le gaz naturel, sont limitées. Leur formation nécessite des millions d'années, ce qui les rend non renouvelables à l'échelle du temps humain. Leur utilisation entraîne la libération massive de gaz à effet de serre, notamment le CO₂, ce qui aggrave le dérèglement climatique.

À l'inverse, produire de l'énergie à partir de sources renouvelables engendre beaucoup moins d'émissions polluantes. Pour lutter efficacement contre le changement climatique, il est essentiel de réduire notre dépendance aux énergies fossiles, responsables de la majorité des émissions actuelles, au profit des énergies propres.

De plus, les énergies renouvelables sont devenues plus économiques dans de nombreux pays et génèrent jusqu'à trois fois plus d'emplois que les industries fossiles.⁵

1 les différents types d'énergie :

1.1 Énergies fossiles :

Les énergies fossiles tirent leur origine de la dégradation lente de matières organiques — végétales et animales — enfouies dans les profondeurs de la Terre depuis des millions d'années. Elles regroupent principalement trois grandes sources :

- Le pétrole
- Le charbon
- Le gaz naturel

Ces ressources sont qualifiées de non renouvelables, car leur formation prend énormément de temps et ne peut se reproduire à l'échelle de la vie humaine. Leur utilisation, notamment par combustion, entraîne l'émission de dioxyde de carbone (CO₂), un gaz à effet de serre qui joue un rôle majeur dans le dérèglement climatique.⁶



Fig1.1 : Énergies fossiles

1.2 Énergies renouvelables :

1.2.1 Définition des énergies renouvelables :

Les énergies renouvelables, souvent abrégées en EnR, correspondent à des méthodes de production d'énergie reposant sur des ressources naturelles inépuisables ou capables de se régénérer plus vite qu'elles ne sont utilisées. Elles s'opposent ainsi aux énergies fossiles – comme le charbon, le pétrole ou le gaz – dont les réserves sont limitées et non renouvelables à l'échelle humaine.

Contrairement aux combustibles fossiles, les énergies renouvelables tirent leur origine de phénomènes naturels continus tels que la lumière du soleil ou les mouvements du vent, qui sont disponibles en permanence ou se renouvellent naturellement.

On les qualifie parfois, de manière approximative, d'«énergies vertes» ou d'«énergies propres». Pourtant, bien que ces sources d'énergie aient en général un impact environnemental plus faible, elles ne sont pas totalement exemptes d'effets négatifs. Leur mise en œuvre peut également entraîner des perturbations écologiques notables, ce qui mérite d'être pris en compte dans toute réflexion sur la transition énergétique.⁷



Fig1.2 : Énergies renouvelables

1.2.2 Quelles sont les énergies renouvelables : classement et liste des EnR :

Il existe plusieurs types d'énergies renouvelables, produites à partir de sources différentes

1.2.2.1 Énergie solaire :

L'énergie solaire provient des réactions de fusion nucléaire se produisant au cœur du Soleil, qui émet une large gamme de rayonnements transportant cette énergie jusqu'à la Terre. Ces rayonnements, allant des ondes radio aux rayons gamma, en passant par la lumière visible, sont constitués de photons — les particules élémentaires de la lumière et porteurs de l'énergie solaire.

Dans un usage courant, le terme « énergie solaire » désigne l'énergie électrique ou thermique produite à partir du rayonnement solaire, qui constitue la source primaire exploitée dans ce contexte..⁸



Fig1.3 : Énergie solaire

Actuellement, il existe deux voies principales d'exploitation de l'énergie solaire :

1.2.2.1.1 Le solaire photovoltaïque :

L'énergie photovoltaïque repose sur la transformation de la lumière en électricité. Ce phénomène a été découvert en 1839 par le physicien français Edmond Becquerel, mais ce n'est qu'en 1954 qu'il a connu une première utilisation à l'échelle industrielle. Le principe de base s'appuie sur le fait que le courant électrique correspond à un déplacement d'électrons. Pour déclencher ce mouvement, les photons — particules qui composent la lumière — excitent les électrons présents à la surface de certains matériaux semi-conducteurs.

Concrètement, une cellule photovoltaïque capte l'énergie solaire et la convertit en électricité grâce à un semi-conducteur, généralement constitué de silicium. Plusieurs de ces cellules sont assemblées pour former un module photovoltaïque qui produit du courant continu. Ce courant est ensuite converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur, ce qui permet son utilisation dans les réseaux électriques classiques.

Les modules photovoltaïques, réunis en panneaux solaires, peuvent équiper aussi bien de petites installations domestiques que de grandes centrales solaires à l'échelle industrielle⁹.

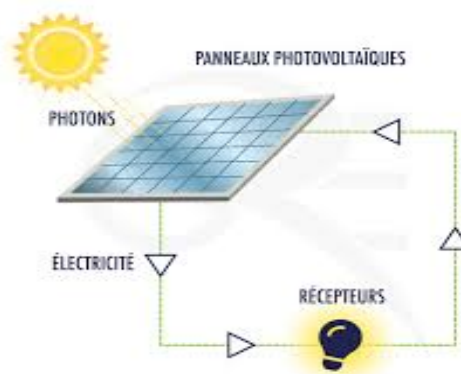


Fig1.4 : Le solaire photovoltaïque

1.2.2.1.2 Le solaire thermique :

L'énergie solaire thermique consiste à capter la chaleur issue des rayons du soleil pour l'utiliser directement. Ce procédé concerne des systèmes fonctionnant à basse température (inférieure à 100 °C) et s'adresse principalement aux besoins domestiques et tertiaires, comme l'eau chaude sanitaire et le chauffage, ainsi qu'à diverses applications industrielles. Aujourd'hui, cette forme d'énergie solaire représente la majeure partie de l'exploitation solaire mondiale.

Pour cela, on utilise des capteurs thermiques conçus pour absorber la chaleur solaire et la transmettre à un fluide caloporteur qui circule vers les points d'utilisation. Ces capteurs varient du modèle simple, adapté aux usages résidentiels, aux dispositifs plus sophistiqués destinés à l'industrie.

Parmi les types les plus courants, on trouve les capteurs plans, composés d'une surface noire absorbante du rayonnement solaire, d'un isolant thermique, et d'une vitre qui minimise les pertes de chaleur. La température du fluide peut s'élever jusqu'à 70 °C au-dessus de la température ambiante. Il existe également des capteurs à air, utilisés notamment pour le séchage agricole, ainsi que des capteurs non vitrés en caoutchouc ou plastique, souvent employés pour chauffer les piscines. Pour les applications industrielles requérant des températures élevées — telles que le nettoyage d'abattoirs ou la pasteurisation — on utilise des capteurs sous vide, composés de tubes en verre vidés d'air afin d'assurer une isolation thermique optimale. À l'intérieur, un absorbeur capte l'énergie solaire et la transfère au fluide caloporteur.¹⁰



Fig1.5 : Le solaire thermique

1.2.2.2 L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique provient du mouvement de l'eau sous diverses formes : chutes, rivières, courants marins, marées ou encore vagues. Elle peut être de nature cinétique, résultant du déplacement de l'eau, comme dans les cours d'eau ou les océans, ou potentielle, liée à la gravité, comme dans le cas des chutes d'eau et des barrages.

Aujourd'hui, cette forme d'énergie est principalement utilisée pour produire de l'électricité. Cependant, elle a longtemps servi à générer de l'énergie mécanique, notamment à travers les moulins à eau, et à faciliter les déplacements en tirant parti des courants fluviaux..¹¹

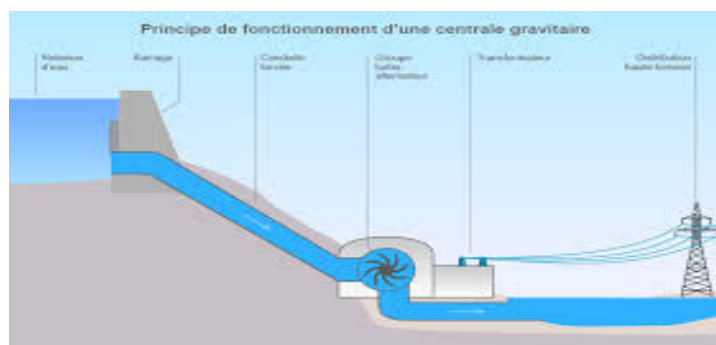


Fig1.6 : L'énergie hydraulique

1.2.2.3 L'énergie biomasse :

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale ou animale. Il s'agit de l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisées par l'humanité, remontant à la maîtrise du feu à la préhistoire. Aujourd'hui, cette énergie est exploitée pour produire de l'électricité dans des centrales spécifiques, appelées centrales biomasse. Celles-ci utilisent la chaleur générée par la combustion de matériaux organiques tels que le bois, les végétaux, les résidus agricoles ou encore les déchets ménagers biodégradables. On peut également en tirer du biogaz, issu de la fermentation de ces mêmes matières, et utilisé comme source d'énergie.¹²

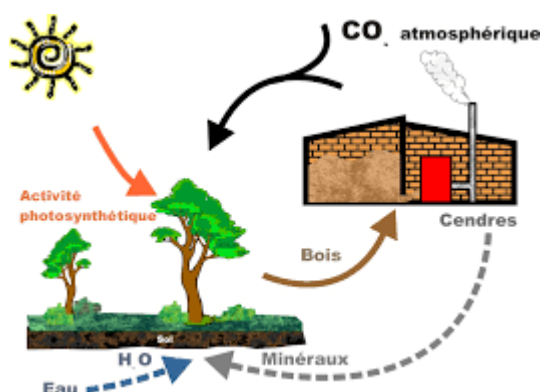


Fig 1.7 : L'énergie biomasse

1.2.2.4 L'énergie géothermique :

L'énergie géothermique désigne la chaleur accumulée sous la surface terrestre, qui peut être exploitée comme source renouvelable de chaleur et d'électricité. Cette énergie est récupérée en forant des puits permettant la circulation d'un fluide ou d'une saumure à travers un réservoir souterrain. La chaleur extraite est ensuite utilisée directement pour le chauffage ou convertie en électricité à la surface. La faisabilité et l'efficacité de cette exploitation dépendent des températures et débits des fluides disponibles, qui varient selon la profondeur du réservoir et les propriétés de la roche, telles que la porosité et la perméabilité.

On distingue trois types principaux de centrales géothermiques :

1. Les centrales à vapeur sèche exploitent la vapeur naturelle provenant directement d'un réservoir géothermique pour entraîner les turbines génératrices. La première centrale de ce type fut construite en 1904 en Toscane, en Italie, où la vapeur jaillissait naturellement du sol.
2. Les centrales à cycle flash utilisent l'eau chaude sous haute pression extraite du sous-sol, qu'elles convertissent en vapeur pour faire tourner les turbines. Après condensation, l'eau est réinjectée dans la terre afin de préserver la ressource. Ce type de centrale est le plus répandu dans le monde.
3. Les centrales à cycle binaire transfèrent la chaleur de l'eau géothermique chaude à un fluide secondaire, qui vaporise sous l'effet de cette chaleur. La vapeur produite alimente alors les turbines pour générer de l'électricité.¹³

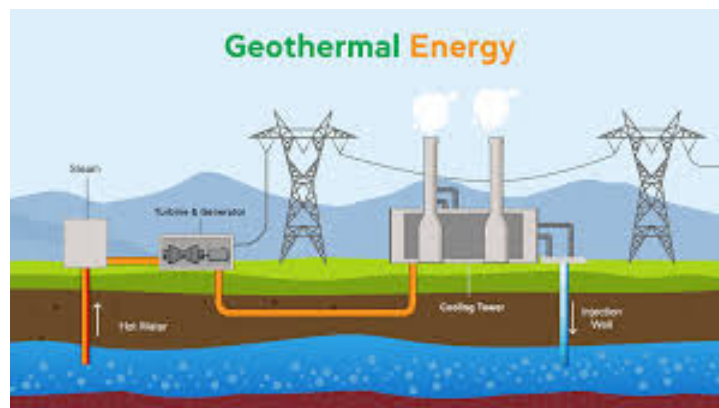


Fig1.8 : L'énergie géothermique

1.2.2.5 L'énergie éolienne:

L'énergie éolienne provient de la force du vent, une forme d'énergie cinétique exploitée depuis longtemps pour faire avancer les voiliers, actionner des moulins à vent, ou encore produire de l'électricité à l'aide d'aérogénérateurs tels que les éoliennes. Il s'agit d'une source d'énergie renouvelable, propre et inépuisable.

L'installation de systèmes éoliens constitue une solution efficace pour alimenter en électricité des zones isolées bénéficiant de conditions venteuses favorables. Ces systèmes offrent plusieurs avantages, notamment leur souplesse d'utilisation et leur grande fiabilité.

On distingue principalement deux types d'éoliennes modernes : celles à axe horizontal, les plus répandues, et celles à axe vertical, utilisées dans des cas spécifiques..¹⁵



Fig1.9: L'énergie éolienne

1.2.2.5.1 Contexte historique :

Depuis l'Antiquité, le vent a été exploité pour produire de l'énergie mécanique. Dès 3000 avant J.-C., il servait à propulser les navires, puis à faire fonctionner des moulins à grains ou à olives, ainsi qu'à pomper de l'eau. Au Moyen Âge, cette énergie mécanique a également alimenté des activités industrielles comme les forges.

Transformer l'énergie éolienne en énergie mécanique est relativement simple, à condition de bénéficier d'un potentiel éolien suffisant et de pouvoir supporter les variations parfois violentes du vent. Par ailleurs, les avancées technologiques en électrotechnique, électronique et matériaux ont permis de concevoir des éoliennes très performantes, capables de produire une puissance importante tout en minimisant leur impact environnemental.

Dans les zones isolées, où la rentabilité est plus accessible, des petites éoliennes d'une puissance allant de quelques centaines de watts à plusieurs dizaines de kilowatts sont commercialisées depuis longtemps. La baisse des coûts des panneaux photovoltaïques a aussi favorisé la création de systèmes hybrides combinant énergie éolienne et solaire, profitant ainsi de la complémentarité fréquente entre vent et soleil, ce qui réduit les coûts liés au stockage de l'énergie par batteries dans les sites isolés.

L'histoire du développement de l'énergie éolienne a été largement marquée par des facteurs externes, tels que l'apparition de la machine à vapeur, la généralisation de l'électricité, ou encore la crise énergétique de 1973. Plus récemment, les accords de Kyoto jouent un rôle moteur dans l'expansion de cette technologie.¹⁶



Fig 1.10 : historique des eolienne

1.2.2.5.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

Tout comme l'énergie solaire, l'énergie éolienne est une énergie renouvelable, mais sa production et son exportation sont soumises à certaines contraintes. Décrivez le principal intérêt de l'énergie éolienne. **17**

1.2.2.5.2.1 Les avantages :

- **Énergie renouvelable et inépuisable**

Le vent est une ressource naturelle constante et gratuite. Contrairement aux énergies fossiles, l'éolien ne dépend pas de matières premières limitées, ce qui en fait une source d'énergie durable à long terme. **18**

- **Réduction des émissions polluantes**

La production d'électricité par éoliennes ne génère ni gaz à effet de serre ni pollution de l'air ou de l'eau. Chaque kilowattheure produit permet d'éviter environ 1 kg de CO₂, contribuant ainsi à la lutte contre le changement climatique. **19**

- **Faibles coûts d'exploitation**

Une fois installées, les éoliennes ont des coûts de fonctionnement et de maintenance relativement bas. De plus, leur durée de vie prolongée permet de rentabiliser l'investissement initial sur le long terme. **20**

- **Création d'emplois locaux**

Le développement de l'éolien génère des emplois dans la construction, l'installation, la maintenance et la recherche. En 2018, environ 18 000 emplois directs et indirects étaient liés à l'éolien en France. **21**

1.2.2.5.2.2 Inconvénients :

- **Intermittence de la production**

L'énergie éolienne dépend de la disponibilité du vent, ce qui rend sa production d'électricité variable et difficile à prévoir. Cette intermittence nécessite des solutions de stockage ou une combinaison avec d'autres sources d'énergie pour assurer une fourniture stable. **22**

- **Coûts d'installation et de maintenance élevés**

La construction de parcs éoliens implique des investissements initiaux importants, notamment pour la fabrication, le transport et l'installation des éoliennes. De plus, leur maintenance, surtout en milieu marin, peut être coûteuse et techniquement complexe. **23**

- **Nuisances visuelles et sonores**

Les éoliennes peuvent défigurer le paysage, notamment dans les zones rurales, et générer du bruit, ce qui peut entraîner des oppositions locales. Les pales en mouvement peuvent également perturber la faune locale, notamment les oiseaux et les chauves-souris. **24**

- **Dépendance aux matières premières**

La fabrication des éoliennes nécessite des matériaux tels que les terres rares, l'acier et le cuivre.

