

UNIVERSITE KASDI MERBAH - OUARGLA
FACULTÉ DES HYDROCARBURES, DES ÉNERGIES RENOUVELABLES
ET DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS



Département d'Energies Renouvelables

Mémoire de MASTER Académique

Domaine: Sciences et technologies

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energies Renouvelables en mécanique

Présenté par:

Hadj Yazid BENABDELHAFID

Moufdi ZIOUECHE

Thème:

MODELISATION ET SIMULATION PAR DEUX
MÉTHODES D UNE CENTRALE ÉOLIENNE
CONNECTÉE AU RÉSEAU SITUÉE AU SUD
D'ALGERIE

Soutenu le : 11 - 06- 2023

Mr. Houcine Maameur	Président	UKM Ouargla
Mr. Chouaib AMMARI	Encadreur	UKM Ouargla
Mme Abada Zhour .	Examineur	UKM Ouargla

Année universitaire : 2022 - 2023

Remerciements

Avant tout, nous remercions ALLAH, le tout puissant, de nous avoir donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos sincères remerciements à notre encadreur Mr Chouaib Ammari qui nous a orienté et soutenu et qui par sa collaboration effective et par ses judicieux conseils a rendu possible l'élaboration de ce travail.

Que les membres du jury trouvent ici l'expression de notre gratitude et de notre respect pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce modeste travail.

Nos remerciements les plus distingués vont également à tous ceux et toute celles qui nous ont apporté leurs aides de près ou de loin.

Notre reconnaissance va également à tous les professeurs du Département des énergies renouvelables qui nous ont accompagnés tout au long de notre parcours d'études.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

*A toute ma famille, en particulier **mes parents** ;*

Et tous ceux qui ont contribué à mon mon parcours universitaire

Résumé

Cette étude est concentré sur le conception et la simulation d'une centrale éolienne connectée au réseau dans une zone désertique au sud de l'Algérie.

Le processus Etude est concentré sur la simulation avec deux programmes différents (Matlab et Greenius) et comparerons les résultats obtenue pour trouver la meilleure proposition. Enfin, nous étudierons l'efficacité de ce système dans cette région en termes énergétique et économiques

Mots clés : Système éolienne connectée au réseau, Modelisation, Simulation, Matlab, Greenius

Summary

This study focuses on the modeling and simulation of a grid-connected wind power plant in a desert area in southern Algeria.

The study process focuses on simulation with two different programs (Matlab and (Greenius) and will compare the obtained results to find the best proposal.

Finally, we will examine the efficiency of this system in this region in terms of energy and economy.

Keywords: Grid-connected wind system, Modeling, Simulation, Matlab, Greenius

المخلص

تركز هذه الدراسة على نمذجة ومحاكاة محطة طاقة الرياح المتصلة بالشبكة في منطقة صحراوية جنوب الجزائر. تركز عملية الدراسة على المحاكاة مع برنامجين مختلفين (Matlab) و (Greenius) وستقارن النتائج التي تم الحصول عليها للعثور على أفضل اقتراح. أخيرًا ، سوف ندرس كفاءة هذا النظام في هذه المنطقة من حيث الطاقة والاقتصاد.

الكلمات المفتاحية: أنظمة طاقة الرياح المتصلة بالشبكة, نمذجة أنظمة طاقة الرياح, محاكاة محطة طاقة الرياح.

Sommaire

I. Introduction générale	Page 01.
<i>Chapitre I : Etat de l'art sur les énergies renouvelable</i>	
I.1. Introduction	Page 03.
I.2. Définition.....	Page 03.
I.2.1. Energies renouvelables	Page 03.
I.2.2. Energie éolienne.....	Page04.
I.3. Situation de l'énergie renouvelable.....	Page04.
I.3.1. Dans le monde.....	Page04.
I.3.2. Dans l'Algérie.....	Page 05.
I.4. Situation de l'énergie éolien.....	Page06.
I.4.1. Dans le monde.....	Page06.
I.4.2. Dans l'Algérie.....	Page07.
I.5. Situation scientifique des énergies renouvelables	Page07.
I.6. Situation scientifique de l'énergies éolienne	Page08.
I.7. Défèrent types des éoliennes	Page09.
I.8. Comparaison entre éolien horizontal et vertical.....	Page11.
I.9. Etude comparait entre onshore et offshore	Page13.
I.10. Eléments constitutifs d'une éolienne	Page14.
I.11. Classification	Page17.
I.12. Principe de fonctionnement d'une éolienne	Page18.
I.13. Les déférent types de système éolien	Page19.
I.13.1. Système hybride (par exemple éolienne - solaire).....	Page20.
I.13.2. Système éolien autonome.....	Page20.
I.13.3. Systèmes d'éoliennes connectés au réseau.....	Page21.
I.14. Conception de systèmes éoliennes connecte au réseau	Page22.
I.14.1. Éoliennes à vitesse fixe.....	Page23.
I.14.2. Éoliennes à vitesse variable.....	Page25.
I.15. Avantages et inconvénients	Page27.
I.16. Définition de la zone d'étudiée	Page28.

I.17. Conclusion	Page30.
Chapitre II : Modélisation De Système Eolien	
II.1. Introduction	Page32.
II.2. Modélisation des systèmeéolien.....	Page32.
II.2.1. Modélisation mathématique de systèmes éoliens	Page33.
II.2.1.1. Modélisation de l'éolienne	Page33.
II.2.1.2. Modélisation de la generatrice.....	Page35.
II.2.1.3. Modélisation du redresseur.....	Page37.
II.2.1.4. Modélisation de l'onduleur	Page37.
II.2.1.5. Modélisation de réseaux électriques.....	Page37.
II.3. Exigences de raccordement au réseau	Page38.
II.5. Conclusion.....	Page39.
Chapitre III : Simulation de système éolienne	
III.1.Introduction.....	Page41.
III.2. Les méthodes de simulation de système éolienne.....	Page41.
III.2.1. Modèles analytiques	Page41.
III.2.2. Modèles empiriques.....	Page42.
III.2.3. Modèles numériques.....	Page43.
III.2.4. Modèles hybrides	Page43.
III.2.5. Simulation matérielle dans la boucle (HIL)	Page44.
III.3. Définition de MATLAB	Page45.
III.4. Définition de Greenius.....	Page46.
III.6. Description de systèmes éolien.....	Page47.
III.7. Résultats de simulation	Page48.
III.7.1 Simulation par Greenius.....	Page48.
III.7.2. Simulation par Matlab.....	Page50.
III.7.3. Coût d'investissement	Page50.
III.7.4. Revenus d'investissement	Page51.
III.8. Conclusion	Page52.
Conclusion générale.....	Page 54.
Annexe	
Références bibliographiques	

Liste Des Figures

Figure1.1 La croissance du parc électrique renouvelable dans le monde	Page04.
Figure1.2 programme de developpement des energies renouvelables	Page05.
Figure1.3 Capacitééolienne cumulée dans le monde	Page06.
Figure1.4 Carte de vent en Algérie	Page07.
Figure1.5 Réseau des recherches aux énergies renouvelables et leurs types	Page08.
Figure1.6 Réseau des recherches aux énergies renouvelables et leurs types	Page09.
Figure1.7 Eolienne verticale darrieus & Eolienne Horizontal	Page10.
Figure1.8 Ferme éolienne offshore de Kentish Flats, au large des côtes britanniques du Kent....	Page10.
Figure1.9 Eléments constitutifs d'une éolienne	Page17.
Figure1.10 Le fonctionnement de l'énergie éolienne	Page19.
Figure1.11 Schéma de Système hybride (éolienne - solaire)	Page23.
Figure1.12 Méthodologie d'évaluation de la production d'éoliennes et de la compatibilité du système électrique.....	Page26.
Figure1.13 Structure générale d'un WECS à vitesse fixe	Page26.
Figure1.14 Structure générale d'un SCEO limité à vitesse variable	Page27.
Figure1.15 Structure générale d'un WECS à vitesse variable amélioré	Page28.
Figure1.16 Structure générale d'un WECS complet à vitesse variable	Page29.
Figure 1.17 Localisation de Tamacine	Page29.
Figure1.18 Graphique de la vitesse de l'air à 36 mètres	Page29.
Figure2.1 Schéma d'un système éolien sans multiplicateur	Page34.
Figure2.2 Redresseur à six diode	Page37.
Figure 3.1 Description de systèmes éolien.....	Page47.
Figure3.2 Courbe de puissance de ENERCON E30 200 kw	Page48.
Figure3.3 Puissance de sortie horaire pendant une année	Page49.
Figure 3.4 Interface des résultats techniques de simulation.....	Page50.
Figure3.5 Puissance de sortie horaire – MATLAB.....	Page50.

Liste Des Tableaux

Tableau 1.1 Différences entre éolienne a axe horizontal et vertical.....	Page10.
Tableau1.2 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.....	Page18.
Tableau1.3 Etude comparative des générateur éoliennes.....	Page26.
Tableau2.1 Les déffirents types des modeles	Page30.
Tableau 3.1 Données Générales de l'colienne Enercon E-30	Page48.
Tableau3.2 Paramètres économiques de système éolien	Page51.
Tableau 3.3 Journal officiel national n° 23 publié le 23 avril 2014	Page51.

Introduction générale

Introduction générale

L'énergie éolienne est l'une des sources d'énergie alternative les plus importantes pour la production d'électricité dans le monde, et elle joue un rôle essentiel dans les enjeux environnementaux et économiques. Les régions désertiques sont idéales pour exploiter l'énergie éolienne en raison des conditions climatiques et géographiques qui favorisent la présence de vents forts et constants.

Les vents dans ces régions sont stables et réguliers, ce qui en fait une excellente source d'électricité. Les éoliennes, également connues sous le nom de générateurs éoliens, sont utilisées pour convertir le mouvement du vent en énergie électrique à l'aide des pales fixées sur un rotor. Ce processus se produit lorsque le générateur tourne sous l'effet du vent, produisant ainsi un courant électrique pouvant être utilisé pour alimenter des équipements électriques et répondre aux besoins des populations locales.

L'objectif de cette étude est de tester l'énergie éolienne dans les zones au sud d'Algérie. En termes d'énergie, d'investissement et de rendement financier. Ce qui nous fournira des résultats sur lesquels nous pourrions compter pour établir ou non une centrale éolienne dans ces zones. En conclusion, l'énergie éolienne dans les régions désertiques possède un potentiel énorme pour répondre aux besoins croissants en électricité et réduire la dépendance aux sources d'énergie traditionnelles. La résilience et la durabilité du vent soutiennent les investissements dans l'énergie éolienne dans les régions désertiques, renforçant ainsi la durabilité environnementale et économique de ces zones.

Dans le premier chapitre. Nous définirons quelques généralités sur les énergies renouvelables en général et l'énergie éolienne en particulier. En plus de quelques statistiques en Algérie et dans le monde.

Dans le deuxième chapitre. nous tenterons de comprendre le fonctionnement du système éolien à travers le processus de modélisation, en prélude à la simulation..

Quant au troisième chapitre, nous réaliserons un processus de simulation à l'aide des programmes MATLAB et GREENIUS. Une centrale éolienne dans une zone désertique en Algérie

Chapitre I

Etat de l'art sur l'énergie éolienne

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la force du vent pour produire de l'électricité. Au fil des années, cette technologie a connu de nombreuses avancées et est devenue l'une des sources d'énergie renouvelable les plus importantes et les plus largement utilisées dans le monde. Les éoliennes modernes sont de plus en plus grandes et puissantes, avec des pales atteignant jusqu'à 100 mètres de longueur. Les parcs éoliens offshore se développent rapidement, offrant des avantages tels qu'un vent plus constant et un potentiel de production plus élevé. Les chercheurs travaillent sur le développement de nouveaux matériaux pour les pales, tels que les composites à base de fibre de carbone, afin d'améliorer leur efficacité et leur durabilité. La variabilité de la production éolienne constitue un défi, mais des systèmes de stockage de l'énergie, tels que les batteries, sont de plus en plus utilisés pour compenser cette fluctuation. Les avancées dans la prévision de la production éolienne et dans l'intégration de l'énergie éolienne dans les réseaux électriques ont également contribué à son adoption croissante. De plus, l'éolien flottant émerge comme une technologie prometteuse pour l'installation d'éoliennes en eau profonde. Enfin, les systèmes hybrides combinant l'énergie éolienne avec d'autres sources renouvelables gagnent en popularité, offrant une alimentation plus fiable et stable. Avec ces avancées continues, l'énergie éolienne joue un rôle de plus en plus important dans la transition vers une production d'électricité plus propre et durable. [1]

Dans ce chapitre, nous parlerons des généralités des énergies propres, notamment l'énergie éolienne. Et l'étendue de sa propagation dans le monde Algérie. Outre le développement de la recherche dans ce domaine.