L'extraction de ces ressources a des impacts environnementaux et sociaux considérables, et leur disponibilité peut être soumise à des fluctuations de prix et à des tensions géopolitiques.²⁵

1.2.2.5.3 Les différentes utilisations de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne peut être exploitée de différentes manières, selon les besoins :

- Elle permet de convertir la force du vent en énergie motrice, utile notamment pour comprimer des fluides ou pomper des liquides.
- Elle peut être utilisée directement sous forme d'énergie mécanique, par exemple pour actionner une meule de moulin, pomper de l'eau ou propulser un véhicule à voile.
- Enfin, elle peut être transformée en énergie électrique à l'aide d'un générateur, produisant du courant alternatif ou continu, selon les dispositifs utilisés.²⁶

2 Evaluation de l'énergie éolienne dans le monde :

Aujourd'hui, l'énergie éolienne représente environ 1 % de la production électrique mondiale. Des milliers d'éoliennes sont installées à travers différentes régions, offrant une capacité totale supérieure à 58 982 mégawatts pour les compagnies de services publics..²⁷

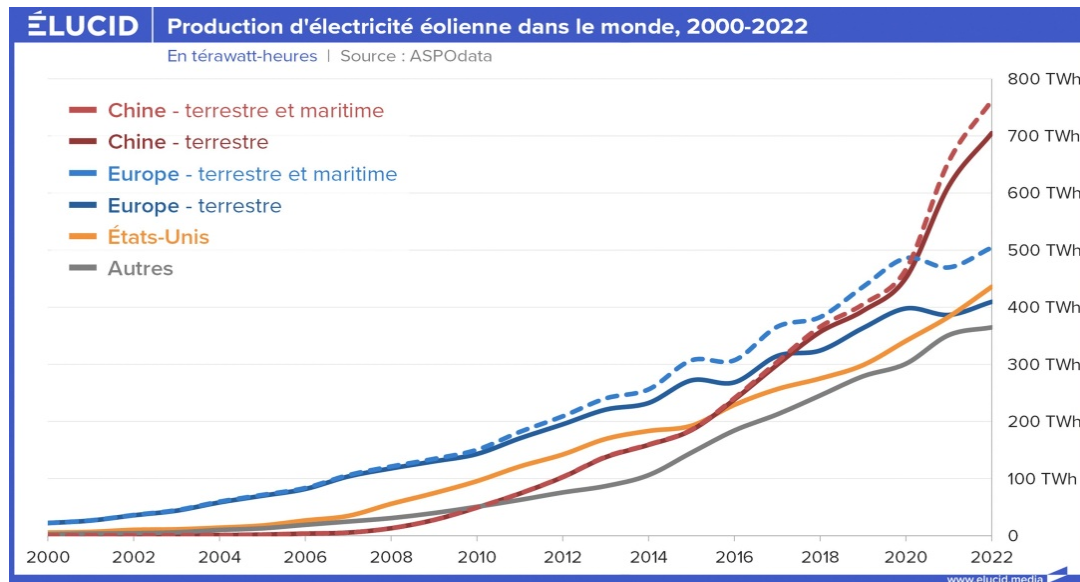


Fig1.11 : production d'électricité éolienne dans le monde 2000-2022

2.1 État actuel de l'énergie éolienne mondiale :

1. Capacité installée cumulée

- **Fin 2023** : le monde a franchi la barre symbolique du **térawatt** (1 021 GW) de capacité éolienne installée, soit une augmentation de 13 % par rapport à 2022. ²⁸

2. Installations en 2023

- **Nouvelles installations** : environ **117 GW** de capacité éolienne ont été installées en 2023, un record mondial, représentant une augmentation de 50 % par rapport à l'année précédente. 29

3. Répartition géographique

- **Chine** : a dominé avec environ **69 GW** installés, représentant près de 65 % des nouvelles capacités mondiales.
- **États-Unis** : environ **7,5 GW** installés.
- **Brésil** : environ **4,8 GW** installés.
- **Inde** : environ **2,8 GW** installés.
- **Allemagne** : environ **2,4 GW** installés. 30

2.2 Part de l'éolien dans la production mondiale d'électricité

- **1er semestre 2023** : l'éolien représentait **8,8 %** de la production mondiale d'électricité, se classant ainsi comme la **5e source** derrière le charbon, le gaz naturel, l'hydroélectricité et le nucléaire. 31

2.3 Tendances et perspectives

- **Croissance continue** : la capacité éolienne mondiale continue de croître, avec des projections indiquant une augmentation annuelle de près de **9,4 %** jusqu'en 2028, notamment dans le secteur offshore.
- **Objectifs 2030** : pour atteindre les objectifs climatiques mondiaux, l'industrie éolienne devra installer environ **320 GW** par an d'ici 2030. 32

2.4 Défis et enjeux

- **Intermittence** : la variabilité du vent nécessite des solutions de stockage d'énergie efficaces.
- **Infrastructure** : des défis subsistent concernant l'intégration de l'éolien dans les réseaux électriques existants.
- **Acceptabilité sociale** : certains projets rencontrent des résistances locales liées à l'impact visuel et sonore. 33

3. Éolienne en Algérie :

L'énergie éolienne en Algérie est une ressource encore sous-exploitée, mais elle présente un **potentiel considérable** pour diversifier le mix énergétique national. Voici un état des lieux actualisé avec des sources fiables. 34

3.1 Potentiel éolien de l'Algérie :

L'Algérie dispose d'un des plus grands gisements éoliens terrestres d'Afrique. Selon une étude préliminaire de la Banque mondiale, le pays pourrait atteindre jusqu'à **4 000 GW de capacités techniques** en éolien, ce qui en ferait un leader régional en matière d'énergie éolienne.

Les régions les plus favorables sont le **Sahara** et les **Hauts-Plateaux**, notamment les wilayas de **Tindouf**, **Adrar**, **Illizi**, **Ouargla** et **Tamanrasset**, où les vitesses de vent dépassent souvent les 6 m/s.³⁵

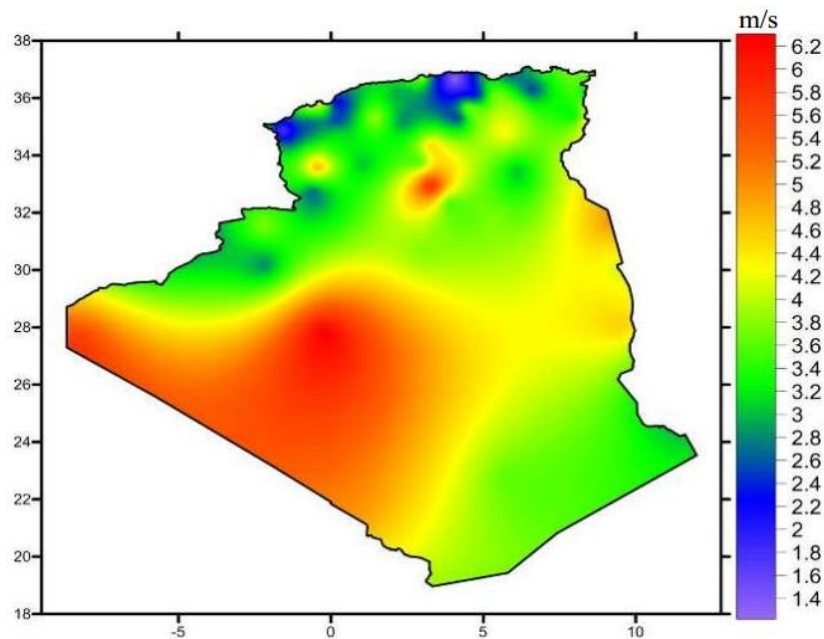


Fig1.12 : Carte annuelle des vents à 10 m du sol pour les 87 points de mesure (m/s)

3.2 Projets en cours et réalisations

1.Parc éolien de Kabertène (Adrar)

- **Capacité** : 10,2 MW
- **Mise en service** : 3 juillet 2014
- **Nombre de turbines** : 12 turbines Gamesa G52/850 de 850 kW chacune
- **Production annuelle** : environ 3,42 GWh . ³⁶

Ce projet pilote a été réalisé par le consortium **Cegelec (Algérie-France)** et la société **Ettarkib** (filiale de Sonelgaz). Il sert de modèle pour les futures fermes éoliennes en Algérie.³⁷

2. Projet de 1 000 MW

Le gouvernement algérien, en collaboration avec la Banque mondiale, étudie le lancement d'un projet de production de **1 000 MW d'énergie éolienne** répartis sur **10 sites**

prometteurs. Ce projet s'inscrit dans le cadre du programme national des énergies renouvelables, visant à produire **15 000 MW d'ici 2035**, dont **3 000 MW en solaire**.³⁸

3.3 Programme national des énergies renouvelables (2015–2030)

Le programme prévoit la réalisation de **22 000 MW** d'énergies renouvelables, répartis comme suit :

- **Photovoltaïque** : 13 575 MW
- **CSP (Concentrated Solar Power)** : 5 010 MW
- **Cogénération** : 2 000 MW
- **Éolien** : 400 MW
- **Biomasse** : 1 000 MW
- **Géothermie** : 15 MW . ³⁹

Ces objectifs visent à réduire la dépendance aux énergies fossiles et à limiter les émissions de CO₂.

3.4 Défis et perspectives :

Malgré un potentiel élevé, le développement de l'éolien en Algérie rencontre plusieurs obstacles :

- **Manque d'infrastructures** adaptées
- **Coûts d'investissement** élevés, notamment dans les zones reculées
- **Cadre réglementaire** en cours d'élaboration
- **Absence de projets industriels locaux** pour la fabrication de turbines

Pour surmonter ces défis, le gouvernement algérien mise sur des partenariats internationaux, notamment avec des entreprises européennes, pour développer les compétences et le savoir-faire dans le domaine de l'éolien.⁴⁰

Conclusion :

Les énergies renouvelables sont des sources naturelles, inépuisables à l'échelle humaine, qui permettent de produire de l'énergie de manière durable et respectueuse de l'environnement. Elles constituent une réponse essentielle aux enjeux du changement climatique, de la pollution et de la raréfaction des ressources fossiles. Parmi ces sources, l'énergie éolienne occupe une place importante : elle exploite la force du vent pour produire de l'électricité sans émissions polluantes. L'éolienne, en tant que technologie de conversion, illustre parfaitement comment l'ingéniosité humaine peut s'appuyer sur des phénomènes naturels pour répondre aux besoins énergétiques modernes. Cette introduction aux énergies renouvelables pose ainsi les fondations nécessaires pour aborder plus en détail le fonctionnement et les enjeux liés à l'énergie éolienne dans les chapitres suivants. ⁴¹

Chapitre 2

Technologie de l'énergie renouvelable

Introduction

Dans un contexte mondial marqué par la raréfaction des ressources fossiles, l'augmentation des besoins énergétiques et l'urgence climatique, les technologies d'énergie renouvelable représentent une solution incontournable pour un développement énergétique durable.

Ce chapitre a pour objectif de présenter les principales technologies permettant de produire de l'électricité à partir de sources naturelles renouvelables telles que le soleil, le vent, l'eau, la biomasse et la géothermie. Chacune de ces filières repose sur des principes physiques distincts et offre des avantages spécifiques en termes de durabilité, d'efficacité énergétique et d'impact environnemental.

Nous explorerons les fondements techniques de ces technologies, leurs applications actuelles, leurs limites ainsi que les perspectives d'évolution. Une attention particulière sera portée à la technologie éolienne, en raison de sa croissance rapide à l'échelle mondiale et de son rôle central dans les stratégies de transition énergétique, notamment en Algérie.

À travers cette analyse, nous chercherons à mieux comprendre le positionnement stratégique des énergies renouvelables dans le mix énergétique futur et les conditions techniques de leur intégration dans les réseaux électriques modernes.⁴²

2.1. L'énergie éolienne :

1.1 Principe de fonctionnement de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne consiste à transformer l'énergie cinétique du vent en d'autres formes d'énergie utiles, principalement mécanique ou électrique. Elle représente une source d'énergie propre et renouvelable. Historiquement, les moulins à vent utilisés pour moudre le grain étaient l'une des premières applications de cette énergie. Aujourd'hui, l'énergie éolienne est largement exploitée pour la production d'électricité ou le pompage de l'eau. L'électricité générée par les éoliennes peut être injectée dans un réseau électrique classique ou servir de complément aux générateurs autonomes dans les zones isolées, non connectées au réseau. La puissance et le débit énergétique produits par une éolienne augmentent proportionnellement à la vitesse du vent.⁴³



Fig 2.1: Un parc éolien

1.2 Types d'éoliennes :

On distingue principalement deux catégories d'éoliennes : celles implantées sur terre, appelées éoliennes terrestres (onshore), et celles installées en mer, dites éoliennes offshore. Chaque type possède ses propres atouts et limites, qui dépendent des spécificités géographiques, économiques et technologiques.⁴⁴

1.2.1 Éoliennes terrestres (On shore) :

Les éoliennes terrestres sont installées sur des terres agricoles, des collines ou des espaces dégagés. Elles représentent la majorité des installations mondiales. Ces éoliennes sont généralement moins chères à installer et bénéficient d'un meilleur retour sur investissement à court terme. Cependant, leur efficacité est limitée par la variabilité du vent sur les sites terrestres.⁴⁵



Fig 2.2 : Éoliennes terrestres

1.2.2 Éoliennes en mer (Offshore):

Les éoliennes offshore sont installées en mer, où les vents sont généralement plus forts et plus constants. Bien qu'elles soient plus coûteuses à installer en raison des défis logistiques et techniques, les éoliennes offshore peuvent produire davantage d'électricité en raison des conditions de vent plus favorables. Elles sont souvent installées loin des côtes, dans des zones où l'espace terrestre est limité (Global Wind Energy Council, 2021).⁴⁶



Fig2.3 : Éoliennes en mer

1.3 Type des turbines éoliennes :

1.3.1 Éolienne à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical, qui ont été parmi les premières à produire de l'électricité, se distinguent des moulins à vent classiques à axe horizontal. Leur principal avantage réside dans le fait que les commandes et le générateur sont installés au niveau du sol, facilitant ainsi leur accès pour la maintenance. Bien que plusieurs modèles expérimentaux aient vu le jour depuis les années 1920, ces éoliennes restent peu répandues aujourd'hui, principalement à cause des contraintes mécaniques liées à leur installation au sol, qui nécessite une grande surface.

Grâce à leur axe de rotation vertical, ces turbines peuvent capter le vent venant de toutes les directions sans besoin de système d'orientation. En résumé, même si elles ont joué un rôle pionnier dans le domaine, les éoliennes à axe vertical ont été largement supplantées par des modèles à axe horizontal plus performants, notamment à cause des limitations mécaniques et d'espace qu'elles imposent.⁴⁷



Fig 2.4 : Éolienne à axe vertical

1.3.2 Éoliennes à axe horizontal :

De nos jours, les éoliennes à axe horizontal sont préférées aux modèles à axe vertical, notamment grâce à leur coût plus faible et à leur meilleure résistance aux contraintes mécaniques. Ces turbines comportent généralement trois pales, ce qui permet de créer un couple moteur efficace pour faire tourner le rotor. Le rotor tripale est le design le plus courant, car il offre un équilibre optimal entre le rendement énergétique, le coût de fabrication et la vitesse de rotation, selon les études spécialisées..⁴⁸



Fig 2.5 : Éoliennes à axe horizontal

2. Conversion de l'énergie dans un système éolien :

Un aérogénérateur, ou éolienne, est un appareil qui convertit une portion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, laquelle est transmise via un arbre de rotation, puis convertie en électricité grâce à un générateur.

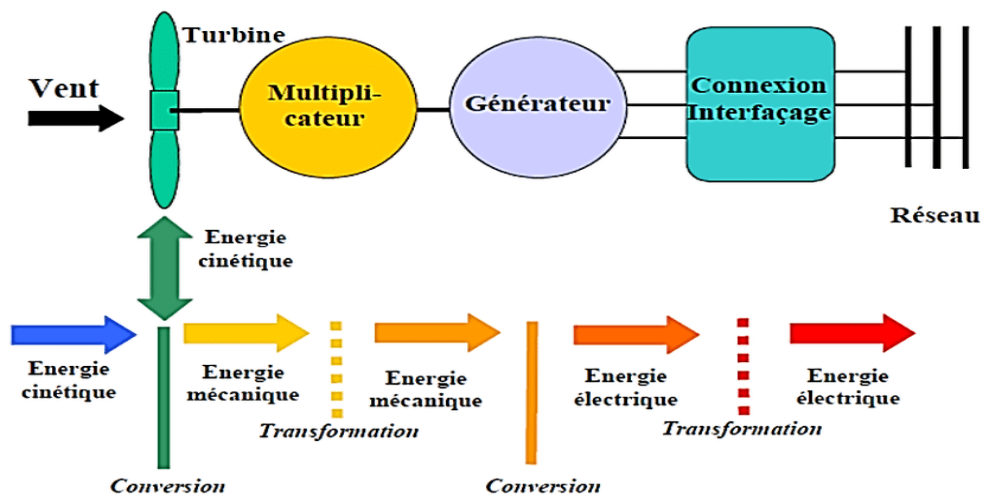


Fig 2.6: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

La production d'énergie éolienne repose sur le fonctionnement classique des moulins à vent. Le souffle du vent fait tourner les pales, lesquelles sont reliées au rotor d'un générateur. Lorsque la vitesse du vent atteint environ 3 m/s, les pales se mettent en mouvement et, grâce à un multiplicateur, entraînent un générateur qui convertit l'énergie mécanique en électricité.

Le système de conversion éolienne (SCE) comprend plusieurs éléments : un générateur électrique entraîné par la turbine via le multiplicateur, un système de contrôle, un convertisseur statique, un transformateur ainsi que la connexion au réseau électrique.⁴⁹

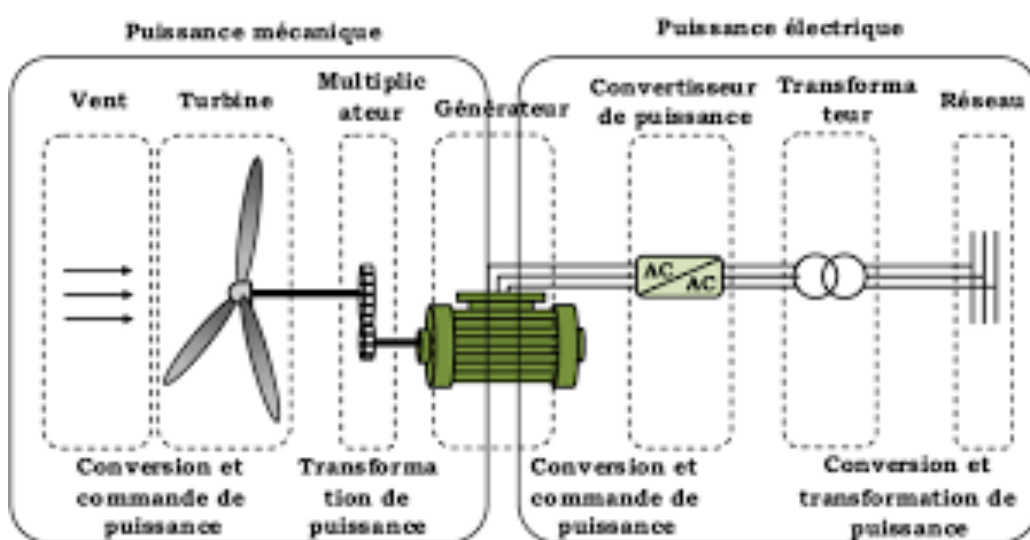


Fig 2.7 : Principaux organes du système de conversion éolienne.

3 Principaux composants d'une éolienne :

Plusieurs configurations d'aérogénérateurs existent, présentant des différences notables. Toutefois, une éolienne classique se compose essentiellement de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle et la tour.

- **Les pales** : Elles sont directement exposées au vent, ce qui provoque leur rotation.
- **Le rotor** : Partie tournante de l'éolienne, il capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en énergie mécanique.
- **La nacelle** : Elle abrite l'ensemble du système de génération électrique ainsi que ses composants annexes. Sa configuration varie selon le type d'éolienne.
- **Le multiplicateur de vitesse** : Ce dispositif augmente la vitesse de rotation entre l'arbre principal entraîné par le vent et l'arbre secondaire qui entraîne le générateur électrique.
- **L'arbre secondaire** : Généralement équipé d'un frein mécanique, il permet d'immobiliser le rotor lors des opérations de maintenance ou pour prévenir tout emballement.
- **Le générateur** : Constitué d'un stator et d'un rotor tournant, il transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.
- **Le contrôleur électronique** : Ce système informatique supervise le fonctionnement de l'éolienne. Il gère le démarrage lorsque la vitesse du vent est suffisante, le freinage, l'orientation du rotor et de la nacelle face au vent, ainsi que la gestion des pannes éventuelles.
- **Systèmes de refroidissement** : Les composants internes de la nacelle sont refroidis soit par des ventilateurs, soit par des radiateurs à eau ou à huile.⁵⁰

4 Classification des éoliennes:

Les générateurs éoliens sont catégorisés selon différents critères, notamment la plage de puissance, l'orientation de leur axe (horizontal ou vertical) et leur mode de fonctionnement, qui peut être à vitesse constante ou variable. On les classe également en fonction de leur localisation : les éoliennes installées sur la terre ferme sont dites « on shore », tandis que celles situées en mer sont appelées « offshore ».

Selon la puissance nominale qu'ils produisent, les aérogénérateurs sont répartis en trois groupes : faible, moyenne et forte puissance. ⁵¹

Le tableau contient les trois catégories des éoliennes et la figure 2.8, montre la correspondance entre la taille et la puissance des éoliennes.

Echelle	Diamètre des pales	Valeur de puissance
Petite puissance	<12m	<40KW
Moyenne puissance	12 à 45m	40 KW à 1 MW
Grande puissance	>46 m	>1 MW

Tab 2.1 : Catégories des éoliennes

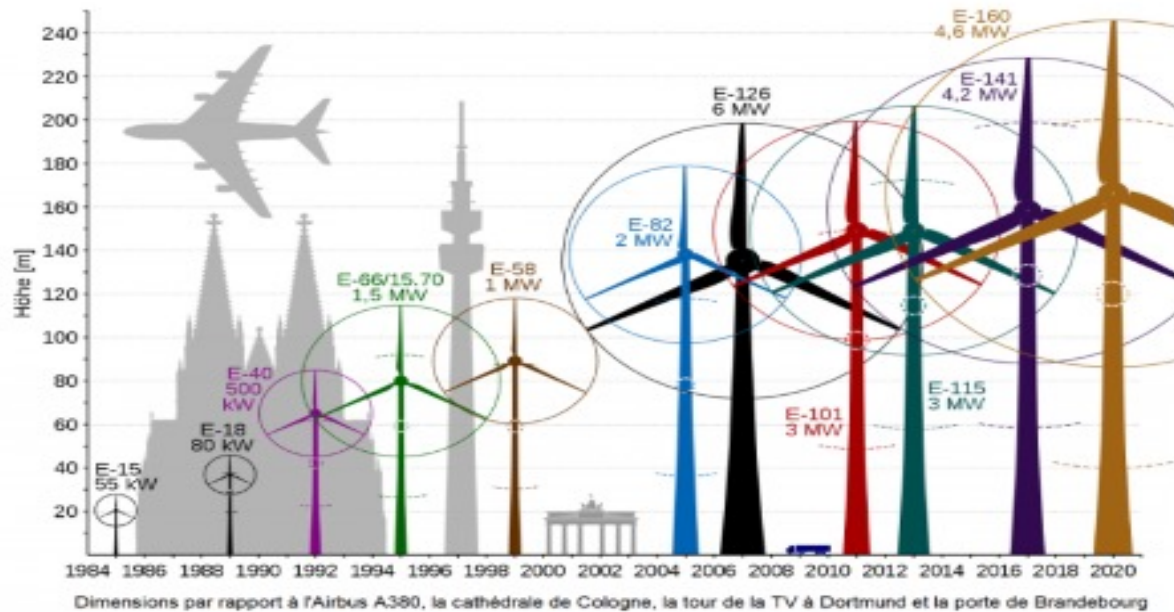


Fig 2.8 : Correspondance taille et puissance des éoliennes

5 Zones de fonctionnement de l'éolienne :

La régulation de la vitesse d'une éolienne a pour rôle d'assurer sa protection face aux vents violents, tels que les rafales, tout en optimisant l'utilisation de l'énergie éolienne disponible. La turbine est conçue pour atteindre une puissance nominale (P_n) à une vitesse nominale du vent (V_n). Lorsque la vitesse du vent (v) dépasse cette valeur nominale, la turbine doit adapter son fonctionnement afin de prévenir tout dommage mécanique, ce qui nécessite de maintenir sa vitesse de rotation quasiment constante.⁵²

Outre la vitesse nominale (V_n), on définit également :

- La vitesse de démarrage (V_d), à partir de laquelle l'éolienne commence à produire de l'électricité.
- La vitesse maximale du vent (V_m), au-delà de laquelle la conversion d'énergie est arrêtée pour garantir la sécurité de la turbine.

Ces trois vitesses (V_d , V_n , V_m) déterminent quatre zones de fonctionnement, comme illustré dans la figure.

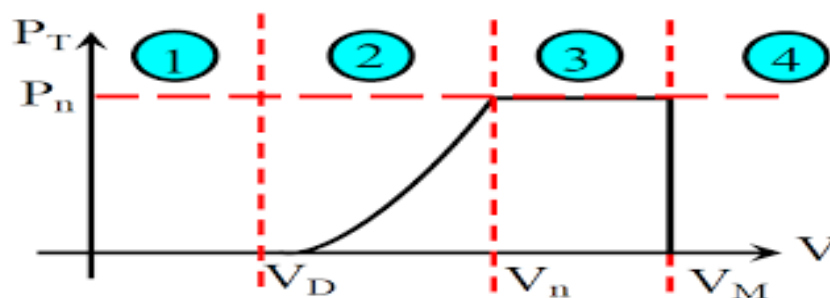


Fig 2.9 :Zones de fonctionnement d'une éolienne

- **Zone I** : il s'agit des vitesses très faibles du vent, insuffisantes pour faire tourner la turbine et produire de l'énergie, donc la puissance générée est nulle ($P = 0$), la turbine est à l'arrêt.
- **Zone II** : dans cette plage, la puissance délivrée augmente avec la vitesse du vent. Un algorithme appelé MPPT (Maximum Power Point Tracking) est utilisé pour extraire la puissance maximale possible.
- **Zone III** : lorsque la vitesse du vent dépasse la vitesse nominale, la turbine maintient une vitesse de rotation constante, et la puissance fournie reste égale à la puissance nominale (P_n). Cette régulation est assurée grâce à un système d'orientation des pales, appelé « contrôle de pas » (pitch control).
- **Zone IV** : à des vitesses de vent trop élevées, supérieures à la vitesse maximale admissible (V_m), les pales sont orientées en position « drapeau » (90°) pour réduire la prise au vent. Pour éviter d'endommager la turbine et le générateur, l'éolienne s'arrête alors et la puissance produite tombe à zéro.⁵³

6 les générateurs utilisés dans les éoliennes :

Les éoliennes utilisent principalement trois types de générateurs pour convertir l'énergie mécanique du vent en électricité : les générateurs asynchrones, les générateurs synchrones et les générateurs à double alimentation.

1. **Générateur asynchrone (ou induction)** : Ce type de générateur est robuste et simple, mais nécessite d'être connecté au réseau électrique pour fonctionner. Il est couramment utilisé dans les petites et moyennes éoliennes.
2. **Générateur synchrone** : Il peut fonctionner à vitesse variable et est souvent équipé d'aimants permanents. Ce type est adapté aux éoliennes de plus grande taille et permet une meilleure régulation de la production d'électricité.
3. **Générateur à double alimentation (GADA)** : Ce système combine les avantages des machines synchrones et asynchrones. Il permet une variation de la vitesse de rotation tout en maintenant une connexion stable au réseau, ce qui est idéal pour les grandes installations éoliennes.⁵⁴

Chaque type de générateur présente des avantages spécifiques en fonction de la taille de l'éolienne et des conditions de vent locales.

6.1 Système de génération étudié dans ce mémoire :

6.1.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) :

Dans le domaine des petites et moyennes éoliennes, les machines synchrones à aimants permanents (MSAP) sont plus couramment utilisées que les machines asynchrones. En effet, les éoliennes équipées de machines asynchrones requièrent des bagues collectrices, des balais ainsi qu'un multiplicateur de vitesse, ce qui augmente le coût de l'installation et nécessite une maintenance plus spécifique.

Pour pallier ces contraintes, des éoliennes utilisant des machines synchrones avec un grand nombre de paires de pôles, directement couplées à la turbine, ont été développées. Ces

machines synchrones suppriment le besoin de balais et de bagues collectrices. Les MSAP offrent un rendement élevé, une commande flexible, et demandent moins de maintenance, tout en fonctionnant avec un facteur de puissance élevé grâce aux aimants permanents intégrés. De plus, elles ne consomment pas d'énergie réactive dans le rotor, ce qui les rend particulièrement adaptées aux systèmes de conversion d'énergie éolienne (WECS).

Cependant, pour des puissances plus importantes, leur usage reste limité en raison de leur coût plus élevé comparé à celui des générateurs à induction de taille équivalente.