I.2. Définition

I.2.1 Energies renouvelables

Les énergies renouvelables sont des sources d'énergie produites à partir de ressources naturelles qui se régénèrent constamment et ne s'épuisent pas à l'échelle humaine. Les sources d'énergie renouvelables les plus courantes sont l'énergie solaire, l'énergie éolienne, l'énergie hydraulique, l'énergie géothermique et l'énergie de la biomasse. L'utilisation de ces sources d'énergie présente de nombreux avantages, notamment leur faible impact environnemental, leur disponibilité à long terme et leur coût de production de plus en plus abordable. Contrairement aux combustibles fossiles et à l'énergie nucléaire, les énergies renouvelables ne produisent généralement pas de gaz à effet de serre, de polluants atmosphériques ou de déchets radioactifs, ce qui peut contribuer à réduire les émissions de gaz à effet de serre et à améliorer la qualité de

l'air. Les énergies renouvelables sont de plus en plus utilisées dans le monde entier comme alternative plus propre et durable aux sources d'énergie non renouvelables. [1]

I.2.2. Energie éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui utilise la force du vent pour produire l'électricité. Les éoliennes, équipées de pales qui tournent sous l'effet du vent, entraînent un rotor qui à son tour actionne une génératrice pour produire de l'électricité. Cette électricité peut être utilisée directement ou stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure. L'énergie éolienne est considérée comme une forme d'énergie propre car elle ne produit pas de gaz à effet de serre ni de pollution atmosphérique. Elle est également abondante et largement distribuée dans le monde entier. Cependant, les installations éoliennes peuvent avoir des impacts sur l'environnement et les écosystèmes locaux, tels que la destruction de habitats d'oiseaux et de chauves-souris. De plus, la production d'énergie éolienne peut être intermittente en raison de la variabilité du vent.

I.3. Situation de l'énergie renouvelable

I.3.1. Dans le monde

L'utilisation des énergies renouvelables dans le monde a connu une croissance significative ces dernières années, reflétant une prise de conscience croissante de la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre et de limiter le changement climatique. Les avantages des énergies renouvelables sont nombreux : elles sont disponibles à long terme, ne produisent généralement pas de gaz à effet de serre ni de polluants atmosphériques, et leur coût de production est de plus en plus abordable (Figure 1.1). [2]

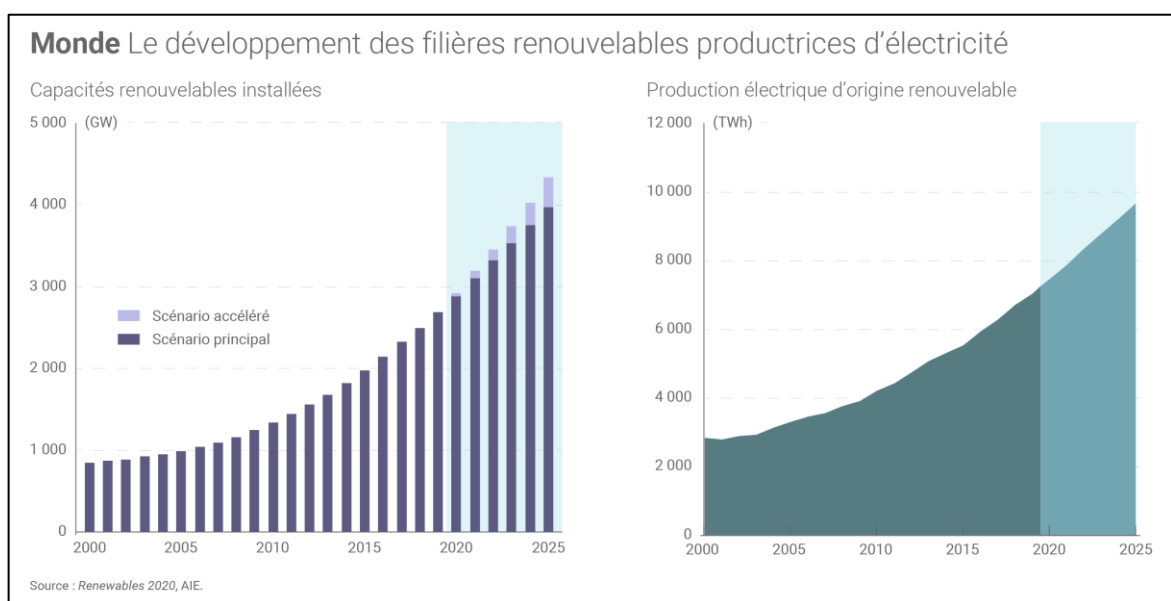


Figure 1.1 La croissance du parc électrique renouvelable dans le monde.

La Chine est le leader incontesté de l'énergie renouvelable, avec une part de marché de plus de 40% en 2020. Elle est suivie de près par les États-Unis, l'Inde, le Japon et l'Allemagne. Ces pays ont investi massivement dans l'installation de nouvelles capacités d'énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire et l'énergie éolienne.[3]

En conclusion, bien que les énergies renouvelables soient encore loin de remplacer complètement les combustibles fossiles, leur croissance rapide est encourageante. Les investissements dans les énergies renouvelables doivent être encouragés pour accélérer la transition énergétique vers un avenir plus propre et plus durable.

I.3.2. Dans l'Algérie

L'Algérie est un pays riche en ressources énergétiques, notamment en hydrocarbures, mais elle cherche également à développer son potentiel en matière d'énergies renouvelables.

Selon le rapport de l'Agence Internationale de l'Energie (AIE) publié en 2021, la part des énergies renouvelables dans la production d'électricité en Algérie est encore faible, représentant seulement 1,5% en 2019. Cependant, le gouvernement algérien s'est fixé des objectifs ambitieux pour développer les énergies renouvelables dans le pays, notamment en visant une capacité de production de 22 GW d'énergie renouvelable d'ici 2030. [4]

Parmi les sources d'énergie renouvelable, l'Algérie dispose d'un fort potentiel en énergie solaire et éolienne, notamment dans les régions du sud du pays. En 2019, l'Algérie a inauguré son premier parc éolien de 10 MW dans la région de Kabertene, et plusieurs autres projets sont en cours de développement.[5]

L'Algérie a également adopté une loi sur les énergies renouvelables en 2015, qui prévoit des incitations financières pour encourager l'investissement dans les énergies renouvelables, notamment des tarifs préférentiels pour l'achat d'électricité produite à partir des sources renouvelables. En outre, le gouvernement algérien a mis en place un programme ambitieux pour l'installation de panneaux solaires sur les toits des bâtiments publics (Figure 1.2). [6]

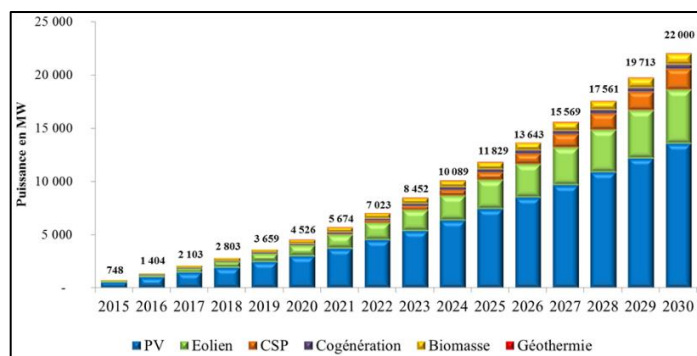


Figure 1.2 programme de developpement des energies renouvelables – ministère de l'énergie et des mines

I.4. Situation de l'énergie éolien

I.4.1. Dans le monde

L'énergie éolienne est de plus en plus considérée comme une source d'énergie propre et renouvelable, qui peut contribuer à la transition énergétique vers une économie plus durable et respectueuse de l'environnement. Les gouvernements et les entreprises du monde entier ont investi massivement dans l'énergie éolienne ces dernières années, pour objectif de réduire les émissions de gaz à effet de serre, de diversifier les sources d'énergie et de renforcer la sécurité énergétique. L'Europe est la région qui a connu la plus forte croissance de l'énergie éolienne ces dernières années, en grande partie grâce aux politiques de soutien à l'énergie renouvelable mises en place par l'Union européenne. Cependant, la Chine et les États-Unis ont également augmenté leur capacité éolienne de manière significative, avec un accent particulier sur l'énergie éolienne terrestre (Figure 1.3) .[2]

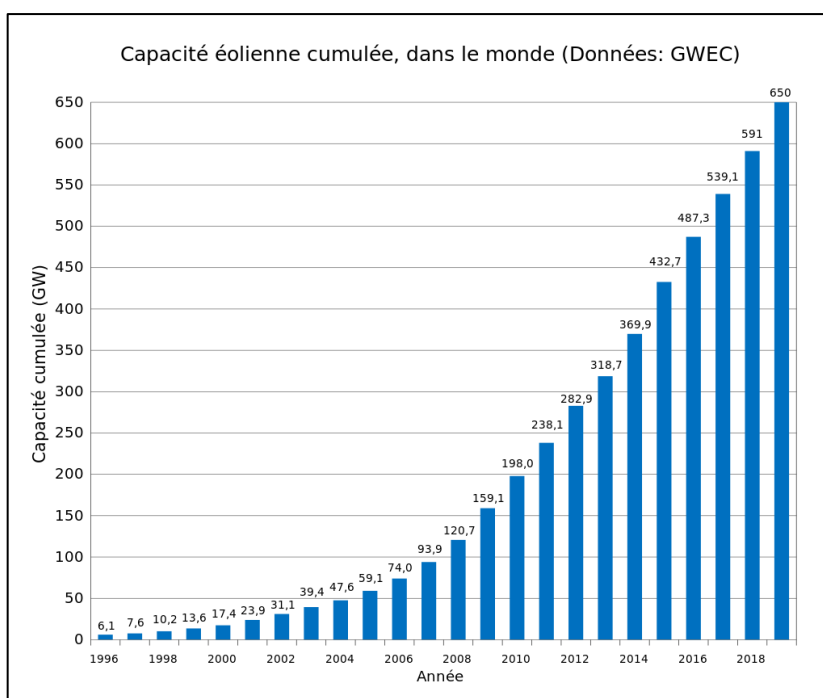


Figure 1.3 Capacité (puissance installée en GW) éolienne cumulée, de 1995 à 2019 dans le monde.

L'énergie éolienne est en train de devenir une source d'énergie importante dans le monde entier, en particulier dans les pays qui cherchent à diversifier leur mix énergétique et à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Bien que des défis subsistent, tels que la variabilité des vents et la nécessité de disposer d'un réseau électrique flexible, l'énergie éolienne continue de croître et de s'améliorer, offrant ainsi un avenir prometteur pour cette source d'énergie renouvelable.

[7]

I.4.2. Dans l'Algérie

L'Algérie dispose d'un potentiel éolien important, notamment dans les zones côtières et les hauts plateaux. (Figure 1.4) Cependant, la capacité installée en énergie éolienne reste faible en comparaison avec d'autres pays. [8]

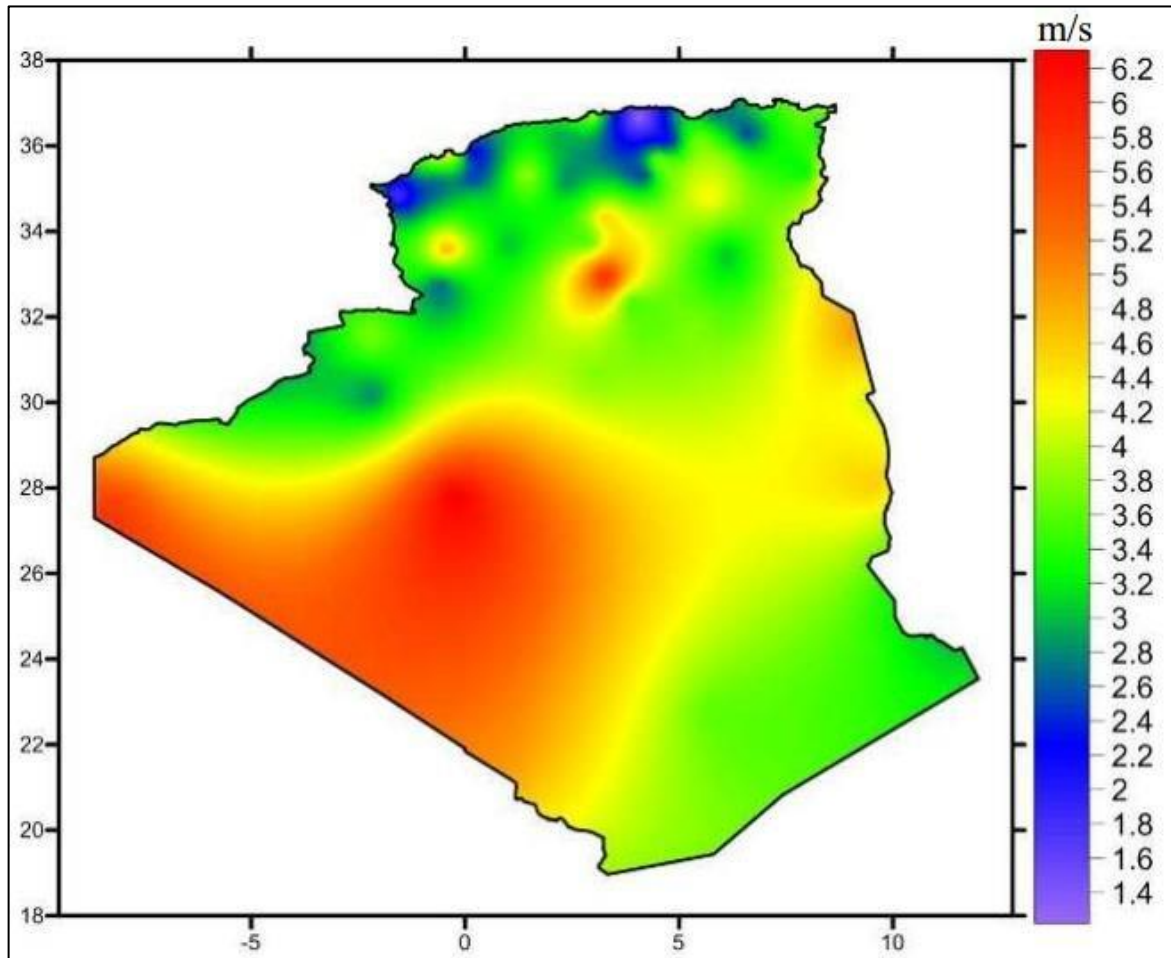


Figure 1.4 Carte de vent en Algérie

Le gouvernement algérien a exprimé son intérêt pour développer l'énergie éolienne dans le pays. En 2020, l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE) a publié un appel d'offres pour la construction de cinq parcs éoliens d'une capacité totale de 800 MW. Selon les prévisions, ces projets devraient être achevés d'ici 2025. [9] En outre, l'Algérie a adopté une série de mesures pour encourager l'investissement dans l'énergie renouvelable, y compris l'énergie éolienne. Par exemple, la loi de finances 2020 a introduit des incitations fiscales pour les projets d'énergie renouvelable, y compris l'énergie éolienne.