Sur le plan architectural, plusieurs topologies de génératrices existent, notamment les machines à flux radial et les machines à flux axial.⁵⁵

6.1.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée à leurs avantages. Parmi les avantages et les inconvénients de l'exploitation de l'énergie éolienne on peut énumérer ce qui suit :

6.1.2.1 Les Avantages :

- L'énergie éolienne est une source d'énergie propre, respectueuse de l'environnement et économique. Elle ne cause aucun dommage écologique et joue un rôle clé dans la diminution des émissions de dioxyde de carbone (CO₂).
- En tant qu'énergie renouvelable, elle ne nécessite aucun combustible, fonctionnant uniquement grâce à la force du vent.
- Cette énergie est gratuite, inépuisable et ne génère aucune pollution. Elle n'émet aucune substance dangereuse ni aucun déchet nocif pour l'environnement.
- L'énergie éolienne est abondante et pourra être exploitée par les générations futures sans crainte d'épuisement.
- Elle ne produit ni gaz à effet de serre, ni déchets toxiques ou radioactifs, et n'entraîne pas de pollution des sols, des eaux ou de l'air.
- Les installations éoliennes peuvent être arrêtées rapidement en cas d'urgence, offrant une flexibilité que ne permettent pas toujours d'autres types d'installations énergétiques.
- Les parcs éoliens peuvent être implantés sur des terres agricoles, sont facilement démontables et ne laissent pas de traces durables sur le terrain.
- Cette énergie est particulièrement adaptée aux pays en développement, car elle s'intègre aisément dans des réseaux électriques existants.
- L'industrie éolienne offre également un fort potentiel en termes de création d'emplois, contribuant ainsi à la réduction du chômage.⁵⁶

6.1.2.2 Les inconvénients :

- L'énergie éolienne dépend des mouvements des masses d'air, ce qui la rend intermittente et irrégulière.
- Les éoliennes ont un impact visuel notable, pouvant altérer l'esthétique du paysage.
- Leur maintenance est régulière et souvent coûteuse, notamment pour les installations en mer.
- Elles génèrent une pollution sonore, avec un bruit pouvant atteindre environ 35 décibels à 500 mètres de distance.
- Les éoliennes peuvent représenter un danger pour les oiseaux migrateurs, créant des obstacles mortels.
- Elles peuvent perturber les ondes électromagnétiques (télévision, radio, téléphones portables), ce qui limite leur installation à proximité des habitations.
- Le vent est une grandeur stochastique avec des fluctuations importantes, ce qui entraîne des variations de puissance et constitue un défi majeur pour la stabilité de la conversion énergétique.⁵⁷

7 Modélisation de la turbine éolienne :

7.1 Modèle de vent :

Le vent constitue une variable clé pour le fonctionnement des systèmes éoliens. Sa vitesse, tridimensionnelle, présente des variations aléatoires et une grande instabilité. Par conséquent, il est essentiel de modéliser la vitesse du vent comme une fonction scalaire dépendant du temps afin de mieux représenter ses fluctuations.

$$V=f(t) \quad (II.1)$$

Elle est modélisée par une somme des composantes harmoniques avec la forme :

$$V = V_m + \sum_{n=1}^k a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_n \cdot t) \quad (II.2)$$

V_m : Valeur moyenne de la vitesse du vent ;

k : le Rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent ;

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

ω_n : Pulsation de l'harmonique de l'ordre.⁵⁸

7.2 Modèle de la turbine éolienne

Une turbine éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique (vent) en énergie mécanique. Le mécanisme qui est étudié ici, est composé d'une turbine éolienne d'une puissance nominale comprenant des pales de longueur R entraînant un générateur à travers un multiplicateur de vitesse de gain G . Le coefficient de puissance C_p indique le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Il est en fonction de la vitesse spécifique λ et de l'angle de calage des pales β . 59

Il est différent d'une turbine à une autre vu sa dépendance de la caractéristique de chacune. Durant ce travail, ce coefficient sera modélisé par l'expression analytique suivante :

$$C(\lambda, \beta) = 0.5156 \left[\left(\frac{116}{\lambda i} \right) - 0.4 \beta - 5 \right] e^{\lambda i^{21}} 0.0068 \quad (\text{II.3})$$

λ est un coefficient défini par :

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad (\text{II.4})$$

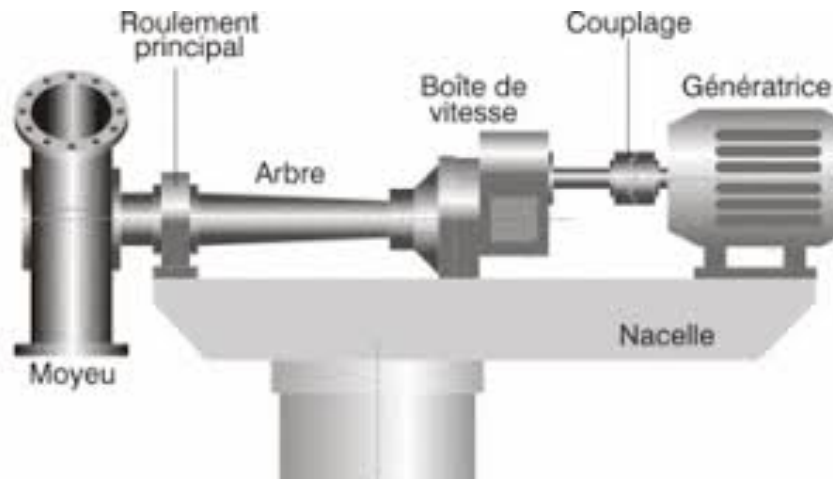


Fig 2.10 : Schéma de conception d'une turbine éolienne

La puissance aérodynamique, qui est convertie par une turbine du vent, ***P_{turbine}*** dépend du coefficient de puissance C_p . Elle est donnée par

$$P_{aero} = C_p(\lambda, \beta) \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (\text{II.5})$$

$$S = 0.5 \pi \cdot R^2 \quad (\text{II.6})$$

$$\text{Avec : } \lambda = \frac{\Omega \cdot R}{v} \quad (\text{II.7})$$

- λ : La vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.
- Ωt : La vitesse de rotation de la turbine.
- V : Vitesse moyen du vent.
- $\rho=1.25 \text{ kg/m}^3$: La densité d'air ou masse volumique de l'air dans les conditions normales de température et de pression.
- R : La longueur de la pale. Le couple aérodynamique apparaissant au niveau de la turbine est donc en fonction de cette puissance est donnée par :

$$C_{aero} = \frac{P_{aero}}{\Omega t} = Cp(\lambda, \beta) \frac{1}{2\Omega} \rho \cdot V^3 \cdot \pi \cdot R^2 \text{ (II.8)}$$

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie par l'équation mathématique suivante :

$$P_{ven} = 0.5 \rho \cdot S \cdot V^3 \text{ (II.9)}$$

7.3 Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur, ou boîte de vitesses, joue le rôle d'intermédiaire entre la turbine et le générateur. Il adapte la faible vitesse de rotation de la turbine à la vitesse élevée requise par le générateur. Considéré comme un élément rigide, **60** il est modélisé simplement par un gain. Ce composant détermine le couple mécanique et la vitesse de rotation de la machine selon les relations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aero}}{G} \text{ (II.10)}$$

$$\Omega m = G \cdot \Omega \text{ (II.11)}$$

- G : Rapport de multiplication.
- C_g : couple du multiplicateur de vitesse.
- Ωm : vitesse du générateur [rad/s].

7.4 Modélisation de l'arbre de la machine

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

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

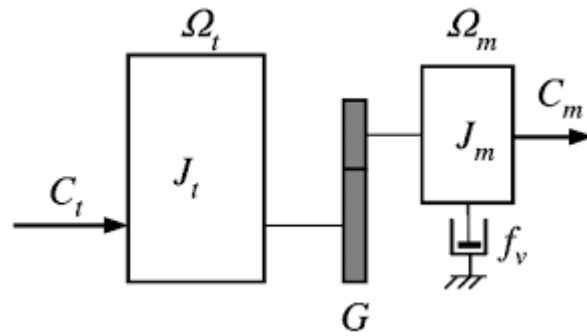


Fig 2.11 : Modèle mécanique de la turbine éolienne

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

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

$$C_{vis} = f \Omega_m = (f_m + f_t) \Omega_m \quad (II.14)$$

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

$$(J_t + J_m) \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} \quad (II.15)$$

$$(J_t + J_m) \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{mul} - C_{em} - C_{vis} \quad (II.16)$$

$$(J_t + J_m) \cdot \frac{d\Omega}{dt} = C_{mul} - C_{em} - (f_m + f_t) \Omega_m \quad (II.17)$$

Avec : J_t : Inerties de la turbine.

J_m : Inerties de la machine.

C_{em} : Couple électromagnétique Produit par la génératrice

C_{vis} : Des frottements visqueux

f_m : Coefficient de frottement de la machine.

f_t : Coefficient de frottement des pâles.

Ω_m : la vitesse de rotation C_{mul} : le couple du multiplicateur

7.5 Modélisation de la Génératrice synchrone à aimants permanents :

Pour modéliser une génératrice synchrone à aimants permanents (GSAP), plusieurs hypothèses simplificatrices sont généralement adoptées :

- L'entrefer est supposé constant,
- Le circuit magnétique est considéré comme non saturé,
- Les phénomènes d'hystérésis, les courants de Foucault ainsi que l'effet de peau sont négligés,
- L'impact de l'encochage est jugé insignifiant,
- La résistance des bobinages est tenue constante, sans prise en compte des variations liées à la température.

La structure de cette génératrice comprend un enroulement triphasé au niveau du stator, tandis que l'excitation est assurée par des aimants permanents fixés sur le rotor. Ces aimants sont considérés comme rigides et leur perméabilité magnétique est proche de celle de l'air.

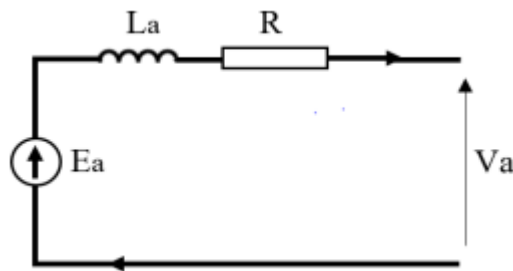


Fig 2.12 : Circuit simplifié d'une phase du stator du GSAP

E_a : La valeur efficace de la f.é.m de l'induite (V) ;

L_a : inductance de fuite du bobinage de stator du générateur (H)

R : résistance du bobinage de stator du générateur (Ω) ;

V_a : tension aux bornes du générateur en couplage étoile (V) ;

Equations des tensions statoriques et rotoriques :

$$\begin{cases} V_a = R_s.I_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ V_b = R_s.I_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ V_c = R_s.I_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \\ V_f = R_s.I_f + \frac{d\varphi_f}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.18})$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \text{Vecteur de tension de phases statoriques.}$$

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \text{Vecteur de courant de phases statoriques.}$$

$$\begin{bmatrix} \varphi_a \\ \varphi_b \\ \varphi_c \end{bmatrix} = \text{Vecteur des flux totaux traversant de les bobines statoriques.}$$

R_s : Résistance des phases statoriques.

L_s : Inductance statoriques.

M : L'inductance mutuelle entre phase statoriques. Equations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_a = L_s I_a + M_{ab} I_b + M_{ac} I_c + M_{af} I_f \\ \varphi_b = L_s I_b + M_{ba} I_a + M_{bc} I_c + M_{bf} I_f \\ \varphi_c = L_s I_c + M_{ca} I_a + M_{cb} I_b + M_{cf} I_f \\ \varphi_f = L_f I_f + M_{fa} I_a + M_{fb} I_b + M_{fc} I_c \end{cases} \quad (\text{II.19})$$

7.5.1 Passage au repéré de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère. Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques fixes déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor illustrée par la Figure 2.12.

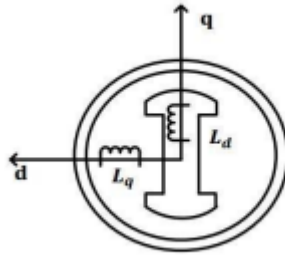


Fig 2.13 : Représentation de la GSAP dans le repère (d,q)de Park

Les deux bobines d et q, tournent avec le rotor, produisant le même effet que les trois bobines fixes. Les variations exprimées dans ce nouveau repère (d, q), nous permettent de passer de repère naturel au repère de Park, et d'avoir ainsi un modèle relativement simple de la machine

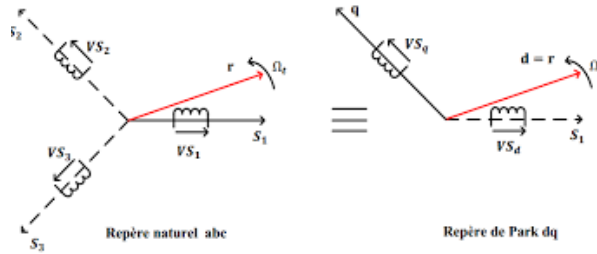


Fig 2.14 : Passage de Repère naturel du stator au repère (d,q) de Park

$$\begin{cases} V_d, V_q, V_0 \\ I_{ds}, I_{qs}, I_0 \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ I_0 \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.21})$$

Où $[(\theta)]$ est la matrice de PARK normalisée, elle est définée par :

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{II.22})$$

φ_f : Flux dû aux aimants ;

L_d : L'inductance sur l'axe 'd'.

L_q : L'inductance sur l'axe 'q'.

θ : représente la position du rotor est définie par : $\theta = \int \omega_r dt$ c ω_r : Vitesse électrique du rotor.

7.5.2 Mise en équations :

7.5.2.1 Equations des tensions :

La machine triphasée est équilibrée et symétrique avec neutre isolé alors la composante homopolaire est nulle. Les équations électriques sont les suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s I_d + L_d \frac{dI_{ds}}{dt} - L_q \omega I_{qs} \\ V_{qs} = R_s I_{qs} + L_q \frac{dI_{qs}}{dt} - L_d \omega I_{ds} + \omega \varphi_f \end{cases} \quad (\text{II.23})$$

En utilisant la convention du générateur, on inverse le sens des courants I_{ds} et I_{qs} dans les repères de Park, et le modèle du générateur synchrone à aimants permanents ainsi obtenu peut s'écrire sous la forme : **61**

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s I_{ds} - L_d \frac{d\varphi_d}{dt} + \omega I_{qs} \\ V_{qs} = -R_s I_{qs} - \frac{d\varphi_{qs}}{dt} - L_d \omega I_{qs} - \omega \varphi_d \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

v_{dq} : Les tensions statoriques dans le repère (d, q) ;

i_{dq} : Les courants statoriques dans le repère (d, q) ;

φ_{dq} : Les flux statoriques dans le repère (d, q) ;

φ_f : Flux induit par les aimants permanents.

L_d, L_q : Sont les inductances directes et en quadrature

7.5.2.2 Equations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_{ds} I_{ds} - \varphi_f \\ \varphi_q = L_q I_{qs} \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Si on remplace les équations des flux (II.25) dans le système on obtient le système (II.24) suivant:

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s I_{ds} - L_d \frac{dI_{ds}}{dt} + \omega L_q I_{qs} \\ V_{qs} = -R_s I_{qs} - L_q \frac{dI_{qs}}{dt} - \omega (L_d I_{ds} - \varphi_f) \end{cases} \quad (\text{II.26})$$

À partir de l'équation (II.26), on peut déduire le schéma équivalent du GSAP selon les deux axes d et q, figure 2.14 **62**

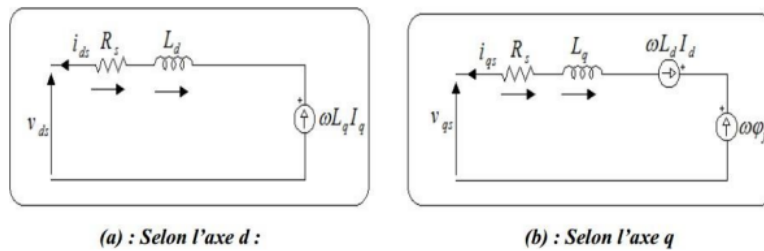


Fig 2.15 : Schémas équivalents du GSAP selon les deux axes d et q.

7.5.2.3 Expression de la puissance :

La puissance électrique de la machine dans le repère (abc) est exprimée par :

$$P(t) = V_a I_a + V_b I_b + V_c I_c \quad (\text{II.27})$$

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_{ds} I_{ds} + V_{qs} I_{qs}) \quad (\text{II.28})$$

En remplaçant V_{ds} , V_{qs} par leurs expressions, on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \frac{1}{2} [-R_s (I_{ds}^2 + I_{qs}^2) - (I_{ds} \frac{d\varphi_d}{dt} + I_{qs} \frac{d\varphi_q}{dt}) + \omega (\varphi_d I_{qs} - \varphi_q I_{ds})] \quad (\text{II.29})$$

Equation de couple :

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de la rotation du rotor **63**

$$\left\{ C_{em} = \frac{dw_e}{d\theta_{geo}} = P \frac{dw_e}{d\theta_e} \right. \quad (\text{II.30})$$

Et :

w_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

θ_{geo} : Ecart angulaire de la partie mobile (rotor par rapport au stator).

θ_e : Angle électrique.

P : Nombre de paires de pôles.

C_{em} : Couple électromagnétique.

Sachant que : $P_{em} = C_{em} \cdot \Omega$

$$P_{em} = \frac{3}{2} [(-\varphi q I_d)] \quad (\text{II.31})$$

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimé par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} [(-\varphi q I_d)] \quad (\text{II.32})$$

Après affectation des opérations nécessaire, on peut écrire :

$$C_{em} = \frac{3}{2} [(-L_d) I_d I_q + \varphi f I_q] \quad (\text{II.33})$$

7.5.2.4 Equation mécanique :

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_m - C_{em} - C_f \quad (\text{II.34})$$

Où :

$$C_f = f \Omega \quad (\text{II.35})$$

C_m : Couple moteur appliqué sur le générateur.

C_f : Couple de frottement.

J : Moment d'inertie total de la machine.

f : Coefficient de frottement visqueux.

8 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

8.1 Loi de BETZ :

Une éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Pour évaluer l'efficacité de cette conversion, il est essentiel de connaître la quantité d'énergie contenue dans le vent. On considère des particules d'air de masse " m " se déplaçant à une vitesse " V ", en supposant que cette vitesse est constante au moment où elles frappent le rotor.⁶⁴

On a alors :

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^3 \quad (II.36)$$

En supposant que la vitesse du vent au niveau du rotor est la moyenne arithmétique entre la vitesse du vent en amont de l'éolienne (V_1) et celle en aval (V_2), on peut écrire :

$$V = \frac{v_1 + v_2}{2} \quad (II.37)$$

La masse des particules est notée :

$$m = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L \quad (II.38)$$

Ainsi :

$$E_{cin} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L \cdot V^3 \quad (II.39)$$

D'après le théorème le système éolien à axe horizontal de Betz la puissance de vent est :

$$P_{vent} = \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot L \cdot V^3 \quad (II.40)$$

Avec : $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$: masse volumique de l'air, dans les conditions normales de température et de pression au niveau de la mer

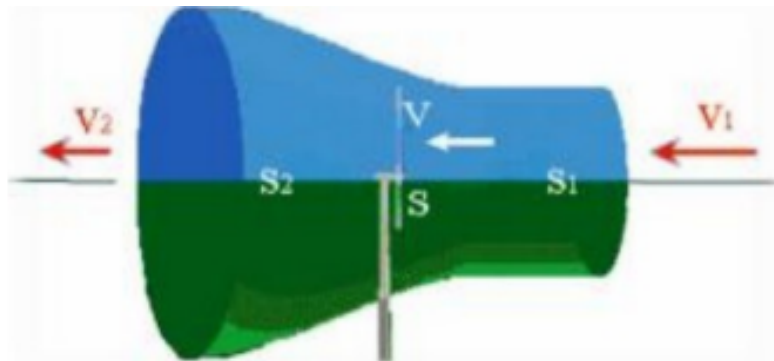


Fig 2.16 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne.

En examinant l'équation de la puissance du vent (II.40), il apparaît que la **vitesse du vent** est le facteur le plus déterminant. En effet, l'énergie disponible augmente considérablement avec une élévation de cette vitesse. De plus, comme la puissance est proportionnelle à la surface balayée par le rotor, doubler le diamètre de celui-ci permet de multiplier par quatre la puissance potentiellement captée. La **densité de l'air** joue également un rôle important dans la quantité d'énergie mécanique disponible. Un schéma ci-dessous illustre l'influence de ces différents paramètres.

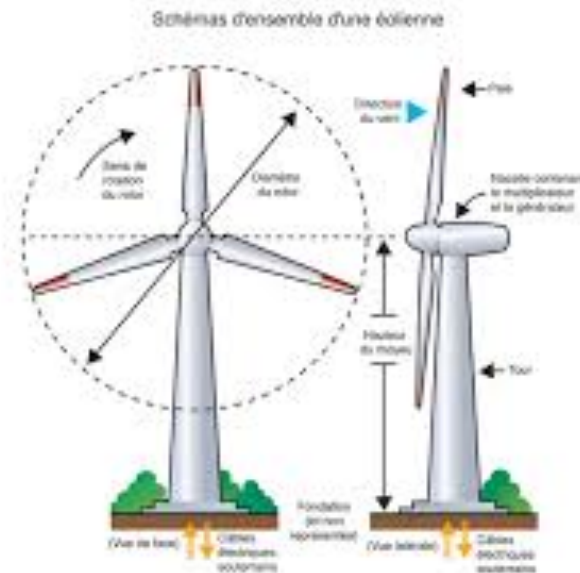


Fig 2.17 : Schéma d'une éolienne Adaptée de singh

8.2 Coefficient de puissance :

La puissance contenue dans le vent peut être convertie en énergie électrique utile de manière optimale, à condition que la conception des pales du rotor soit bien étudiée. En effet, l'efficacité de cette transformation dépend directement de la capacité des pales à capter l'énergie cinétique du vent. Toutefois, il est impossible de récupérer la totalité de cette énergie, car une partie du flux d'air doit continuer à circuler après avoir traversé le rotor. C'est pour cela qu'on introduit le coefficient de puissance **C_p**, qui permet de quantifier la part d'énergie réellement extraite dans le calcul de la puissance aérodynamique.

Ainsi, la puissance récupérée par la turbine peut s'identifier à la puissance cinétique du vent exprimée précédemment mais dotée d'un coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ propre à l'éolienne tel que :

$$P_{turbine} = (\lambda, \beta) \cdot P_{vent} \text{ (II.41)}$$

Dés alors on obtient :

$$P_{turbine} = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R^2 \cdot V^3 \text{ (II.42)}$$

Le coefficient de puissance adapté à la loi de Betz :

$$C_p = \frac{1}{2} \left(1 + \frac{v_2}{v_1} \right) \left(1 - \left(\frac{v_2}{v_1} \right)^2 \right) \text{ (II.43)}$$

L'équation théorique de C_p peut nous donner tout au plus le maximum théorique. en introduisant :

$$X = \frac{v_2}{v_1} \quad (\text{II.44})$$

roduit cette dernière dans: $C_p = \frac{1}{2} (1 + x) (1 - (x)^2) \quad (\text{II.45})$

En résolvant l'équation avec l'action du freinage minimale : $X = 1/3$

on obtient : $C_{pmax} = 0.593$

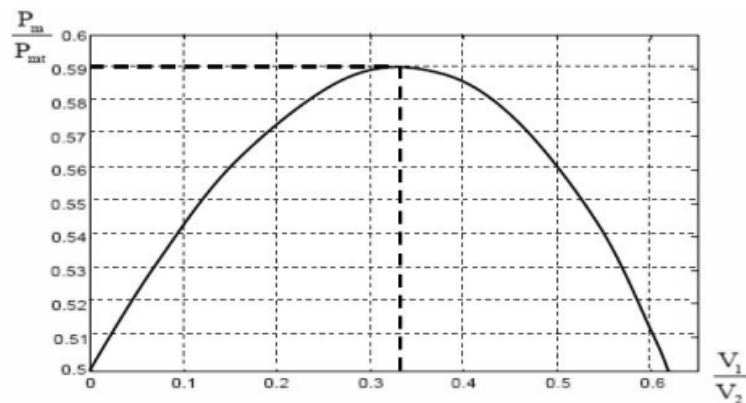


Fig 2.18 : Coefficient de puissance.

Cela indique que la puissance maximale qu'on peut exploiter est 59,3%. Par conséquent, le vent sera réduit à $1/3$ de sa vitesse originale. Mais en pratique, la valeur maximale du coefficient de puissance efficace sera généralement comprise entre 0,4 à 0,54. Ce coefficient varie avec le ratio de vitesse de rotation (λ) et l'angle d'orientation des pales (β)

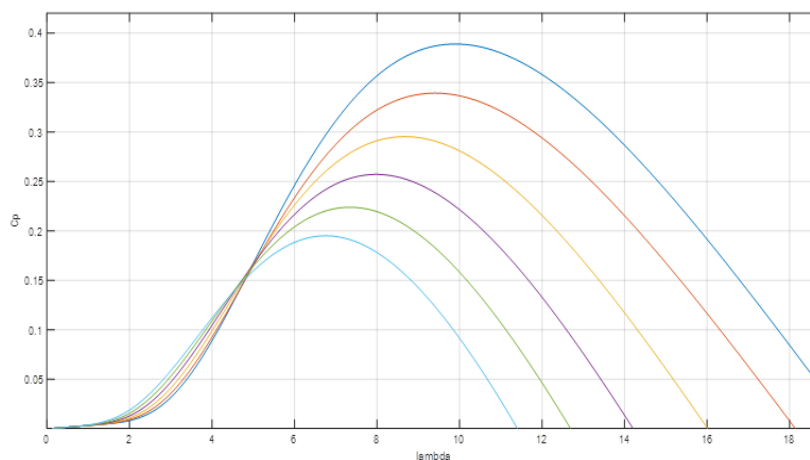


Fig 2.19 : Courbes du Coefficient de Puissance (C_p) en fonction du Rapport de Vitesse de Pointe (λ) pour une Éolienne

la performance aérodynamique d'une éolienne, illustrée par les courbes de son coefficient de puissance (C_p) en fonction du rapport de vitesse de pointe (λ). Chaque courbe représente généralement une condition d'angle de pas (pitch angle) différente, démontrant comment l'efficacité de conversion de l'énergie éolienne varie avec la vitesse du vent et la vitesse de rotation des pales. Le point culminant de chaque courbe indique le fonctionnement optimal pour un angle de pas donné.

8.3 La vitesse de rotation :

La ratio de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent :

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_{turbine}}{v} \quad (II.46)$$

$\Omega_{turbine}$: vitesse de la turbine.

$$T_m = \frac{V_{ref}}{V_p} \quad (II.47)$$

R : rayon de l'aérogénérateur.

Le couple aérodynamique directement déterminé par :

$$C_{aer} = \frac{P_{aer}}{\Omega_{turbine}} = C_p \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine}} \quad (II.48)$$

Le coefficient C_p caractérise le niveau de rendement d'une turbine éolienne.

$$C_p = \left[0.5 - 0.00167 \cdot (\beta - 2) \right] \cdot \sin \left(\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right) - 0.00184(\lambda - 3)(\beta - 2) \quad (II.49)$$

λ : Vitesse de rotation.

β : Angle de calage des pales (en degrés).

On peut définir comme étant le rapport :

$C_p = (\text{puissance disponible sur l'arbre}) / (\text{puissance disponible récupérable})$

9 Le multiplicateur de vitesse :

Le multiplicateur de vitesse est liaison entre la turbine et le générateur. Il a pour but d'adapter la vitesse de la turbine $\Omega_{turbine}$, assez lente à celle que nécessite la génératrice Ω_g .



Fig 2.20 : modèle mécanique du multiplicateur.

Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$C_g = \frac{C_{aer}}{G} \quad (II.50)$$

$$\Omega_{turbine} = \frac{\Omega_{mec}}{G} \quad (II.51)$$

10 Schéma bloc de la turbine :

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit des équations précédentes et est représenté sur la figure 2.19

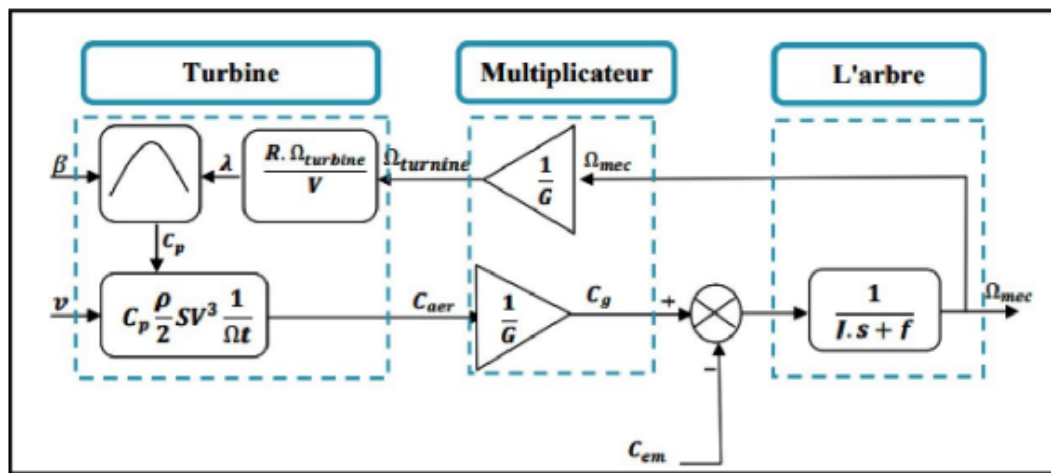


Fig 2.21 : Schéma bloc du modèle de la turbine.

Les principales variables d'entrée d'une turbine éolienne comprennent la vitesse du vent, l'angle de réglage des pales, ainsi que la vitesse de rotation de la turbine elle-même. Le multiplicateur joue un rôle clé en adaptant la vitesse mécanique et le couple aérodynamique afin d'assurer la vitesse requise pour le générateur ainsi que le couple transmis.

Le modèle de l'arbre mécanique, quant à lui, décrit la dynamique associée à la vitesse de rotation, qui dépend principalement de deux facteurs : le couple reçu du multiplicateur et le couple électromagnétique produit par la machine électrique.

Selon le schéma fonctionnel, la vitesse de rotation peut être contrôlée par deux paramètres de commande :

- L'angle d'orientation des pales, via le système de contrôle du pas (pitch control)
- Le couple électromagnétique de la génératrice.

Par ailleurs, la vitesse du vent est considérée comme une variable perturbatrice dans ce système de régulation.

11 Modélisation du redresseur :

Le redresseur triphasé à Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI) est un convertisseur statique AC-DC qui assure la transformation d'un courant alternatif en courant continu. Il est constitué de cellules de commutation, généralement composées de transistors ou de thyristors, montés en antiparallèle avec des diodes, comme illustré dans la figure (2.21).

La tension de sortie redressée V_{DC} dépend des états de commutation des interrupteurs. Dans le cadre de la modélisation, ces interrupteurs sont supposés idéaux, ce qui permet de simplifier l'analyse du comportement du redresseur.⁶⁵

Pour assurer la continuité en courant chaque interrupteur est branché en antiparallèle avec une diode de récupération.