I.5. Situation scientifique des énergies renouvelables

Les énergies renouvelables ont fait l'objet de nombreuses recherches scientifiques dans le monde entier, avec un accent particulier sur l'amélioration de l'efficacité, la réduction des coûts et la mise en place d'infrastructures de production et de stockage d'énergie.

L'énergie solaire est l'une des sources d'énergie renouvelable les plus étudiées. Les recherches portent sur l'amélioration de l'efficacité des cellules photovoltaïques, la conception de nouveaux matériaux pour la fabrication de panneaux solaires et le développement de techniques de stockage de l'énergie solaire. Des travaux sont également menés sur l'utilisation de l'énergie solaire dans des applications spécifiques telles que la production d'hydrogène à partir de l'eau. Les autres sources d'énergie renouvelable, telles que l'énergie hydroélectrique, géothermique et de la biomasse, font également l'objet de recherches scientifiques pour améliorer leur efficacité et réduire leurs coûts (Figure 1.5). [11]

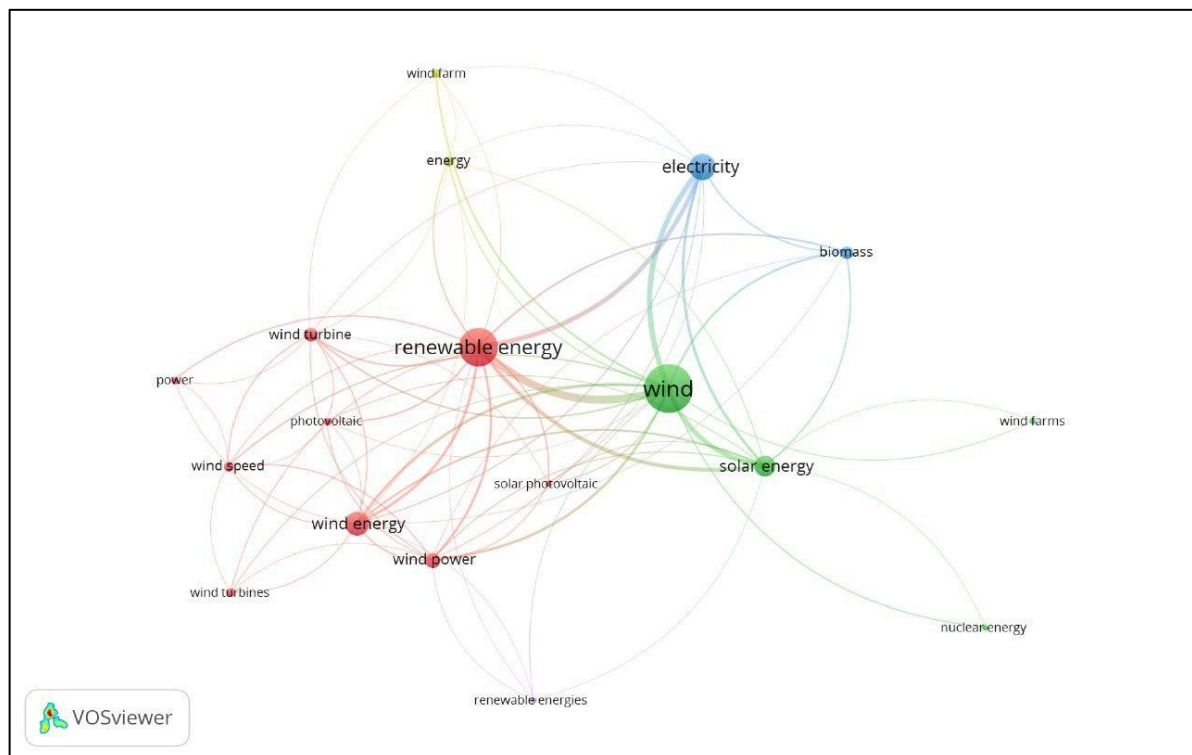


Figure 1.5 Réseau des recherches aux énergies renouvelables et leurs types

I.6. Situation scientifique de l'énergies éolienne

L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable importante qui a connu une croissance rapide ces dernières années. De nombreuses recherches scientifiques ont été menées pour

forme peut varier en fonction de la conception. Ces éoliennes sont souvent utilisées pour les parcs éoliens terrestres.

- **Les éoliennes à axe vertical** : dans ce type d'éolienne, l'axe de rotation de la turbine est vertical et parallèle au sol. Les pales tournent autour de cet axe, ce qui permet d'installer ces éoliennes dans des endroits où la direction du vent est variable. Ces éoliennes sont moins courantes que les éoliennes à axe horizontal, mais elles peuvent être utilisées dans des applications spécifiques, comme les éoliennes urbaines.



Figure 1.7 Eolienne verticale darrieus & Eolienne Horizontal

- B. Les éoliennes offshore** : ce sont des éoliennes installées en mer, généralement à plusieurs kilomètres de la côte. Elles sont plus grandes que les éoliennes terrestres et sont conçues pour résister aux conditions météorologiques difficiles de l'océan. Les

éoliennes offshore produisent en général plus d'énergie que les éoliennes terrestres, mais leur coût d'installation est plus élevé (Figure 1.8).



Figure 1.8 Ferme éolienne offshore de Kentish Flats, au large des côtes britanniques du Kent

I.8. Comparaison entre éolien horizontal et vertical

Tableau 1.1 Différences entre éolienne à axe horizontal et vertical

Base de différence	Éolienne à axe horizontal	Éolienne à axe vertical
Définition	Une éolienne à axe horizontal est celle dont l'axe de rotation est horizontal.	Une éolienne est dite éolienne à axe vertical si son axe de rotation est vertical.
Nom abrégé	HAWT est l'abréviation utilisée pour l'éolienne à axe horizontal.	VAWT est l'abréviation utilisée pour désigner l'éolienne à axe vertical.
Axe de rotation par rapport au courant de vent	Pour l'éolienne à axe horizontal, l'axe de rotation de l'éolienne est parallèle au courant du vent.	Pour l'éolienne à axe vertical, l'axe de rotation de l'éolienne est perpendiculaire au vent.

Emplacement du générateur électrique	Dans l'éolienne à axe horizontal, le générateur électrique est installé au sommet de la tour.	Dans l'éolienne à axe vertical, le générateur est installé au sol.
Emplacement de la boîte de vitesses	Dans HAWT, la boîte de vitesses est installée au sommet de la tour de la turbine.	Dans VAWT, la boîte de vitesses est installée au bas de la turbine.
Besoin d'un mécanisme de lacet	Dans l'éolienne à axe horizontal, le mécanisme de lacet est nécessaire pour orienter l'éolienne dans la direction du vent.	L'éolienne à axe vertical ne nécessite pas de mécanisme de lacet car elle reçoit le vent de toutes les directions.
Auto-démarrage	L'éolienne à axe horizontal est à démarrage automatique.	L'éolienne à axe vertical ne démarre pas automatiquement, un mécanisme de démarrage est donc nécessaire pour la démarrer à partir de la position stationnaire.
Conception et mise en place	La conception et l'installation d'une éolienne à axe horizontal est complexe.	La conception et l'installation d'une éolienne à axe vertical sont relativement simples.
Espace de fonctionnement des lames	Eolienne à axe horizontal nécessite un grand espace pour les lames opération.	L'éolienne à axe vertical nécessite petit espace pour le fonctionnement de la lame.
Dépendance au vent direction	Le fonctionnement de l'axe horizontal l'éolienne dépend du vent direction.	Le fonctionnement du vent à axe vertical la turbine est indépendante du vent direction parce qu'il reçoit le vent de toutes les directions.

Hauteur du sol	La hauteur de l'axe horizontal éolienne du sol est grande.	L'éolienne à axe vertical est installé à relativement plus petit distance du sol.
Besoin de nacelle	Dans le cas d'éoliennes à axe horizontal, une lourde nacelle est installée au sommet de la tour.	Il n'y a pas besoin de nacelle dans le cas d'éoliennes à axe vertical.
Coefficient de puissance	L'éolienne à axe horizontal a un coefficient de puissance élevé.	L'éolienne à axe vertical a un faible coefficient de puissance.
Rapport de vitesse de pointe (TSR)	L'éolienne à axe horizontal a un rapport de vitesse de pointe élevé.	L'éolienne à axe vertical a un rapport de vitesse de pointe considérablement faible.
Bruit produit	Le fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal est bruyant.	Les éoliennes à axe vertical produisent relativement moins de bruit.
Efficacité	Le rendement idéal d'une éolienne à axe horizontal est d'environ 50 à 60 %.	L'efficacité idéale d'une éolienne à axe vertical est généralement supérieure à 70 %.
Gêne pour les oiseaux	Les éoliennes à axe horizontal provoquent une forte obstruction pour les oiseaux.	Les éoliennes à axe vertical gênent moins les oiseaux.
Coût	Les éoliennes à axe horizontal sont plus chères en raison de leur conception et de leur installation complexes.	Les éoliennes à axe vertical sont moins chères car leur conception et leur installation sont assez simples.

I.9. Etude comparait entre onshore et offshore

- **Onshore** : on peut considérer onshore les équipes travaillant sur site ou à une distance relativement courte (2 heures de trajet maximum) et parlant la même langue.

- **Offshore** : on retrouve ici toutes les équipes très éloignées géographiquement comme nos delivery centers au Vietnam ou au Mexique par exemple, avec un décalage horaire nécessitant une organisation projet adaptée et dont la culture et la langue sont le plus souvent différentes.

Une étude comparative entre les installations onshore (sur terre) et offshore (en mer) peut être réalisée dans différents domaines tels que l'énergie, l'industrie pétrolière et gazière, l'éolien offshore, etc. Voici quelques éléments qui peuvent être pris en compte lors d'une telle étude :

1. **Coûts** : Les coûts initiaux et opérationnels diffèrent entre les installations onshore et offshore. Les projets offshore sont généralement plus coûteux en raison des défis techniques et logistiques liés à la construction et à la maintenance en mer.
2. **Impact environnemental** : Les installations offshore peuvent avoir un impact environnemental différent de celui des installations onshore. Les émissions de gaz à effet de serre et la pollution de l'eau peuvent varier en fonction du type d'installation et des technologies utilisées.
3. **Ressources disponibles** : L'accès aux ressources naturelles, telles que les gisements de pétrole, de gaz ou les zones ventées pour l'éolien, diffère entre les sites onshore et offshore. Cela peut influencer la rentabilité et la viabilité des projets.
4. **Risques et sécurité** : Les installations offshore présentent des risques supplémentaires liés aux conditions maritimes, aux tempêtes, aux vagues, etc. Les opérations en mer nécessitent des mesures de sécurité spécifiques pour protéger les travailleurs et les installations.
5. **Impact sur les communautés locales** : Les projets onshore peuvent avoir un impact plus direct sur les communautés locales en termes d'emplois, de retombées économiques et de perturbations sociales. Les projets offshore peuvent être plus éloignés des zones habitées et avoir un impact différent sur les communautés côtières.
6. **Évolutivité et potentiel de croissance** : Les installations offshore peuvent offrir un potentiel de croissance plus important, car les ressources en mer peuvent être plus vastes et moins exploitées. Cependant, les contraintes techniques et les coûts élevés peuvent limiter cette évolutivité.