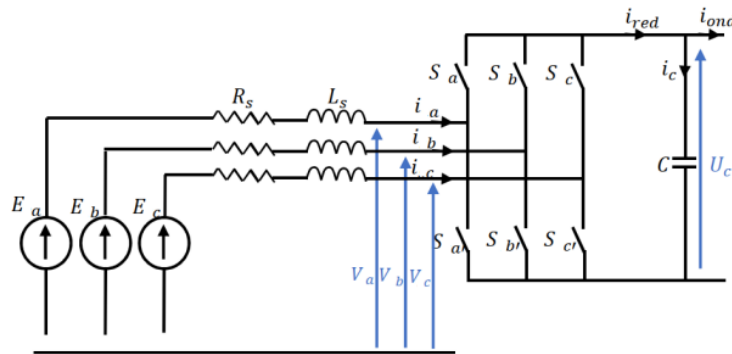


Fig. 2.22 : Schéma équivalent d'un redresseur à commande MLI.

La matrice de connexion du redresseur est donnée par l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.52})$$

$$i_{red} = S_a \cdot i_a + S_b \cdot i_b + S_c \cdot i_c \quad (\text{II.53})$$

Avec :

V_a, V_b, V_c : les tensions simples triphasées aux bornes du redresseur E_a, E_b, E_c : présente les tensions induites dans les phases du stator de la génératrice, V_{DC} : Tension redressée, i_{red} : Courant modulé par le redresseur, S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondant à l'état de l'interrupteur.

12 Modélisation de l'onduleur de tension :

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure (2.22), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être constituée de deux générateurs de f.é.m. égale à $E/2$ connectés entre eux par un point noté n_0 .66

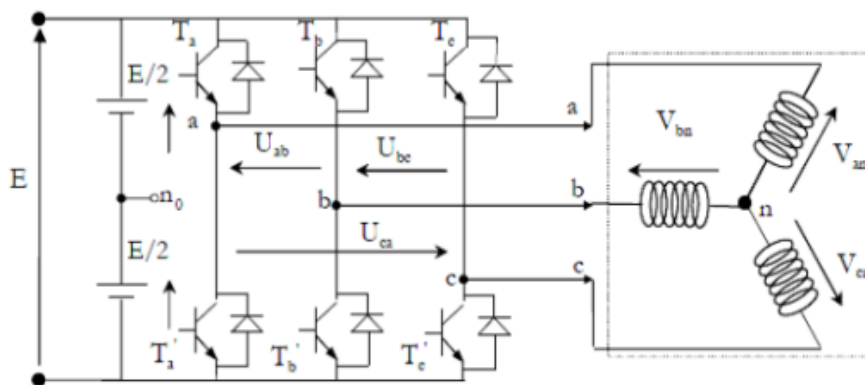


Fig 2.23 : Schéma d'un onduleur de tension triphasé.

Pour simplifier l'étude, on supposera que 67:

- La commutation des interrupteurs est instantanée.
- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable.
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé n .
- La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an} , V_{bn} et V_{cn} .
- L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques ($i=a, b, c$). On appelle T_i et T_i' les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux) ; on a

: • si $S_i = 1$, alors T_i est passant et T_i' est ouvert.

• si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T_i' est passant.

Les tensions composées (de lignes) délivrées par l'onduleur sont données comme suit :

$$U_{ab} = V_{an} - V_{bn} = (S_a - S_b) \quad (\text{II.54})$$

$$U_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = (S_b - S_c) \quad (\text{II.55})$$

$$U_{ca} = V_{cn} - V_{an} = (S_c - S_a) \quad (\text{II.56})$$

Les tensions V_{an}, V_{bn}, V_{cn} forment un système de tension triphasée équilibrée alors :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \text{ (II.57)}$$

De (II.55), (II.57) et (II.58), on a :

$$V_{an} = \frac{E}{3} (2S_a - S_b - S_c) \text{ (II.58)}$$

De (II.55), (II.56) et (II.58), on a :

$$V_{bn} = \frac{E}{3} (2S_b - S_a - S_c) \text{ (II.59)}$$

De (II.56), (II.58) et (II.59), on a :

$$V_{cn} = \frac{E}{3} (2S_c - S_a - S_b) \text{ (II.60)}$$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = E \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \text{ (II.61)}$$

12.1 Le type de commande de l' onduleur :

12.1.1 Principe de la commande MLI :

La Modulation de Largeur d'Impulsion (**MLI**) de type sinusoïdale-triangulaire (en anglais *Sinusoidal Pulse Width Modulation – SPWM*) repose sur la comparaison entre deux signaux :

- une onde modulante à basse fréquence (souvent une sinusoïde représentant la tension de référence),
- et une onde porteuse à haute fréquence, généralement de forme triangulaire.

Les instants de commutation des interrupteurs sont déterminés par les points d'intersection entre ces deux signaux. Le principe est le suivant :

- Lorsque le signal de référence est supérieur à la porteuse, la sortie est activée (état haut = 1),
- Lorsque le signal de référence est inférieur à la porteuse, la sortie est désactivée (état bas = 0).**68**

Ce procédé permet de générer une série d'impulsions dont la largeur varie en fonction du signal de référence, d'où une reconstitution efficace d'une forme d'onde sinusoïdale à la sortie après filtrage, figure (2.23).

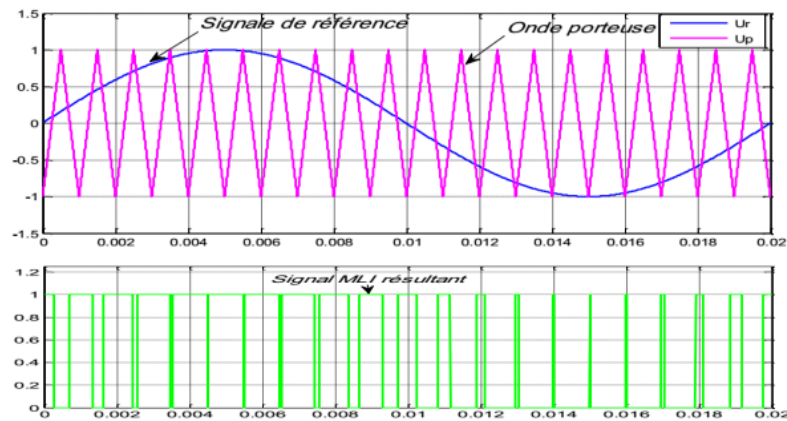


Fig. 2.24 : Principe de commande en MLI sinus-triangulaire.

Cette stratégie est caractérisée par deux paramètres :

- Indice de modulation « I_m » : Il est égal au rapport de la fréquence de la modulation (porteuse) sur la fréquence de référence.

$$I_m = \frac{f_p}{f_{ref}} \text{ (II.62)}$$

- Taux de modulation « T_m » : c'est un coefficient de réglage de la tension qui est égale au rapport de l'amplitude de la tension de référence à l'amplitude de la porteuse.

$$T_m = \frac{V_{ref}}{V_p} \text{ (II.63)}$$

Conclusion :

Ce chapitre a été consacré à l'étude approfondie de la technologie de l'énergie éolienne, une filière en pleine expansion dans le cadre de la transition énergétique mondiale. Nous avons examiné le principe de fonctionnement des éoliennes, leurs composants principaux ainsi que les différentes configurations technologiques existantes.

Il ressort de cette analyse que l'énergie éolienne repose sur une exploitation intelligente de l'énergie cinétique du vent, transformée en énergie électrique grâce à des dispositifs électromécaniques performants. Le rendement de cette conversion dépend fortement de la conception de l'éolienne, des conditions aérodynamiques et des stratégies de régulation mises en œuvre.

Par ailleurs, la diversité des technologies (éoliennes à axe horizontal ou vertical), ainsi que l'évolution constante des matériaux et des systèmes de contrôle, témoignent du haut niveau de maturité technique atteint par ce secteur. Toutefois, malgré ces avancées, l'énergie éolienne reste confrontée à certaines limites, notamment l'intermittence de la ressource et les contraintes d'intégration au réseau électrique.

Cette compréhension fine des aspects technologiques constitue une base essentielle pour aborder, dans le chapitre suivant, les défis liés à l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques modernes, en particulier en matière de stabilité, de régulation et de compatibilité avec les exigences du système électrique.

Chapitre 3

Simulation de la chaîne de production

- **Module d'entrée éolienne** : Il reçoit des paramètres comme la vitesse du vent ("Wind speed (m/s)"), l'angle de pas ("Pitch angle") et la vitesse du générateur ("Generator speed (pu)"), générant le couple mécanique appliqué à la machine ("Tm (pu)").
- **Machine Synchrone à Aimants Permanents** : Représentée par un bloc spécifique, cette machine est alimentée par des sources triphasées (A, B, C) et ses sorties incluent des grandeurs mécaniques et électriques.
- **Points de mesure et visualisation** : Divers signaux sont extraits et acheminés vers des oscilloscopes virtuels (scopes) pour analyse. Ces grandeurs comprennent la vitesse du rotor (ω_m en rad/s), le couple électromagnétique (Te en N.m), les courants statoriques (Isa, Isb, Isc en A), et les tensions statoriques (Vsa, Vsb, Vsc en V), ainsi que leurs composantes dans le repère d-q (Vsd, Vsq).

Ce modèle permet une analyse complète du comportement dynamique de la MSAP intégrée dans une chaîne de conversion d'énergie éolienne, offrant la possibilité d'étudier l'influence des conditions du vent et du contrôle de l'angle de pas sur la production d'énergie et les performances de la machine.

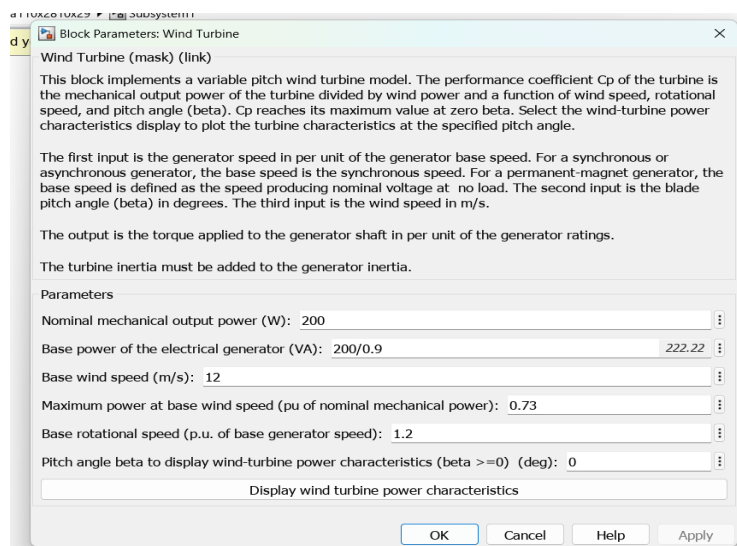


Fig 3.2 : Paramétrage de la turbine éolienne dans Simulink

La fenêtre de configuration des paramètres ("Block Parameters") du bloc "**Wind Turbine**" (**Éolienne**), tel qu'il apparaît dans l'environnement de modélisation Simulink (probablement de la bibliothèque Simscape Electrical).

Ce bloc implémente un modèle d'éolienne à pas variable, essentiel pour la simulation de systèmes de conversion d'énergie éolienne. La boîte de dialogue permet de spécifier des caractéristiques fondamentales du modèle, notamment :

- **Puissance mécanique nominale de sortie (Nominal mechanical output power)** : Définie à 200 W.
- **Puissance de base du générateur électrique (Base power of the electrical generator)** : Calculée à 222.22 VA (basée sur une puissance mécanique de 200 W et un facteur de puissance implicite de 0.9).
- **Vitesse de vent de base (Base wind speed)** : Fixée à 12 m/s.

- **Puissance maximale à la vitesse de vent de base (Maximum power at base wind speed) :** Spécifiée à 0.73 par unité (p.u.) de la puissance mécanique nominale.
- **Vitesse de rotation de base (Base rotational speed) :** Définie à 1.2 p.u. de la vitesse de base du générateur.

Ces paramètres sont cruciaux pour définir la courbe de puissance (C_p) de l'éolienne et son comportement aérodynamique en fonction de la vitesse du vent, de la vitesse de rotation de la turbine et de l'angle de pas des pales. Cette configuration permet une simulation précise des performances de l'éolienne dans diverses conditions de fonctionnement.

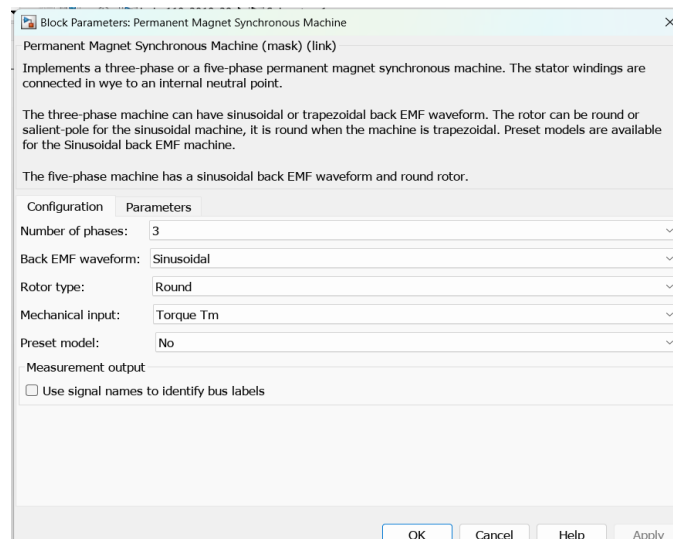


Fig 3.4 : Paramètres du bloc : Machine Synchrone à Aimants Permanents

Cette figure affiche la fenêtre de configuration des paramètres ("Block Parameters") du bloc **"Permanent Magnet Synchronous Machine" (Machine Synchrone à Aimants Permanents - MSAP)**, tel qu'il est utilisé dans l'environnement de modélisation Simulink.

Ce dialogue permet de définir les caractéristiques fondamentales d'une MSAP pour sa simulation. Les paramètres clés configurés ici incluent :

- **Nombre de phases (Number of phases) :** La machine est configurée comme triphasée (3 phases).
- **Forme d'onde de la force contre-électromotrice (Back EMF waveform) :** Spécifiée comme Sinusoïdale, ce qui est typique pour les machines à aimants permanents à flux sinusoïdal.
- **Type de rotor (Rotor type) :** Le rotor est défini comme lisse ("Round"), par opposition à un rotor à pôles saillants.
- **Entrée mécanique (Mechanical input) :** Le couple mécanique (T_m) est sélectionné comme entrée, indiquant que la machine est pilotée par un couple externe (par exemple, d'une turbine).

Cette interface est essentielle pour personnaliser le modèle de la MSAP en fonction des spécifications requises pour une étude ou une application donnée, permettant de simuler avec précision son comportement électromécanique et ses interactions au sein d'un système plus large.

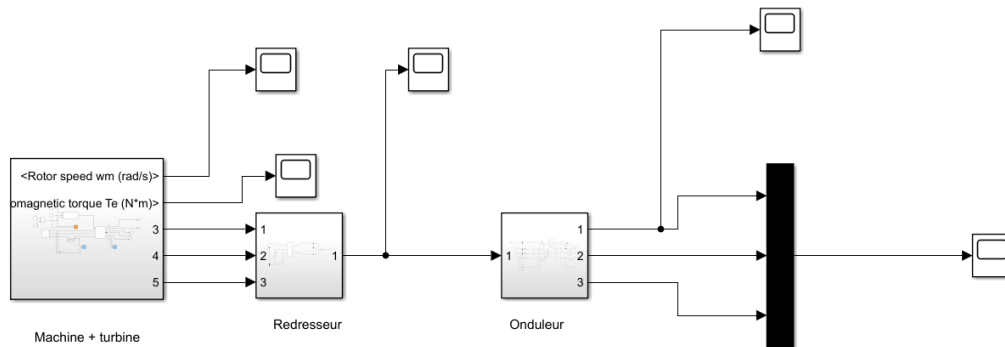


Fig 3.5 : Diagramme Simulink d'une chaîne de conversion d'énergie (Machine – Turbine - Redresseur - Onduleur)

Ce schéma-bloc Simulink présente une **chaîne de conversion d'énergie électrique**, architecture couramment utilisée dans les systèmes de production d'énergie renouvelable.