Il convient de noter que les résultats d'une étude comparative peuvent varier en fonction des contextes spécifiques, des technologies utilisées et des objectifs de l'étude. Il est donc important de prendre en compte ces facteurs lors de la réalisation d'une telle étude.

- **Les éoliennes flottantes** : ces éoliennes sont installées sur des structures flottantes qui sont ancrées au fond de la mer. Elles sont utilisées dans des zones où la profondeur de

l'eau est importante, ce qui rend difficile l'installation d'éoliennes fixes. Les éoliennes flottantes sont encore en développement et sont moins courantes que les éoliennes terrestres ou offshore ;

I.10. Eléments constitutifs d'une éolienne

Il y a différentes configurations possibles pour les éoliennes qui peuvent varier considérablement. Cependant, en général, une éolienne conventionnelle se compose de trois éléments principaux : le rotor, la nacelle et la tour. Chacun de ces éléments doit être soigneusement étudié et modélisé afin d'optimiser l'efficacité et la fiabilité du système, tout en maintenant un coût d'investissement raisonnable (Figure 1.9).

La nacelle : La nacelle contient tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique : les pales, l'anémomètre et le rotor sont fixés sur la nacelle. A l'intérieur, se trouvent :

- La boîte de vitesse ;
- La génératrice ;
- Les systèmes de contrôles ;
- Le capteur de température (huile de la boîte de vitesse afin de distinguer une usure prématurée) ;
- Le capteur de vibration et le capteur de vitesse (une éolienne commence à tourner à partir de 20km/h, est à sa pleine puissance à 60km/h, et les pales arrêtent de tourner lorsque le vent dépasse 90km/h);

La nacelle se situe à environ 60 mètres au-dessus du sol et les pales mesurent (sur une éolienne de 100 mètres) environ 32 mètres.

Le rotor : Le système est composé des pales, du moyeu (ou nez), ainsi que de multiples dispositifs de commande logés dans le nez.

Plusieurs études en souffleries ont été menées pour déterminer le nombre idéal de pales pour assurer un fonctionnement optimal de l'éolienne.

On a démontré que :

- Moins les pales sont nombreuses, plus l'éolienne met du temps pour démarrer et inversement ;
- De plus, lorsque l'éolienne a deux pales, les vibrations sont très fortes et rendent ainsi l'éolienne fragile. Lorsqu'elle en possède plus de trois, les pales sont perturbées par l'air déplacé par la pale précédente. Le rendement s'en trouve ainsi réduit ;

Ainsi le nombre optimal de pales pour le fonctionnement d'une éolienne est de trois. Les pales sont torsadées afin d'offrir plus de surface au vent et peuvent aussi s'orienter. L'ensemble des éléments du rotor qui est reliée au multiplicateur par l'arbre principal est toujours orientée de façon à être face au vent grâce à la girouette et à l'anémomètre.

Les pales du rotor sont chargées de capter l'énergie du vent et de la transférer au moyeu du rotor. Pour une éolienne d'une puissance de 1,5 MW, chaque pale mesure environ 30 à 35 mètres de long et sa conception est similaire à celle des ailes d'un avion.

La tour est la composante la plus importante de l'éolienne et se présente sous la forme d'une structure massive en acier ou en béton qui soutient l'éolienne, assure les connexions nécessaires et permet l'accès à la nacelle. Avec une hauteur pouvant dépasser les 100 mètres, elle est équivalente en hauteur à un bâtiment de 20 étages. La tour maintient la nacelle en altitude, où le vent est le plus constant et le plus puissant.

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

L'arbre principal entraîne le multiplicateur qui, grâce à un système complexe d'engrenages, transforme le mouvement lent et puissant de l'axe principal en un mouvement très rapide mais moins puissant.

Le principe est similaire à celui d'un vélo équipé d'un pignon et d'un plateau. Lorsque l'on choisit un grand plateau avec un petit pignon, la force appliquée aux pédales, qui sont directement connectées au plateau, doit être très élevée, ce qui rend le mouvement lent. En revanche, le mouvement transmis via la chaîne et le mécanisme de pignons sera beaucoup plus rapide, mais moins puissant.

La génératrice est un composant essentiel d'une éolienne car elle assure la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle peut être installée directement sur l'axe de l'aérogénérateur ou être entraînée par un multiplicateur.

Il existe 2 types de génératrice (ou générateur) :

- La dynamo qui permet de fournir un courant continu directement utilisable ;
- L'alternateur qui permet de fournir une fréquence variable en fonction de la vitesse de rotation. L'alternateur crée un courant en faisant tourner des bobines ou des aimants, placés sur le rotor et qui créent ainsi un champ magnétique. Il nécessite donc un convertisseur et est utilisé plus particulièrement par les éoliennes domestiques ;

Nous pouvons préciser afin d'éviter les confusions que sur un vélo, le système appelé dynamo par abus de langage est en réalité un alternateur et non une dynamo (dans son sens défini ci-dessus).

L'arbre lent de l'éolienne lie le moyeu du rotor au multiplicateur.

L'arbre rapide fait environ 1 800 tours par minute et est responsable de la rotation de la génératrice électrique. Il est équipé d'un frein mécanique à disque qui peut être activé en cas d'urgence, comme lorsqu'il y a une défaillance du frein aérodynamique ou pendant la maintenance de l'éolienne.

Le système de direction est composé d'un moteur qui s'assure que l'éolienne reste constamment orientée vers le vent. Il est contrôlé par un système de gestion, un ordinateur qui surveille en continu l'état de la machine et de son environnement, ainsi que par une girouette qui indique la direction du vent et un anémomètre qui mesure sa vitesse.

La fondation est habituellement réalisée en béton armé. Elle doit être suffisamment robuste pour supporter l'intégralité de la structure de l'éolienne.

L'armoire de couplage au réseau électrique convertit la tension de manière à rendre l'énergie générée par l'éolienne compatible avec celle du réseau. Le convertisseur synchronise l'électricité produite par l'éolienne avec celle déjà présente sur le réseau.

Le système de freinage est extrêmement crucial dans une éolienne car une défaillance peut être fatale pour la machine. En effet, le freinage a été l'un des premiers défis auxquels les ingénieurs ont été confrontés lors des débuts des éoliennes.

Pour des vents trop forts le générateur « s'emballe » et peut alors détruire de nombreux composants de la nacelle. Ainsi le système de freinage s'impose pour des vents dépassant les 90km/h il permet alors d'empêcher le rotor de tourner

L'anémomètre calcule la vitesse du vent et permet de déterminer quand l'éolienne doit être activée ou désactivée.

La girouette indique la direction du vent et assure que la nacelle reste positionnée face au vent.

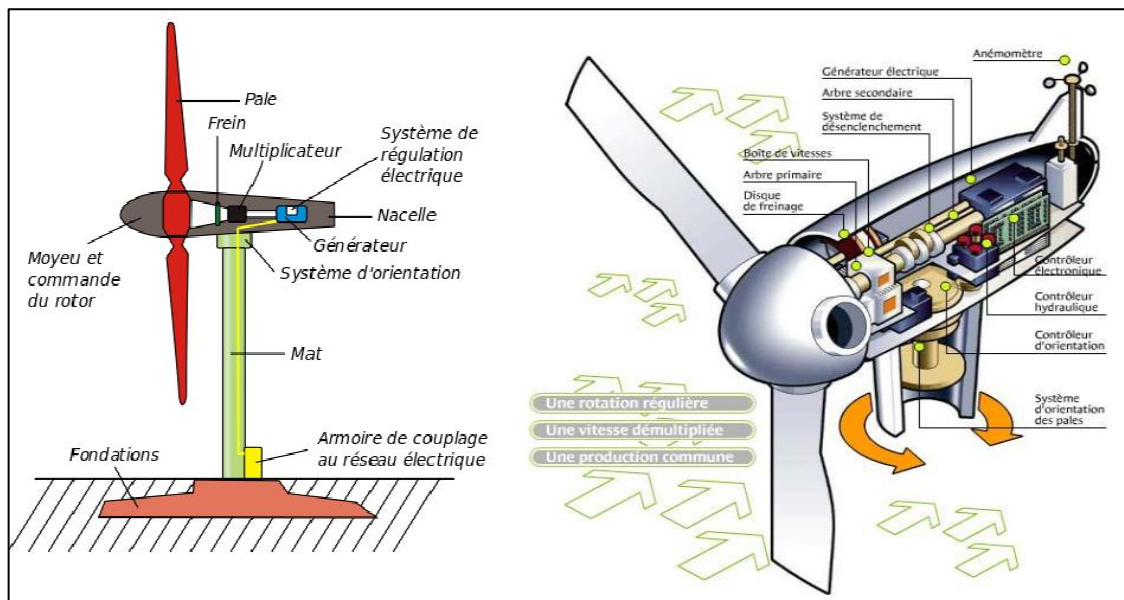


Figure 1.9 Eléments constitutifs d'une éolienne

I.11. Classification

Différentes classes de taille sont définies pour les éoliennes. En théorie, il n'y a pas de corrélation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, la puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor, qui ne dépend pas toujours de la hauteur de l'éolienne, mais plutôt du diamètre du rotor. Cependant, dans le cas des grandes éoliennes, il est généralement conseillé que la hauteur du mât, L , soit égale au diamètre du rotor, D , ce qui entraîne un lien indirect entre la hauteur du mât et la puissance. Le tableau ci-dessous indique les classifications de taille ainsi que les ordres de grandeur de puissance correspondants. Il convient de noter qu'il ne s'agit que d'ordres de grandeur de puissance et que cela ne prend du sens que si la vitesse du vent à laquelle elle est produite est définie.

Tableau 1.2 Classification des éoliennes suivant la taille et ordre de grandeur associé.

Dénomination	Diamètre du rotor [m]	Aire balayée [m ²]	Puissance [kW]
Micro	0.5-1.25	50-100	0.25
Mini	1.25-3	1.2-7.1	1.5
Domestique	3-10	7-79	15
Petite commerciale	10-20	79-314	100
Moyenne commerciale	20-50	314-1963	1000
Grande commerciale	50-100	1963-7854	3000

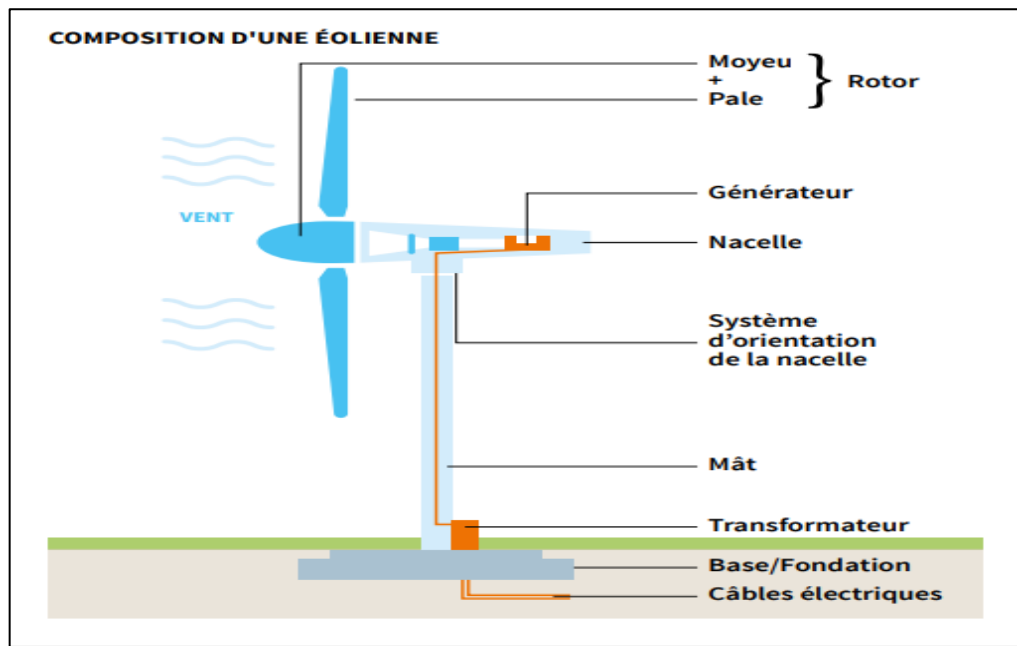
Pour être plus parlant, on trouve classiquement ces éoliennes pour les applications suivantes :

- Micro-éoliennes : en général pour couvrir des besoins très limités et sites isolés (par exemple, des sites de pêche, des bateaux, des caravanes) ;
- Mini-éoliennes : essentiellement pour recharger des batteries sur des sites isolés du réseau, les plus puissantes peuvent servir pour l'alimentation domestique hors du réseau (maisons isolées) ;
- Eoliennes domestiques : elles balayent un spectre assez large allant de rotors de 3 à 10 m de diamètre. C'est typiquement le genre d'éoliennes proposées pour les particuliers :
- Eoliennes petites commerciales : elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, les fermes, ... mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme :
- Eoliennes moyennes commerciales : elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voire des petits parcs éoliens :
- Eoliennes grands commerciales : ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes, ce sont aussi les plus efficaces.

I.12. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Le principe de fonctionnement d'une éolienne repose sur la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique utilisable. Voici les étapes clés du fonctionnement d'une éolienne (Figure 1.10) :

- Le vent fait tourner les pales de l'éolienne : lorsque le vent souffle, il exerce une force sur les pales de l'éolienne. Cette force entraîne la rotation de l'axe de la turbine ;
- La rotation de l'axe de la turbine fait tourner le générateur : l'axe de la turbine est relié à un générateur qui convertit l'énergie cinétique de la rotation en énergie électrique. Plus la vitesse de rotation de l'axe est élevée, plus la production d'énergie électrique est importante ;
- L'énergie électrique produite est envoyée vers le réseau électrique : l'énergie électrique produite par l'éolienne est acheminée vers un transformateur qui élève sa tension pour la rendre compatible avec le réseau électrique. L'électricité est ensuite injectée dans le réseau pour être distribuée aux consommateurs ;



• **Figure 1.10** Le fonctionnement de l'énergie éolienne

I.13. Les différents types de système éolien

Les systèmes d'énergie éolienne diffèrent selon de nombreux facteurs, y compris la méthode de connexion

I.13.1. Système hybride

En général, un système hybride consiste en une éolienne associée à des panneaux solaires, permettant d'exploiter simultanément ou alternativement l'énergie éolienne et l'énergie solaire pour produire de l'électricité. Le système hybride éolien/solaire est principalement utilisé en site isolé pour alimenter les appareils électriques, permettant ainsi de tirer pleinement parti des énergies renouvelables disponibles sur place. En résumé, l'éolienne hybride offre une solution efficace pour exploiter toutes les sources d'énergie renouvelable disponibles sur un site donné.

Les équipements essentiels de systèmes hybrides sont (Figure 2.1) :

- Une éolienne ;
- des panneaux solaires avec une tension au bout qui peut être différente de celle de l'éolienne ;
- un régulateur de tension MPPT ;
- un régulateur de charge éolienne ;
- régulateur solaire ;
- batterie ;
- un convertisseur ;

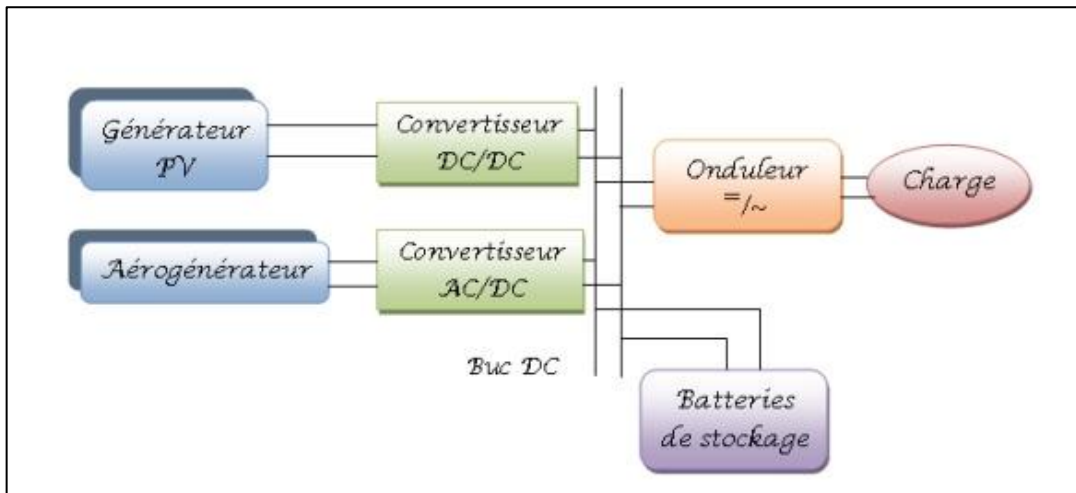


Figure 1.11 Schéma de Système hybride (éolienne - solaire)

Chaque éolienne et panneau solaire est relié à un convertisseur éolien et un convertisseur solaire respectivement, qui sont ensuite reliés à une batterie. Ces convertisseurs prennent le courant issu de la batterie et le transforment en courant alternatif 220/230V, ce qui permet d'alimenter les appareils électriques.

I.13.2. Système éolien autonome

L'énergie éolienne est utilisée de plusieurs manières. Elle permet d'alimenter en électricité des sites isolés tels que des îles ou des zones à relief accidenté inaccessibles au réseau électrique. Elle est également utilisée pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises, ainsi que pour le pompage d'eau domestique et l'irrigation pour l'agriculture. Ces éoliennes, de petite puissance, sont appelées "petit éolien" en opposition au "grand éolien" ou à l'éolien industriel [15].

Les petits systèmes éoliens sont conçus différemment des éoliennes connectées aux grands réseaux. L'objectif de ces systèmes n'est pas nécessairement la conversion maximale de l'énergie éolienne, mais plutôt la production d'une quantité suffisante d'électricité avec un coût d'installation et de maintenance aussi bas que possible. C'est pourquoi la plupart des systèmes éoliens isolés utilisent des générateurs asynchrones à cage, en raison de leur faible coût, leur robustesse et leur standardisation [16], [17]. Ces générateurs sont souvent associés à une batterie de condensateurs qui fournit la puissance réactive nécessaire à leur magnétisation.

Des générateurs synchrones sont également utilisés [18]. Ils offrent un bon couple massique et peuvent éventuellement se passer d'un multiplicateur de vitesse. Cependant, leur utilisation est limitée en raison de leur prix plus élevé que celui des générateurs à induction de même taille [19].

I.13.3. Systèmes d'éoliennes connectés au réseau

Les systèmes éolien connectés au réseau électrique sont des installations éoliennes qui produisent de l'électricité à partir de l'énergie éolienne et la transmettent au réseau électrique. Ces systèmes sont généralement utilisés pour la production d'électricité à grande échelle et sont conçus pour être connectés à des réseaux électriques nationaux ou régionaux. Ils peuvent être constitués d'une ou plusieurs éoliennes et peuvent être installés dans des zones terrestres ou maritimes.

Les éoliennes connectées au réseau électrique peuvent contribuer à la transition énergétique en fournissant une source d'électricité propre et renouvelable au réseau électrique. L'énergie éolienne est considérée comme une énergie propre car elle ne produit pas de gaz à effet de serre, contrairement aux sources d'énergie fossile comme le charbon ou le pétrole. De plus, l'énergie éolienne est renouvelable, ce qui signifie qu'elle ne s'épuise pas avec le temps, contrairement aux sources d'énergie fossile qui sont épuisables.

Les éoliennes connectées au réseau électrique peuvent également aider à réduire la dépendance des pays aux importations d'énergie. En produisant de l'électricité à partir de l'énergie éolienne, les pays peuvent réduire leur dépendance aux combustibles fossiles importés et améliorer leur sécurité énergétique. De plus, l'énergie éolienne est souvent produite localement, ce qui peut réduire les coûts de transport et de distribution de l'électricité.

Les éoliennes connectées au réseau électrique peuvent également créer des emplois et stimuler l'économie. Selon l'Agence internationale de l'énergie, le secteur éolien emploie actuellement environ 1,2 million de personnes dans le monde. La construction et l'exploitation de parcs éoliens peuvent créer des emplois locaux dans les industries de la construction, de l'ingénierie et de la maintenance. De plus, les investissements dans les énergies renouvelables peuvent stimuler l'économie locale en créant des opportunités pour les entreprises locales et en attirant des investissements étrangers.

En résumé, les systèmes d'éoliennes connectés au réseau électrique sont des installations éoliennes qui produisent de l'électricité à partir de l'énergie éolienne et la transmettent au réseau électrique. Ces systèmes peuvent contribuer à la transition énergétique en fournissant une source d'électricité propre et renouvelable, réduire la dépendance des pays aux importations d'énergie, créer des emplois et stimuler l'économie.

I.14. Conception de systèmes éolien connecte au réseau

La conception de systèmes d'éoliennes connectés au réseau est un processus complexe qui implique plusieurs étapes clés, allant de la conception initiale à la mise en service. Ces systèmes

sont conçus pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique et la distribuer au réseau électrique.

La première étape de la conception d'un système d'éoliennes connectées au réseau est la sélection d'un site approprié pour installer les éoliennes. Cette étape implique une évaluation approfondie des conditions éoliennes locales, y compris la vitesse et la direction du vent, la topographie, la géologie et les contraintes environnementales. Des outils de modélisation informatique peuvent être utilisés pour estimer la production d'énergie et déterminer la configuration optimale des éoliennes.

La deuxième étape est la sélection des composants du système, y compris les éoliennes, les convertisseurs de puissance, les transformateurs, les câbles et les systèmes de contrôle. Les éoliennes modernes utilisent des technologies avancées pour maximiser l'efficacité et la fiabilité, tandis que les convertisseurs de puissance sont conçus pour convertir l'énergie électrique de la turbine en courant alternatif à haute tension pour l'injecter dans le réseau électrique.

La troisième étape est la conception de l'infrastructure nécessaire pour connecter le système d'éolienne au réseau électrique, notamment les câbles de transmission et les transformateurs. La connexion au réseau électrique nécessite une coordination avec le gestionnaire de réseau pour assurer la conformité aux réglementations locales et nationales.

La quatrième et dernière étape est la mise en service et la mise en exploitation du système. Cette étape implique la mise en marche des éoliennes et l'injection d'électricité dans le réseau électrique, ainsi que la mise en place d'un système de surveillance et de contrôle pour assurer le bon fonctionnement du système et la sécurité des travailleurs.

Actuellement et dans un proche avenir, les générateurs pour les éoliennes seront des générateurs synchrones, des générateurs synchrones à aimant permanent et des générateurs d'induction, y compris le type à cage d'écureuil et le type à rotor enroulé. Pour les éoliennes de petite à moyenne puissance, les générateurs à aimant permanent et les générateurs d'induction à cage d'écureuil sont souvent utilisés en raison de leur fiabilité et de leurs avantages économiques. Les générateurs d'induction, les générateurs synchrones à aimant permanent et les générateurs synchrones à champ enroulé sont actuellement utilisés dans diverses éoliennes de grande puissance. Les appareils d'interconnexion sont des dispositifs permettant de réaliser le contrôle de puissance, le démarrage progressif et les fonctions d'interconnexion. Très souvent, des convertisseurs électroniques de puissance sont utilisés comme tels. Afin d'analyser la compatibilité de la production éolienne dans les systèmes électriques, quatre facteurs peuvent être pris en compte (Figure 2.2) :

- Caractéristiques du système d'alimentation électrique (Réseau) ;
- Technologie éolienne (PARC ÉOLIEN) ;
- Exigences de raccordement au réseau ;
- Outils de simulation ;

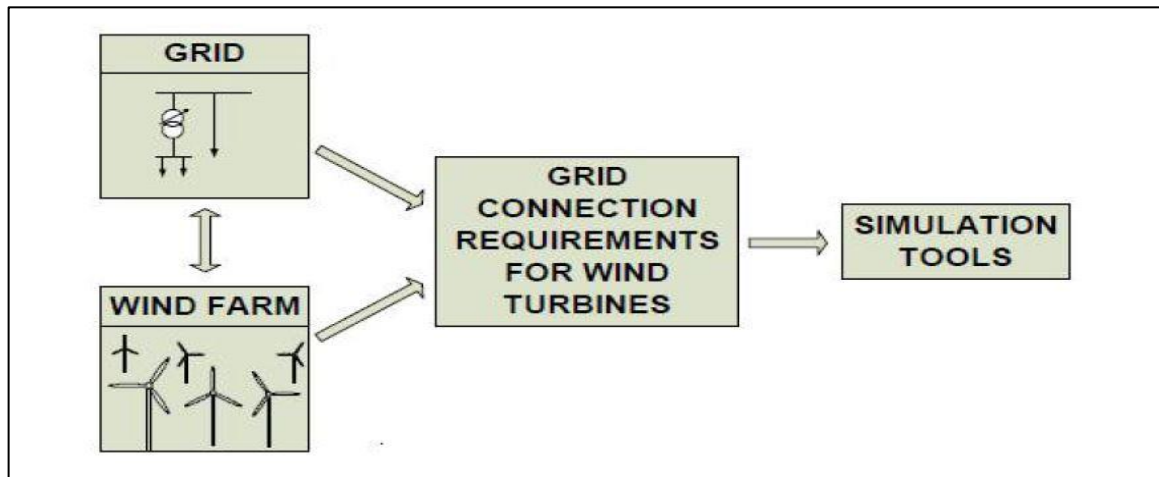


Figure 2.2 Méthodologie d'évaluation de la production d'éoliennes et de la compatibilité du système électrique

I.14.1. Éoliennes à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe fonctionnent à une vitesse constante. Cela signifie que, indépendamment de la vitesse du vent, la vitesse de rotation du rotor de l'éolienne est fixe et déterminée par la fréquence du réseau électrique. Les éoliennes à vitesse fixe sont généralement équipées de générateurs à induction à cage d'écureuil, de démarreurs doux et de banques de condensateurs et elles sont connectées directement au réseau électrique, comme illustré dans la (Figure 2.3)