Le modèle est composé des éléments fonctionnels principaux suivants :

- **Bloc "Machine + turbine"** : Représente l'ensemble générateur mécanique et sa turbine motrice. Ce bloc produit des grandeurs clés telles que la vitesse du rotor (ω_m en rad/s) et le couple électromagnétique (T_e en N.m), ainsi que des signaux électriques (probablement en courant alternatif triphasé) qui servent d'entrées pour la suite de la chaîne.
- **Bloc "Redresseur"** : Ce convertisseur de puissance a pour fonction de transformer l'énergie électrique alternative issue de la machine en énergie continue.
- **Bloc "Onduleur"** : Placé en aval du redresseur, l'onduleur assure la conversion de l'énergie continue en énergie alternative, généralement pour l'injection dans un réseau électrique ou l'alimentation de charges.
- **Oscilloscopes (scopes)** : Disposés à divers points stratégiques du schéma, ces instruments virtuels permettent de visualiser et d'analyser en temps réel l'évolution des signaux électriques et mécaniques (vitesse, couple, tensions, courants) à travers les différentes étapes de la conversion d'énergie.

Ce type de modèle Simulink est essentiel pour simuler et étudier la dynamique, les performances et l'efficacité des systèmes de conversion d'énergie, en offrant une vue détaillée du flux d'énergie et du comportement de chaque convertisseur.

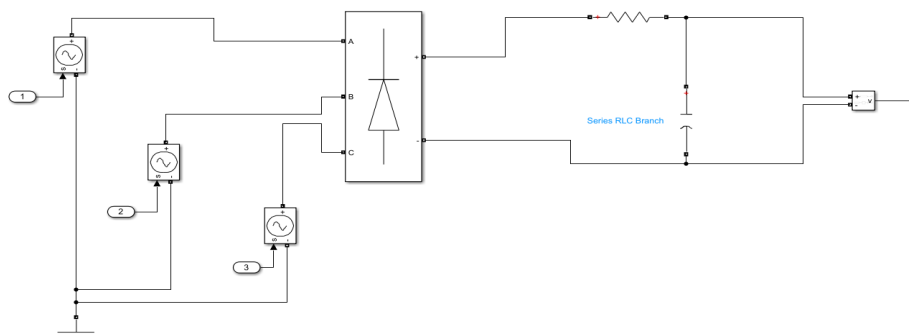


Fig 3.6 : Schéma blocs d'un redresseur triphasé sous MATLAB/Simulink

Le schéma-bloc Simulink du **circuit de redressement triphasé non commandé**, typique des applications d'alimentation en courant continu à partir d'une source alternative.

Le modèle se compose des éléments clés suivants :

- **Sources de tension triphasées** : Trois sources de tension alternative (identifiées par les étiquettes 1, 2, 3) fournissent l'alimentation triphasée au circuit.
- **Pont redresseur triphasé à diodes** : Ce bloc essentiel convertit la tension alternative triphasée en une tension continue pulsée. Ses entrées sont connectées aux phases A, B, C de la source.
- **Charge/Filtre RLC série (Series RLC Branch)** : La sortie du redresseur est connectée à une branche RLC série. Cette branche agit généralement comme un filtre pour lisser la tension continue pulsée issue du redresseur et/ou comme une charge connectée au système.
- **Mesure de tension** : Un bloc de mesure de tension (identifié par 'v') est placé en sortie de la branche RLC pour observer la tension continue redressée et filtrée.

Ce schéma illustre une configuration fondamentale en électronique de puissance pour la conversion AC-DC, permettant d'analyser le comportement de la tension de sortie continue en fonction des caractéristiques de la source alternative et de la charge RLC

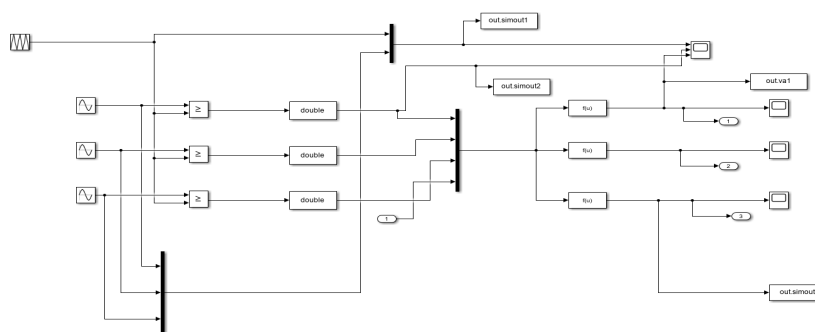


Fig 3.7 : Génération de signaux de commande PWM triphasés sous Simulink

Cette figure présente un schéma-bloc Simulink détaillant une **stratégie de génération de signaux de commande**, très probablement pour une application de **Modulation de Largeur d'Impulsion (MLI ou PWM)**, essentielle dans le contrôle des convertisseurs électroniques de puissance (onduleurs, hacheurs).

Le modèle est structuré comme suit :

- **Générateurs de signaux** : On observe un générateur d'onde triangulaire (ou en dent de scie) et trois générateurs de signaux sinusoïdaux.
- **Comparateurs** : Les trois comparateurs (opérateur \geq) sont utilisés pour comparer chaque onde sinusoïdale de référence avec l'onde triangulaire porteuse. Cette comparaison est le principe fondamental de la MLI, produisant des signaux d'impulsion dont la largeur est proportionnelle à l'amplitude du signal de référence.
- **Blocs de conversion et de multiplexage** : Des blocs de conversion de format ("double") et des multiplexeurs/démultiplexeurs sont utilisés pour organiser et acheminer les signaux.

- **Blocs de fonction utilisateur (fcn)** : Ces blocs indiquent des traitements mathématiques ou logiques supplémentaires appliqués aux signaux d'impulsion, typiquement pour générer des signaux de commande de portes pour des interrupteurs semi-conducteurs.
- **Points de visualisation** : Des oscilloscopes sont connectés à diverses sorties ("out.simout1", "out.val1", etc.) pour permettre la surveillance des signaux générés.

Ce schéma illustre une méthode courante pour obtenir des signaux de commutation modulés en largeur, indispensables pour le contrôle précis des tensions ou des courants dans les applications de puissance, telles que les entraînements de moteurs ou la connexion au réseau.

2. Résultats de la simulation :

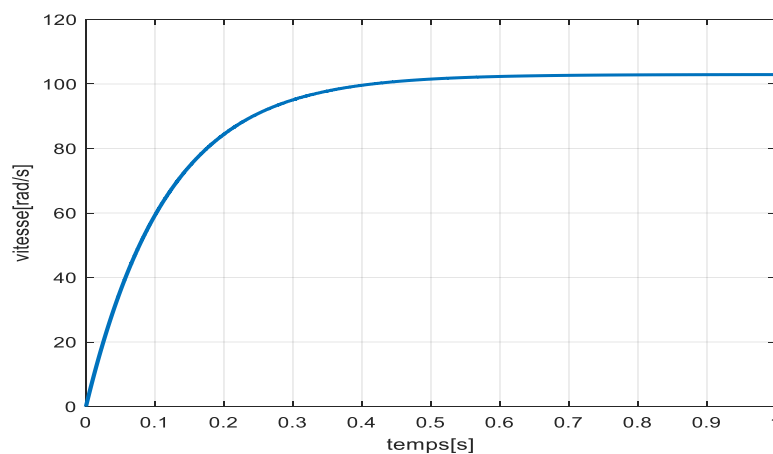


Fig 3.8 : Évolution de la vitesse de rotation en fonction du temps

Cette figure représente la **courbe de réponse temporelle de la vitesse**, mesurée en radians par seconde (rad/s), en fonction du temps, en secondes (s).

La courbe décrit une réponse dynamique typique d'un système (par exemple, un moteur ou un générateur), où la vitesse démarre de zéro, augmente de manière exponentielle, et se stabilise progressivement à une valeur de régime permanent d'environ 102 rad/s. Cette courbe est essentielle pour l'analyse des performances mécaniques et de la dynamique de démarrage ou de changement de régime d'une machine rotative.

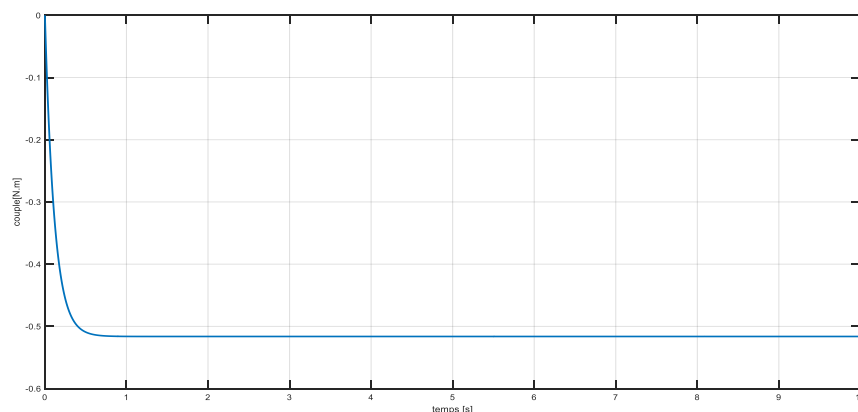


Fig 3.9 : Évolution du couple en fonction du temps

Cette figure présente la **courbe de réponse temporelle d'un couple**, mesuré en Newton-mètres (N.m), en fonction du temps, en secondes (s).

La courbe montre une réponse dynamique où le couple, partant d'une valeur proche de zéro, chute très rapidement vers une valeur négative (environ -0.25 N.m) avant de se stabiliser à cette valeur en régime permanent. Ce comportement est souvent observé lors de l'application d'une charge ou d'un freinage sur un système mécanique, ou bien il pourrait représenter un couple électromagnétique en régime établi d'une machine électrique, où un couple négatif indique une action de freinage ou un fonctionnement en générateur.

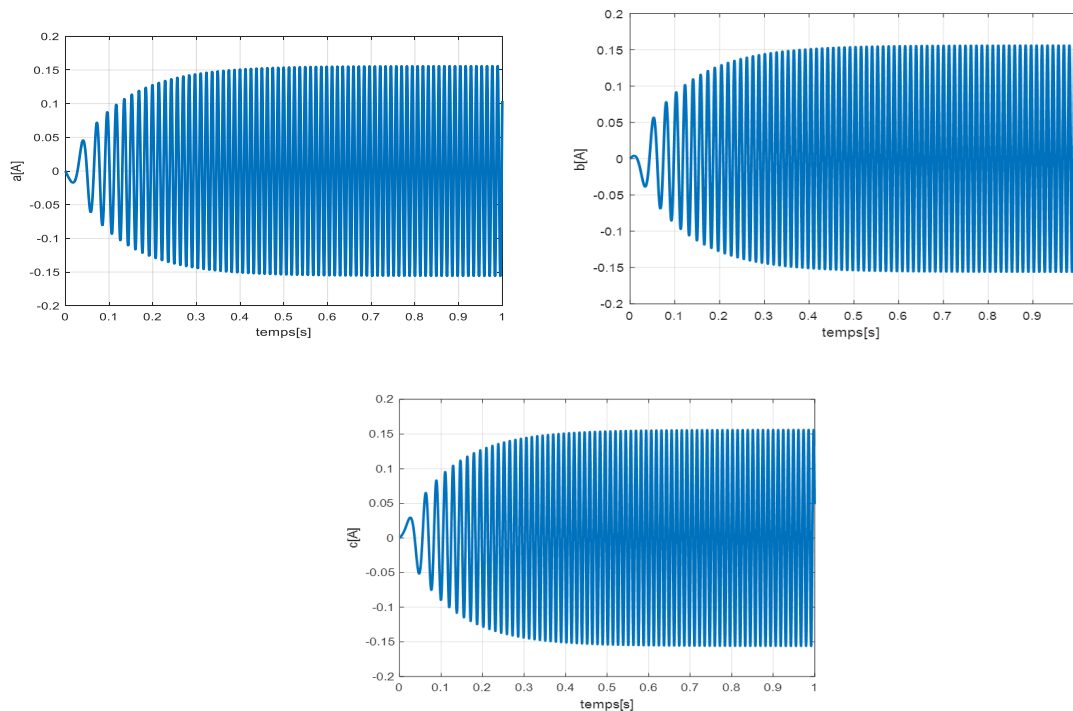


Fig 3.10 : Courant généré par les trois phases (A,B,C)

Ces figure représentent la **forme d'onde temporelle d'un courant**, mesuré en Ampères (A), en fonction du temps, en secondes (s).

La courbe montre un signal sinusoïdal. Initialement, on observe une phase transitoire (jusqu'à environ 0.25 s) où l'amplitude du courant s'établit progressivement depuis zéro. Ensuite, le signal atteint un régime permanent (à partir de 0.25 s) caractérisé par une oscillation sinusoïdale d'amplitude constante (environ ± 0.15 A). Ce type de forme d'onde est typique des courants de phase dans les machines électriques ou les convertisseurs de puissance en régime alternatif, reflétant la mise en service du système avant d'atteindre son fonctionnement stable.

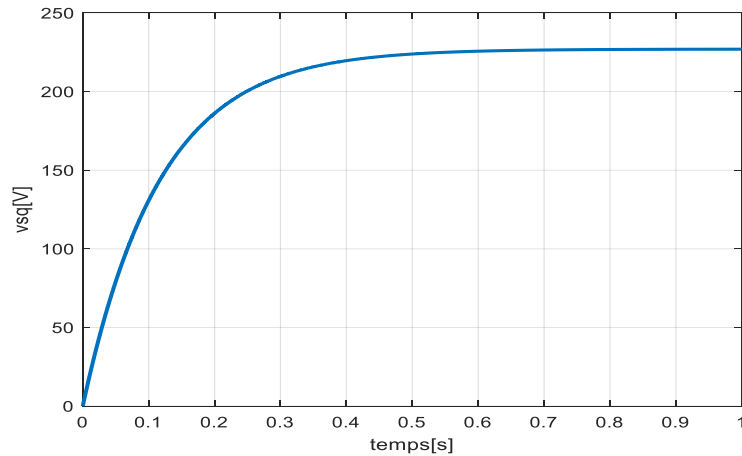


Fig 3.11 : Évolution de la tension (V_{sq}) en fonction du temps

Cette figure présente la **courbe de réponse temporelle de la tension " V_{sq} "**, mesurée en Volts (V), en fonction du temps, en secondes (s).

La courbe montre une réponse caractéristique d'un système, où la tension " V_{sq} " démarre de zéro et augmente rapidement de manière exponentielle avant de se stabiliser à une valeur de régime permanent d'environ 220 V. Ce comportement est typique de la mise sous tension ou de la réponse à un échelon d'un système électrique, potentiellement la tension redressée ou filtrée dans une application de conversion d'énergie.