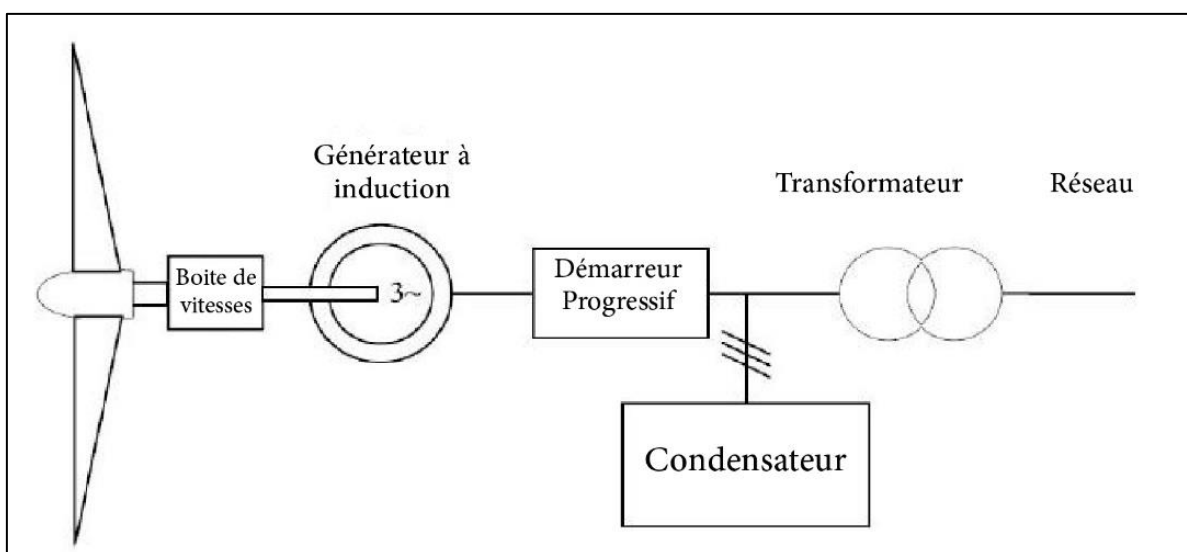


Figure 2.3 Structure générale d'un WECS à vitesse fixe

Les générateurs à induction à cage d'écureuil (SCIG) étaient préférés car ils sont mécaniquement simples et ont un faible coût d'entretien. Les éoliennes à base de SCIG sont conçues pour atteindre une efficacité de puissance maximale à une vitesse de vent unique. Afin d'augmenter l'efficacité de puissance, les éoliennes à vitesse fixe ont l'avantage d'être simples, robustes et fiables, avec des systèmes électriques simples et peu coûteux et une opération bien éprouvée. D'un autre côté, en raison de l'opération à vitesse fixe, le stress mécanique est important et toute la puissance éolienne n'est pas extraite.

Une évolution des éoliennes à base de SCIG à vitesse fixe est représentée par les éoliennes à vitesse variable limitée. Elles sont équipées d'un générateur à induction à rotor bobiné (WRIG) avec une résistance de rotor externe variable comme illustré dans la (Figure 2.4) La caractéristique unique de cette éolienne est qu'elle possède une résistance de rotor externe supplémentaire variable, contrôlée par l'électronique de puissance. Ainsi, la résistance totale (interne plus externe) du rotor est réglable, contrôlant davantage le glissement du générateur et donc la pente de la caractéristique mécanique.

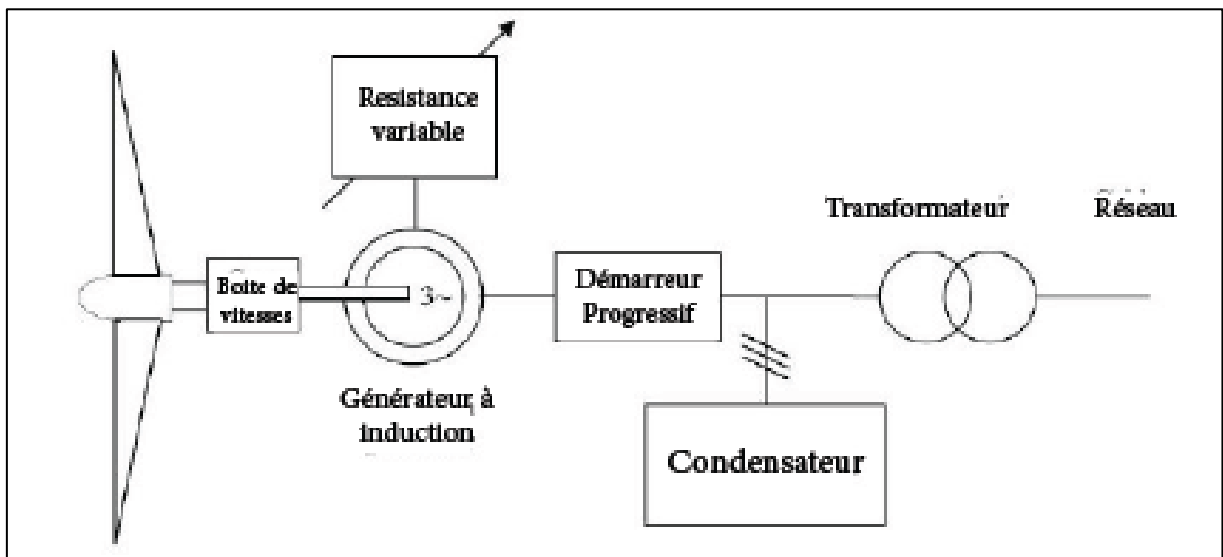


Figure 2.4 Structure générale d'un SCEO limité à vitesse variable

I.14.2. Éoliennes à vitesse variable

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les éoliennes les plus utilisées. L'opération à vitesse variable est possible grâce à l'interface des convertisseurs électroniques de puissance, permettant un découplage complet (ou partiel) du réseau électrique. Les éoliennes à base de générateur à induction à double alimentation (DFIG) illustrées dans la (Figure 2.5)

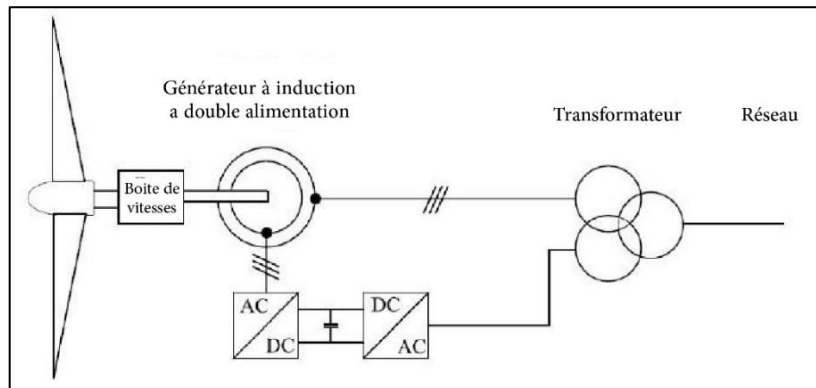


Figure 2.5 Structure générale d'un WECS à vitesse variable amélioré

Le DFIG est un WRIG dont les enroulements du stator sont directement connectés au réseau triphasé à fréquence constante, tandis que les enroulements du rotor sont connectés à un convertisseur de tension à source de courant alternatif (AC-AC) en back-to-back. Ainsi, le terme "doublement alimenté" vient du fait que la tension du stator est appliquée à partir du réseau et la tension du rotor est imposée par le convertisseur de puissance. Le convertisseur électronique de puissance comprend deux convertisseurs IGBT, à savoir le convertisseur côté rotor et le convertisseur côté réseau, connectés avec un lien de courant continu (CC). Le convertisseur côté rotor contrôle le générateur en termes de puissance active et réactive, tandis que le convertisseur côté réseau contrôle la tension du lien CC et assure une opération à un grand facteur de puissance. Le stator injecte de la puissance dans le réseau en permanence. Le rotor, en fonction du point de fonctionnement, injecte de la puissance dans le réseau lorsque le glissement est négatif (fonctionnement supérieur à la synchronisation) et absorbe de la puissance du réseau lorsque le glissement est positif (fonctionnement sous-synchrone). Dans les deux cas, le flux de puissance dans le rotor est approximativement proportionnel au glissement. Les éoliennes à base de DFIG sont hautement contrôlables, permettant une extraction maximale de puissance sur une large plage de vitesses de vent (Figure 2.6).

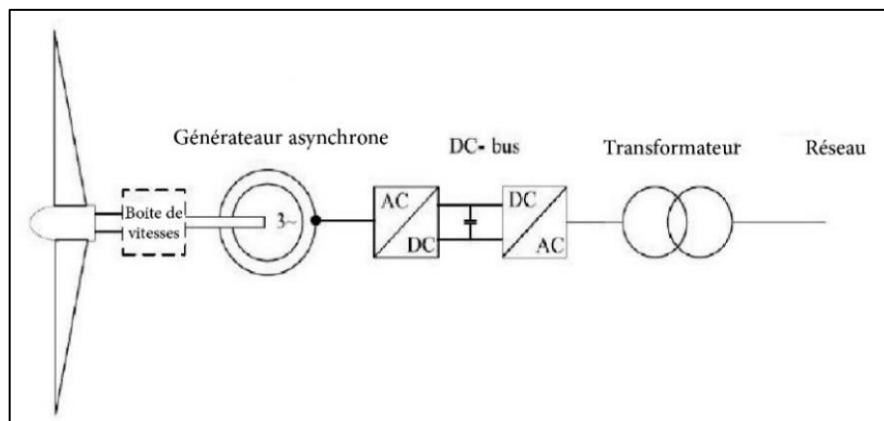
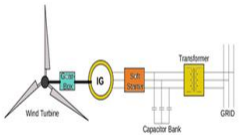
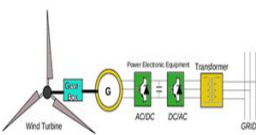
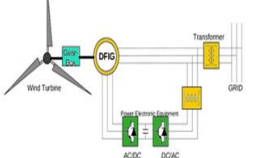


Figure 2.6 Structure générale d'un WECS complet à vitesse variable

Tableau 1.3 Etude comparative des générateur éoliennes

	Système de génération a vitesse fixe	Système de génération a vitesse variable	Générateur à induction à double alimentation
Structure			
Machines	SQIG	PMSG / WRSG / WRIG	DFIG
Avantages	Simple et peu couteux	Contrôle complet du réel et du réactif pouvoirs Haute efficacité énergétique	Convertisseur de capacité réduite Contrôle découplé de la puissance active et réactive
Inconvénients	Pas de contrôle sur la puissance réelle et réactive Capacité d'extraction d'énergie moins optimale Mauvais facteur de puissance Contrainte mécanique élevée sur la mécanique de la turbine composants	Coût supplémentaire de l'électronique de puissance Capacité limitée de gestion des pannes	Entretien régulier de la bague collectrice et de la boîte de vitesses Capacité limitée de passage en panne

1.15. Avantages et inconvénients

Les énergies renouvelables présentent de nombreux avantages, notamment :

- Inépuisables : contrairement aux énergies fossiles qui sont limitées, les énergies renouvelables sont disponibles en quantité illimitée ;
- Propres : les énergies renouvelables ne produisent pas de gaz à effet de serre ni de pollution atmosphérique. Elles contribuent donc à la lutte contre le changement climatique et à la préservation de l'environnement ;
- Economiques : la production d'énergie renouvelable est de plus en plus compétitive par rapport aux énergies fossiles, ce qui permet de réduire les coûts pour les consommateurs ;
- Locales : les énergies renouvelables peuvent être produites localement, ce qui permet de réduire la dépendance aux importations d'énergie ;

Cependant, les énergies renouvelables présentent également des inconvénients, tels que :

- Leur production peut dépendre des conditions météorologiques : l'énergie solaire et éolienne dépendent des conditions climatiques, ce qui peut entraîner des fluctuations de production d'électricité ;
- Leur coût de production initial peut être élevé : la mise en place d'infrastructures de production d'énergie renouvelable peut nécessiter un investissement important.
- Leur production peut avoir un impact sur l'environnement : la production d'énergie renouvelable peut avoir des impacts sur l'environnement, tels que la dégradation des habitats naturels, la pollution sonore, ou encore la nécessité de construire des infrastructures de production et de transport ;
- Leur production peut nécessiter des terres : la production d'énergie renouvelable peut nécessiter l'utilisation de terres, ce qui peut entrer en conflit avec d'autres usages du sol.

Il est donc important de prendre en compte ces différents aspects pour évaluer les avantages et les inconvénients des énergies renouvelables, et trouver des solutions pour minimiser les impacts négatifs tout en maximisant les avantages.

I.16. Définition de la zone étudiée [27]

Tamacine ou Temacine est une commune de la wilaya de Touggourt en Algérie, située à 10 km au sud-ouest de Touggourt.

- **Population** : 20 067 hab. (20081) ;
- **Densité** : 67 hab./km² ;

Géographie

- **Coordonnées** : 33° 01' 19" nord, 6° 01' 22" est ;
- **Superficie** : 300 km² ;

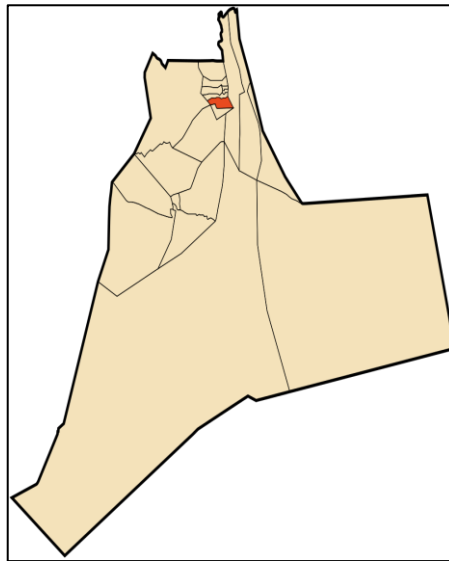


Figure 1.17 Localisation de Tamacine [27]

A l'aide du programme meteonorm, nous avons obtenu des vitesses de vent dans la région de Tamasin à une hauteur de 10 mètres. A noter que les éoliennes mesurent 36 mètres de long. Selon l'équation suivante, nous pouvons calculer les vitesses de l'air à une hauteur de 36 mètres.

$$V2 = V1 \left(\frac{H2}{H1} \right)$$

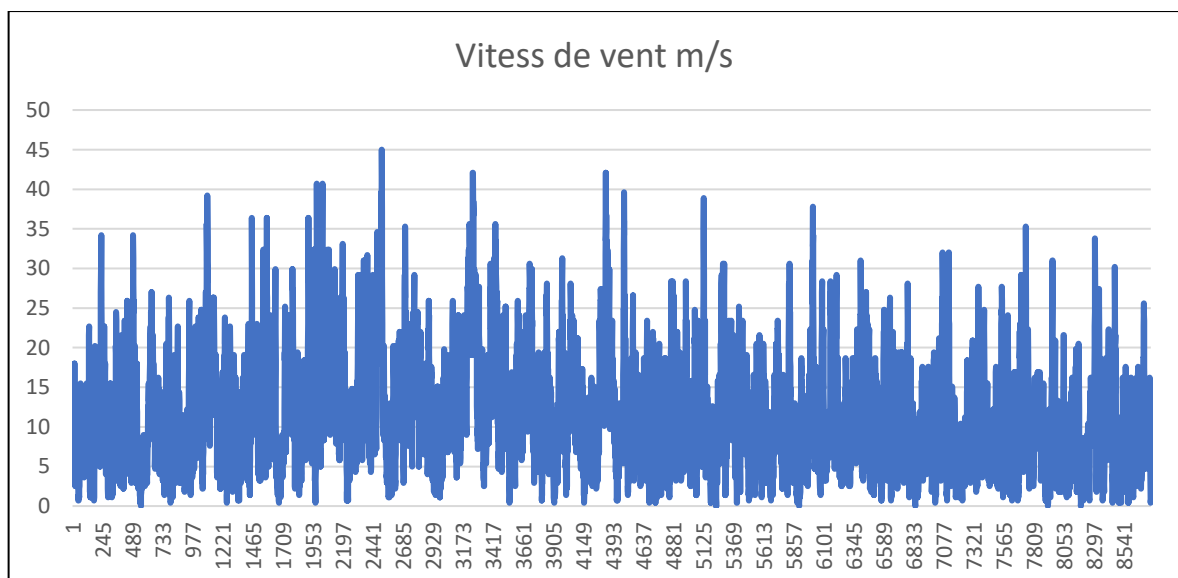


Figure 1.18 Graphique de la vitesse de l'air à 36 mètres

Après avoir calculé la vitesse du vent à une hauteur de 36 mètres (Figure 3.2), sur la base des valeurs de vitesse à 10 mètres de la surface de la terre. On retrouve des vitesses plus

importantes, dues au manque de frottement avec la surface de la Terre, en plus de l'effet de la pression atmosphérique et de la redistribution de l'énergie

I.17. Conclusion

Les énergies renouvelables peuvent jouer un rôle important dans la transition vers un avenir plus durable et respectueux de l'environnement. Elles présentent de nombreux avantages mais aussi des défis à relever, tels que les coûts de production, la dépendance aux conditions climatiques, l'impact environnemental et l'utilisation des terres. La recherche scientifique et l'innovation sont essentielles pour améliorer l'efficacité, la compétitivité et la durabilité des énergies renouvelables. Les politiques publiques et les réglementations peuvent encourager le développement des énergies renouvelables et stimuler l'investissement privé. La transition vers des énergies renouvelables nécessite une action collective et concertée à tous les niveaux.

Dans le chapitre suivant nous étudierons plus en détail la modélisation du système éolien. Mentionner les types de systèmes éoliens et leurs composants.

Chapitre II

Modélisation De Système Eolien

II.1. Introduction

La conception de systèmes éoliens est un processus complexe qui implique de nombreux aspects de l'ingénierie et de la modélisation. Pour concevoir un système éolien efficace, il faut prendre en compte de nombreux facteurs tels que la vitesse et la direction du vent, la taille et la forme des pales, la capacité de stockage d'énergie, le coût et la durabilité des composants.

La modélisation est également un élément clé de la conception de systèmes éoliens. Les modèles peuvent être utilisés pour prédire les performances des éoliennes dans différentes conditions de vent, pour optimiser la conception des pales et pour évaluer la viabilité économique des projets éoliens.

Le but de cette section est de présenter les types de systèmes éoliens, et la conception de chacun de ces systèmes avec une modélisation mathématique pour chaque équipement de système éolienne.

II.2. Modélisation des système éolien

La première étape consiste à énoncer le problème et à définir un ensemble de paramètres à analyser en donnant les exigences de connexion au réseau. Après cela, l'outil de simulation adapté à l'analyse du problème énoncé et à donner les résultats demandés doit être choisi. Après avoir choisi le logiciel de simulation pratique, la modélisation des composants de l'éolienne et du réseau électrique doit être effectuée.

Les parcs éoliens sont constitués de nombreuses unités de production relativement petites. Deux modèles différents pourraient être appliqués à la modélisation du parc éolien : la modélisation séparée de toutes les petites unités de production ou l'agrégation de ces nombreux générateurs en un modèle représentatif de parc éolien.

Les éoliennes utilisent deux modèles différents : les modèles statiques et les modèles dynamiques. Des modèles statiques sont nécessaires pour analyser tous les types d'analyse en régime permanent. Habituellement, ces modèles sont simples et faciles à créer. Des modèles dynamiques sont nécessaires pour divers types d'analyse liés à la dynamique du système, à l'analyse du contrôle, à l'optimisation, etc.

Deux types différents de modèles dynamiques sont utilisés : les modèles physiques fonctionnels et mathématiques. La différence entre eux est que ce dernier comprend un modèle détaillé d'électronique de puissance. Le tableau II compare le modèle et le type d'analyse. Pour analyser les éoliennes à vitesse variable, il faut tenir compte des points suivants :

- Les convertisseurs et commandes électroniques de puissance peuvent être regroupés avec la partie électrique des générateurs ;

- L'inertie du générateur, l'aérodynamique et les contrôleurs de pas doivent être modélisés individuellement ;

Comme toujours avec la modélisation et la simulation, les résultats doivent être vérifiés par les données et les mesures disponibles (Tableau 2.1).

Tableau 2.1 Les différents types des modèles

Modèle	Type d'analyse
Modèles statiques à l'état stationnaire	Analyse de la variation de tension Analyse du flux de charge Analyse des courts-circuits
Modèles dynamiques à états transitoires Modèles fonctionnels	Analyse de la stabilité transitoire Analyse de la stabilité des petits signaux Analyse de la réponse transitoire Analyse des formes d'onde stationnaires Synthèse du contrôle Optimisation
Modèles dynamiques à états transitoires modèles physiques mathématiques (électronique de puissance)	Analyse des effets transitoires de démarrage Analyse des effets transitoires de charge Analyse du fonctionnement des défauts Analyse des harmoniques et sous-harmoniques Synthèse détaillée du contrôle Optimisation détaillée

II.2.1. Modélisation mathématique de système éolien

II.2.1.1. Modélisation de l'éolienne

Le générateur éolien, constitué d'une turbine à vitesse variable couplée directement à une génératrice synchrone à aimants permanents raccordée à un bus continu par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance MLI, est représenté en figure suivante.

La modélisation et la commande de ces différents organes vont être examinées dans ce qui suit (Figure 2.7).

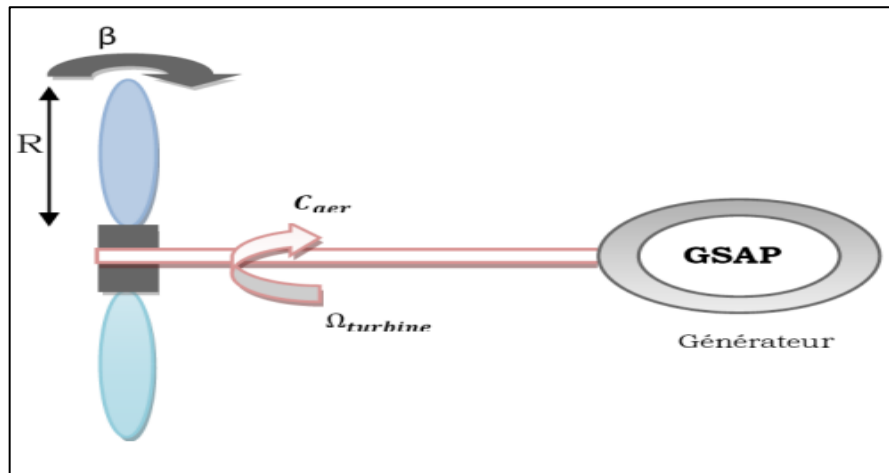


Figure 2.1 Schéma d'un système éolien sans multiplicateur.

Les variables d'entrée et sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

- La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
- Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
- La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage.

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlés en variant les quantités d'entrée précédentes.

La puissance du vent ou la puissance éolienne est définie de la manière suivante :

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

Avec :

- ρ : densité de l'air (approxima. 1,22 kg /m³ à la pression atmosphérique normale et à 15°C).
- S : surfaces circulaires balayées par la turbine [m²], (le rayon du cercle est déterminé par la longueur de la pale)
- $S = \Pi \cdot R^2$
- V : vitesse du vent.

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

$$P_t = C_p \cdot P_v = C_p (\cdot \beta) \cdot \frac{\rho \cdot S \cdot V^3}{2} \quad (\text{II.2})$$

Le coefficient de puissance C_p représente le rendement aérodynamique de la turbine éolienne. Le rapport de vitesse est défini comme le rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent,

$$\Lambda = \frac{\Omega_{turbine} \cdot R}{V_v} \quad (\text{II.3})$$

Avec :

- R : le rayon des pales de l'éolienne.
- $\Omega_{turbine}$: est la vitesse de la turbine.

Il dépend de la caractéristique de la turbine.

II.2.1.2. Modélisation de la génératrice

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatifs sont en général, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Cette non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasée – biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations).

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses simplificatrices.

- L'absence de la saturation dans le circuit magnétique.
- La distribution sinusoïdale de la force magnétomotrice (fmm), créée par les enroulements du stator.
- L'hystérésis, les courants de Foucault, l'effet de peau sont négligés.
- L'effet des encoches est négligé.
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

La structure de la machine à permanents comporte un triphasé au stator. L'excitation est créée par les aimants permanents au niveau du rotor, ces derniers sont supposés de perméabilité voisine de celle de l'air.

- **Equation électrique**

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_c \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi_a \\ \Psi_b \\ \Psi_c \end{bmatrix} \quad (\text{II.4})$$

$[v_a \ v_b \ v_c]^T$: Vecteur tension de phases statorique. $ia \ ib \ ic$ T : Vecteur courant de phases statorique

$[\psi_a \ \psi_b \ \psi_c]^T$: Vecteur des flux totaux traversent les bobines statorique.

R_s : La résistance des phases statorique.