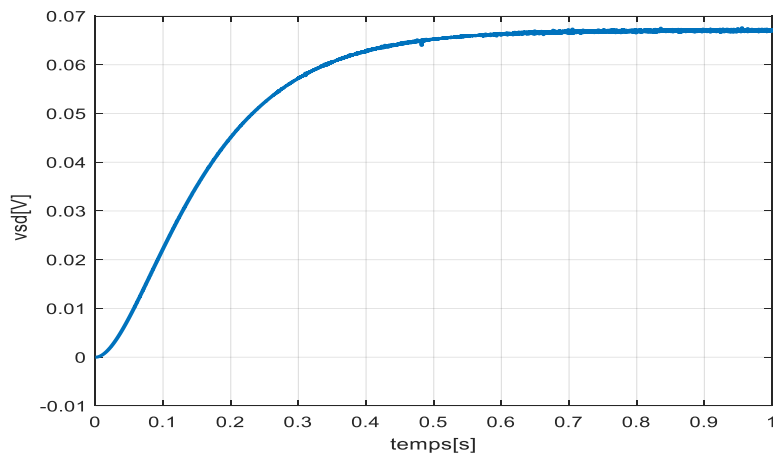


Fig 3.12 : Évolution de la tension (V_{sd}) en fonction du temps

Cette figure montre la **courbe de réponse temporelle de la tension " V_{sd} "**, mesurée en Volts (V), en fonction du temps, en secondes (s).

La courbe décrit une réponse typique d'un système du premier ou second ordre, où la tension " v_{sd} " démarre de zéro, augmente de manière exponentielle, puis se stabilise à une valeur de régime permanent d'environ 0.067 V. On observe également une légère ondulation ou du bruit en régime établi, ce qui est fréquent dans les systèmes réels ou simulés. Ce type de courbe est pertinent pour l'analyse de la dynamique de tensions équivalentes ou de grandeurs continues dans des circuits électriques.

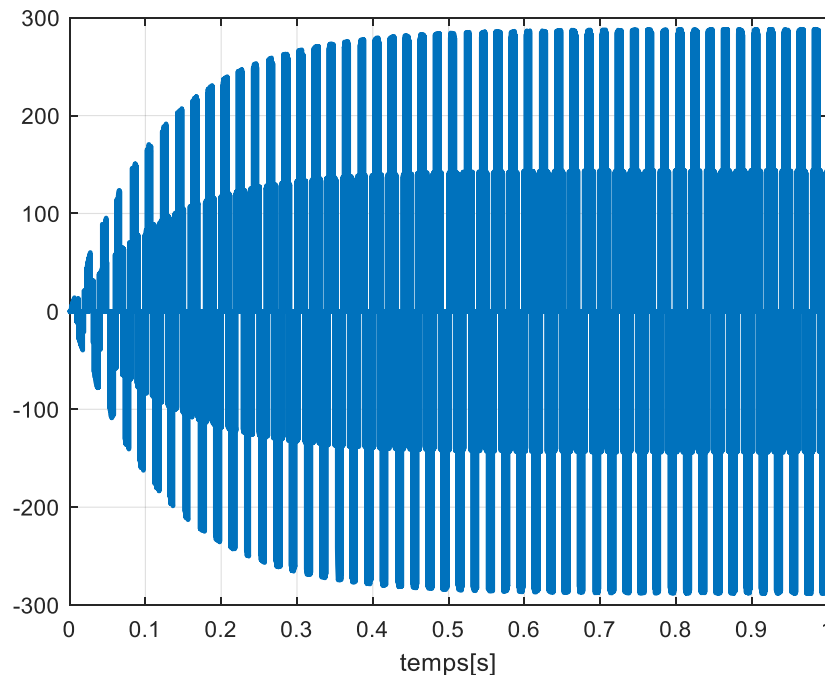


Fig 3.13 : Évolution de la tension alternative à la sortie de l'onduleur

Cette figure présente l'évolution de la tension alternative à la sortie de l'onduleur, où l'amplitude du signal augmente progressivement avant d'atteindre un régime établi.

La courbe représente un signal oscillant de haute fréquence. Initialement, de 0 à environ 0.25 secondes, on observe une phase transitoire où l'amplitude du signal s'accroît depuis zéro. Ensuite, le signal atteint un régime permanent, caractérisé par une oscillation sinusoïdale d'amplitude constante (environ ± 290 A). Cette évolution est caractéristique de la mise en régime transitoire d'un système électrique ou électronique produisant une sortie alternative, avant d'atteindre son fonctionnement en régime permanent.

Conclusion :

À travers ce chapitre, nous avons pu modéliser et simuler une chaîne complète de production d'énergie éolienne, en tenant compte des différentes étapes de conversion, depuis la captation de l'énergie mécanique du vent jusqu'à la génération d'électricité prête à être injectée dans le réseau. Cette simulation nous a permis d'observer le comportement dynamique du système, d'analyser son rendement, et d'identifier les facteurs influençant sa performance globale.

Les résultats obtenus ont mis en évidence l'importance d'un dimensionnement optimal des composants, ainsi que la nécessité d'un système de commande efficace pour assurer une production stable et conforme aux exigences du réseau. En outre, la simulation a montré l'intérêt d'intégrer des dispositifs de régulation permettant de maximiser l'énergie extraite du vent tout en garantissant la qualité de l'énergie produite.

Ainsi, cette étude confirme que la simulation constitue un outil indispensable pour la conception, l'analyse et l'amélioration des systèmes de production éoliens, tout en facilitant leur intégration dans un mix énergétique durable et intelligent.

Conclusion générale

La question de l'énergie constitue aujourd'hui un enjeu mondial majeur, obligeant les pays à trouver un équilibre entre la satisfaction de leurs besoins croissants en énergie et la préservation de l'environnement. La comparaison entre les énergies fossiles et les énergies renouvelables montre que la dépendance continue aux combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon) conduit à l'épuisement des ressources naturelles et à l'augmentation des émissions de gaz à effet de serre.

En revanche, les énergies renouvelables (solaire, éolienne, hydraulique, biomasse, géothermie) offrent des alternatives propres et durables, malgré certains défis techniques et environnementaux. Parmi elles, l'énergie éolienne se distingue comme une solution prometteuse pour produire de l'électricité sans émissions, même si elle reste soumise à des contraintes telles que l'intermittence du vent, les coûts d'installation et l'acceptation locale.

En Algérie, le potentiel éolien est considérable, notamment dans les régions du sud. Toutefois, ce secteur reste peu exploité. Pour réussir une transition énergétique ambitieuse, le pays devra renforcer ses infrastructures, mettre en place un cadre réglementaire adapté et encourager les investissements et les partenariats technologiques internationaux.

S'orienter vers les énergies renouvelables, et notamment l'éolien, n'est plus un simple choix, mais une nécessité pour bâtir un avenir durable, protéger l'environnement, assurer la sécurité énergétique et créer de nouvelles opportunités économiques.

Références bibliographiques :

1. IEA (2023) – *World Energy Outlook 2023*. International Energy Agency.
www.iea.org
2. REN21 (2023) – *Renewables 2023 Global Status Report*. Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
3. GWEC (2023) – *Global Wind Report 2023*. Global Wind Energy Council.
www.gwec.net
4. Blaabjerg, F., Yang, Y., Yang, D., & Wang, X. (2015) – “Distributed Power-Generation Systems and Protection”. *Proceedings of the IEEE*, 103(7), 1398–1409.
5. https://www.nationalgrid.com/stories/energy-explained/what-are-different-types-renewable-energy?utm_source=chatgpt.com
[/https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/?utm_source=chatgpt.com](https://www.eia.gov/energyexplained/renewable-sources/?utm_source=chatgpt.com)
6. Planète Énergies : <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/energies-fossiles>
7. https://www.un.org/en/climatechange/raising-ambition/renewable-energy?utm_source=chatgpt.com
8. Connaissance des énergies <https://www.connaissancedesenergies.org/fiche-pedagogique/energie-solaire#>
9. https://www.discoverthegreentech.com/en/renewable-energies/solar-power/photovoltaic/effect/?utm_source=chatgpt.com
10. <https://www.ademe.fr/particuliers-eco-citoyens/habitation/equipements-chauffage/electricite/chauffe-eau-solaire>
11. wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_hydraulique
12. edf <https://www.edf.fr/groupe-edf/comprendre/production/thermique/biomasse#>
13. Agence Internationale de l'Énergie (AIE) - Geothermal Energy
14. wikipedia https://fr.wikipedia.org/wiki/%C3%89nergie_%C3%A9olienne
15. POLYCOPIE-BENAMARA -L'Énergie Éolienne Sidi Bel Abbès 2019 page 2
16. POLYCOPIE-BENAMARA -L'Énergie Éolienne Sidi Bel Abbès 2019 page 3
17. climate.selectra <https://climate.selectra.com/fr/comprendre/eolienne-domestique>
18. Source : Parlons Planète – Qu'est-ce que l'énergie éolienne et ses avantages
<https://www.parlonsplanete.com/energies-vertes/eoliennes/qu-est-que-l-energie-eolienne-et-ses->
19. Source : Bretagne Durable – Les bénéfices de l'énergie éolienne pour un avenir écologique
<https://www.bretagne-durable.com/energie/les-benefices-de-lenergie-eolienne-pour-un-avenir->
20. Source : Renovables Vertes – Avantages de l'énergie éolienne
<https://fr.renovablesvertes.com/avantages-de-l%27%C3%A9nergie-%C3%A9olienne>
21. Source : EDF Collectivités – Énergie éolienne : 5 avantages pour les collectivités
<https://www.edf.fr/collectivites/le-mag/strategie-energetique-territoriale/energie-eolienne-5-avantages-pour-les-collectivites>
22. Villes en Transition – *Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne*
<https://villessentransition.net/avantages-et-inconvenients-de-lenergie-eolienne>
23. Le Monde de l'Énergie – *Quelles sont les limites de l'énergie éolienne ?*
<https://www.lemondedelenergie.com/quelles-sont-les-limites-de-lenergie-eolienne/2025/02/16>
24. Villes en Transition (même article que ci-dessus)
<https://villessentransition.net/avantages-et-inconvenients-de-lenergie-eolienne>

25. **Le Monde de l'Énergie (même article que ci-dessus)**
<https://www.lemondedelenergie.com/quelles-sont-les-limites-de-lenergie-eolienne/2025/02/16>
26. <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2022/03/Energie-eolienne.pdf> page 24
27. <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2022/03/Energie-eolienne.pdf> page 25
28. ESG News+2engineeringnet.be+2Connaissance des Énergies+2
29. AP News
30. ESG News+3engineeringnet.be+3Connaissance des Énergies+3
31. Connaissance des Énergies
32. Reuters+2engineeringnet.be+2AP News+2
33. https://www.france-renouvelables.fr/guide-energie-eolienne/energie-eolienne-integration-reseau-defis-logistiques/?utm_source=chatgpt.com
34. https://energies-media.com/etude-ifc-algerie-plus-grd-pot-eolien-terrestre-afrique?utm_source=chatgpt.com
35. https://lalgerieaujourd'hui.dz/nouvel-axe-de-developpement-des-energies-renouvelables-leolien-representera-23-en-2030/?utm_source=chatgpt.com
36. Wiki Éolienne
37. Algerie360+1Maghreb Emergent+1Algerie360+2Maghreb Emergent+2Batiactu+2
38. Algerie360+2AAPI+2APS+2
39. https://www.researchgate.net/publication/356778783_Les_Photovoltaiques_Une_Idee_Une_Realisation_Et_Un_Impact_Economique_En_Algerie?utm_source=chatgpt.com
40. <https://www.aps.dz/economie/180734-energies-renouvelables-appel-a-investir-dans-diverses-ressources-notamment-l-energie-eolienne>
41. [Michael Page Franceedf-solutions-solaires.com+2Futura+2Connaissance des Énergies+2Connaissance des Énergies](https://franceedf-solutions-solaires.com+2Futura+2Connaissance des Énergies+2Connaissance des Énergies)
42. International Renewable Energy Agency (IRENA) — Renewable Energy Technologies: Cost Analysis Series / International Energy Agency (IEA) — Renewables 2024 Report / Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE), Algeria — National Renewable Energy Program
43. Encyclopaedia Britannica – Wind Power
44. Global Wind Energy Council (GWEC). (2021). Offshore Wind Report. www.gwec.net
45. Global Wind Energy Council (GWEC). (2021). Offshore Wind Report. www.gwec.net
46. Sørensen, H. C., & Madsen, H. (2018). Offshore Wind Energy: A Review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 94, 177-187.
47. AIT MIMOUN Abdelkarim, MELOUK Moustafa, BENFISSA Amine
 »MODÉLISATION ET SIMULATION D'UN SYSTÈME ÉOLIEN »CENTRE UNIVERSITAIRE SALHI AHMED– NAAMA ,2021 INSA, 2015.
48. KIDAR, Mr Ali. Contribution to the optimal study of PV systems in steppe zones using meta-heuristic methods. Diss. University of Laghouat, 2024.
49. berkani Mohamed pdf_merged.pdf page 15
50. berkani Mohamed pdf_merged.pdf page 16
51. ARARIA, Khaled, and Adda BOUCIF. Étude et simulation de l'intégration d'une ferme éolienne offshore au réseau électrique via une ligne HVDC ». Diss. Université Ibn Khaldoun-Tiaret-, 2020.
52. Djedouani, Safa, Hafsia Aouimeur, and Toufik Encadre par Thelaidjia. COMMANDE PAR MODE GLISSANT FLOU D'UN SYSTEME DE.

53. Etude et commande d'un système de conversion éolienne Présenté par : Nouri Raid et Touati Ali Encadrant : Lakhdara Amira page 19
54. Energie Plus Le Site
55. MAHGOUN Mohamed Seddik Commande non conventionnelle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dédiée à la conversion éolienne 2022 page 27
56. MAHGOUN Mohamed Seddik Commande non conventionnelle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dédiée à la conversion éolienne 2022 page 27 28
57. MAHGOUN Mohamed Seddik Commande non conventionnelle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dédiée à la conversion éolienne 2022 page 28
58. Kermagoret, Charlene, Harold Levrel, and Antoine Carlier, « La compensation au service de l'acceptabilité sociale: un état de l'art des apports empiriques et du débat scientifique: réflexions au service du développement de l'énergie éolienne en mer." Vertigo: la revue électronique en sciences de l'environnement 15.3 , 2015.
59. BADR, BENYACHOU. Contrôle et optimisation d'un système de conversion de l'énergie éolienne pour la production et l'injection de l'énergie électrique dans un réseau d'alimentation. 2020
60. Mahgoun, Mohamed-Seddik. Commande non conventionnelle de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) dédiée à la conversion éolienne. Diss. 2022
61. Grenier, David, « Modernisation des données de réanalyse pour WEST et impact sur le potentiel éolien analysé: implantation des réanalyses ERA5 », Diss. École de technologie supérieure, 2021.
62. <https://electronique1.blogspot.com/2011/02/eoliennes-axe-horizontal.html>
63. Abdelmadjid, M. Rais. « Modélisation et commande d'un aérogénérateur éolien en vue de l'amélioration de son rendement et de la diminution de la fatigue
64. berkani Mohamed pdf_merged.pdf page 29
65. Thèse_Mahgoun.pdf page 84
66. A. Ferroudj "Commande Non Linéaire De La MSAP Sans Capteur De Vitesse. Apporte Des Méthode De l'Intelligence Artificielle " Mémoire De Magister, Université De Batna, 2011.
67. F. Labrique, G. Segulier Et R. Baisiere "Les Convertisseurs De L'électronique De Puissance Volume 4 : La Conversion Continu-Alternatif " Lavoisier, 1995.
68. S. AZZOUZ ; « amélioration de la commande d'un système éolien a base d'une machine MADA utilisant les techniques intelligentes » ; Thèse de Doctorat, Université M'sila, 2019.
69. Chapitre 6 - Énergie Éolienne d'un cours universitaire dispensé à l'Université de Batna 2
70. Marouf, A. (2012). Université Mohamed Boudiaf - Msila
71. Agence Internationale de l'Énergie (AIE), Ministère de la Transition Énergétique d'Algérie, ONU Énergie, rapports REN21, études de la Banque Mondiale sur les énergies renouvelables en Afrique du Nord.