- **Modèle de la GSAP dans le repère de Park**

Le modèle de la GSAP est défini par les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques suivantes :

- **Equations électriques**

$$V_{sd} = -R_s I_{sd} - L_{sd} \frac{dI_{sd}}{dt} + \omega_r \cdot L_{sq} \cdot I_{sq} \quad (\text{II.5})$$

$$V_{sq} = -R_s I_{sq} - L_{sq} \frac{dI_{sq}}{dt} - \omega_r \cdot L_{sd} \cdot I_{sd} + \omega_r \cdot \psi_f \quad (\text{II.6})$$

- **Equations magnétiques**

$$\psi_{sd} = L_{sd} \cdot I_{sd} + \psi_f \quad (\text{II.7})$$

$$\psi_{sq} = L_{sq} \cdot I_{sq} \quad (\text{II.8})$$

- **Modèle de la génératrice synchrone**

La génératrice alimente une charge R-L, et avec :

$$V_{sd} = R_{ch} I_{sd} + L_{ch} \frac{dI_{sd}}{dt} - \omega_r \cdot L_{ch} \cdot I_{sq} \quad (\text{II.9})$$

$$V_{sq} = R_{ch} I_{sq} + L_{ch} \frac{dI_{sq}}{dt} + \omega_r \cdot L_{ch} \cdot I_{sd} \quad (\text{II.10})$$

- **Expression du couple électromagnétique**

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la relation suivante :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_{sq} - L_{sd}) \cdot I_{sd} \cdot I_{sq} + I_{sq} \cdot \psi_f] \quad (\text{II.11})$$

- **Equations mécaniques**

L'équation de la dynamique de la GSAP est donnée comme suit :

$$Cm = Cem - f\Omega = J \cdot \frac{d\Omega}{dt} \quad (\text{II.12})$$

Cm : Couple moteur.

f : Coefficient des frottements visqueux.

$f\Omega$: Couple de frottements visqueux.

J : Moment d'inertie de la machine.

II.28.1.3. Modélisation du redresseur

La (Figure 2.8) indique le montage d'un pont redresseur triphasé double alternance, les diodes D_i et D_i' sont supposées parfaites.

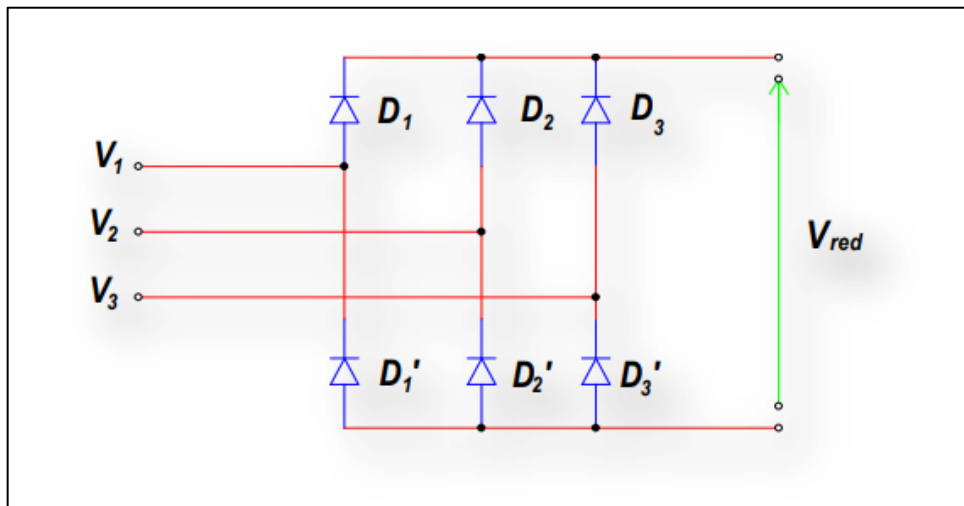


Figure 2.2 Redresseur à six diode.

La tension de sortie du redresseur sera définie comme suit :

$$V_{red} = \max V_j - \min V_j \quad (\text{II.13})$$

II.4.1.4. Modélisation de l'onduleur

Le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

$$U_r \geq U_p \Rightarrow S t = 1 \text{ si nom } S t = 0 \quad (\text{II.14})$$

Avec :

U_r : Tension référence, U_p tension porteuse,

$S(t)$: le signal MLI résultant.

Si la référence est sinusoïdale, on utilise deux paramètres caractérisant la MLI :

- L'indice de modulation 'm' qui est l'image du rapport de fréquences de la porteuse f_p sur la référence f_{ref} .

$$m = \frac{f_p}{f_{ref}} = \frac{T_{ref}}{T_p} \quad (\text{II.15})$$

- Le taux de la modulation (le coefficient de réglage en tension) 'r' qui est l'image du rapport des amplitudes de tension de la référence V_{mref} sur la porteuse V_{mp} .

$$r = \frac{V_{mref}}{V_{mp}} \quad (\text{II.16})$$

II.3. Exigences de raccordement au réseau

La connexion de la production d'énergie éolienne aux systèmes électriques a une influence sur le point de fonctionnement du système, le flux de puissance réelle et réactive, les tensions nodales (Les tensions nodales font référence aux tensions électriques présentes aux différents nœuds d'un réseau électrique. Un nœud est un point de connexion où plusieurs composants électriques se rejoignent. Chaque nœud du réseau a une tension spécifique associée à lui.) et les pertes de puissance. En même temps, la production d'énergie éolienne a différentes caractéristiques avec un large spectre d'influence qui sont énumérées ci-dessous [20]:

- Emplacement dans le système électrique ;
- Variation de tension d'amplitude et de fréquence ;
- Scintillement ;
- Harmoniques ;
- Courants de court-circuit et systèmes de protection ;
- Stabilité ;
- Auto-excitation des générateurs asynchrones ;
- Pertes de puissance réelle ;

L'impact croissant de la production d'énergie éolienne dans les systèmes électriques amène les opérateurs de systèmes à étendre les exigences de connexion au réseau afin d'assurer son bon fonctionnement. Nous pouvons diviser les exigences de connexion au réseau en deux catégories:

1. Exigences générales de code réseau ;

La première catégorie représente des exigences valables pour chaque générateur dans le réseau. Il s'agit d'exigences générales concernant le point de fonctionnement du système. Certaines des exigences de code réseau les plus importantes sont:

- Variation de tension à l'état stationnaire ;
- Capacité de ligne ;
- Puissance de court-circuit au point de connexion ;
- Variations de fréquence ;
- Protection ;
- Contingence ;

2. Exigences spéciales pour la production d'énergie éolienne ;

Les exigences spéciales pour la production d'énergie éolienne ont été introduites pour insérer la production d'énergie éolienne dans le système électrique sans impact sur la qualité de l'énergie ou la stabilité du système.

Il existe deux types différents d'exigences: les exigences établies par les opérateurs de systèmes et les normes nationales ou internationales.

Le contrôle de la puissance réactive au niveau des générateurs est utilisé pour maintenir la tension dans les limites requises et éviter les problèmes de stabilité de tension. La production d'énergie éolienne doit également contribuer à la régulation de la tension dans le système, les exigences concernant soit une plage de tension spécifique qui doit être maintenue au point de connexion, soit une certaine compensation de puissance réactive qui doit être fournie.

Jusqu'à présent, en cas de court-circuit ou d'instabilité du réseau, les parcs éoliens se déconnectaient immédiatement du système électrique. En raison de la forte pénétration de la production d'énergie éolienne, les opérateurs de systèmes observent un certain risque pour la stabilité du système lors de grandes déconnexions. Par conséquent, les nouvelles réglementations exigent que les parcs éoliens restent connectés pendant une panne de tension de ligne et participent à la reprise après la panne.

Les normes nationales et internationales s'appliquent à la production d'énergie éolienne en ce qui concerne les problèmes de qualité de l'énergie pour l'émission de perturbations dans le système électrique par les générateurs éoliens.

II.5. Conclusion

Afin de comprendre comment fonctionne le système d'irrigation, nous avons détaillé dans cette section les modèles mathématiques pour chaque partie du système

Chapitre III

Simulation de système éolien

III.1.Introduction

La simulation d'une centrale éolienne connectée au réseau est essentielle pour étudier, analyser et optimiser ses performances et son intégration au réseau électrique. Les modèles de simulation représentent les éoliennes, leurs caractéristiques physiques et électriques, ainsi que les stratégies de contrôle. Les simulations permettent d'évaluer le comportement de la centrale dans différentes conditions de fonctionnement, en prenant en compte les variations de vitesse et de direction du vent. Elles aident également à étudier l'impact sur le réseau, notamment les perturbations et les problèmes de qualité de l'énergie. Des logiciels spécifiques comme MATLAB et Greenius sont utilisés pour développer ces simulations. Les avantages de la simulation incluent des tests moins coûteux et plus rapides que les tests sur le terrain, l'optimisation de la disposition des éoliennes et des algorithmes de contrôle, et la compréhension des interactions complexes entre les éoliennes, le système électrique et le réseau. En somme, la simulation est un outil précieux pour prendre des décisions éclairées et améliorer les performances des centrales éoliennes connectées au réseau.

III.2. Les méthodes de simulation de système éolienne

Différents types de simulations et les plus importants :

III.2.1. Modèles analytiques

Les modèles analytiques sont des outils mathématiques qui permettent de décrire le comportement d'un système physique en utilisant des équations et des modèles mathématiques. Dans le cas de l'énergie éolienne, les modèles analytiques sont utilisés pour décrire le comportement des éoliennes, leur performance et leur production d'énergie.

Les modèles analytiques d'éoliennes peuvent être divisés en deux catégories : les modèles simplifiés et les modèles détaillés. Les modèles simplifiés sont des modèles mathématiques qui approximent le comportement de l'éolienne en utilisant des équations simples et des hypothèses simplificatrices. Les modèles détaillés, en revanche, utilisent des équations plus complexes et prennent en compte les détails de la structure de l'éolienne et les phénomènes physiques qui influencent son fonctionnement.

Les modèles analytiques d'éoliennes simplifiés peuvent inclure des équations pour calculer la puissance produite par l'éolienne, la vitesse du vent à la sortie de l'éolienne, la trajectoire des pales de l'éolienne et la charge sur la tour de l'éolienne. Ces modèles peuvent être utilisés pour prédire la performance de l'éolienne dans des conditions spécifiques de vent et pour optimiser la conception de l'éolienne.

Les modèles analytiques d'éoliennes détaillés, en revanche, peuvent inclure des équations pour prendre en compte les phénomènes physiques tels que les effets de la turbulence, la vitesse variable du vent, la traînée et la portance des pales, la résistance de l'air, la rigidité de la tour et les interactions entre l'éolienne et le réseau électrique. Ces modèles sont plus complexes que les modèles simplifiés, mais ils peuvent fournir des résultats plus précis et plus détaillés.

En fin de compte, le choix d'un modèle analytique dépendra des objectifs de l'analyse et de la complexité du système étudié. Les modèles simplifiés peuvent être utiles pour une analyse rapide de la performance de l'éolienne dans des conditions de vent spécifiques, tandis que les modèles détaillés peuvent être nécessaires pour une analyse plus approfondie de la dynamique de l'éolienne et de son interaction avec le réseau électrique.

III.2.2. Modèles empiriques

Les modèles empiriques sont des modèles statistiques qui sont construits en utilisant des données réelles. Ces modèles sont utilisés pour prédire la performance de l'éolienne en se basant sur des données historiques ou actuelles. Les modèles empiriques d'éoliennes peuvent être utilisés pour prédire la production d'énergie de l'éolienne, la vitesse du vent à la sortie de l'éolienne, la trajectoire des pales de l'éolienne et la charge sur la tour de l'éolienne.

Les modèles empiriques d'éoliennes sont construits en utilisant des données de vent mesurées à proximité de l'éolienne ou des données de production d'énergie de l'éolienne elle-même. Ces données peuvent être collectées à partir d'une station météorologique ou d'un anémomètre installé à proximité de l'éolienne. Les données peuvent également être collectées directement à partir de l'éolienne elle-même, en utilisant des capteurs et des systèmes de mesure.

Les modèles empiriques d'éoliennes sont souvent basés sur des modèles de régression qui relient les variables de sortie de l'éolienne (comme la production d'énergie) aux variables d'entrée (comme la vitesse du vent et la température). Ces modèles peuvent être utilisés pour prédire la performance de l'éolienne dans des conditions de vent spécifiques.

Cependant, il est important de noter que les modèles empiriques d'éoliennes ne prennent souvent pas en compte les phénomènes physiques qui influencent le comportement de l'éolienne. Ils ne sont donc pas aussi précis que les modèles analytiques détaillés. De plus, les modèles empiriques sont souvent construits à partir de données historiques et peuvent ne pas être applicables dans des conditions de vent qui diffèrent significativement des données historiques.

En fin de compte, le choix d'un modèle empirique dépendra des objectifs de l'analyse et de la disponibilité des données. Les modèles empiriques peuvent être utiles pour prédire la

production d'énergie de l'éolienne dans des conditions spécifiques de vent, mais ils ne remplacent pas une analyse approfondie de la dynamique de l'éolienne à l'aide de modèles analytiques détaillés.

III.2.3. Modèles numériques

Les modèles numériques d'éoliennes sont des modèles informatiques qui utilisent des techniques de simulation numérique pour modéliser la dynamique de l'éolienne. Ces modèles sont basés sur des équations de la physique qui décrivent le comportement de l'éolienne, telles que les équations de Navier-Stokes pour la simulation de l'écoulement du vent, ou les équations de la dynamique des corps rigides pour la modélisation du mouvement des pales de l'éolienne. Les modèles numériques d'éoliennes peuvent être utilisés pour prédire la performance de l'éolienne dans des conditions spécifiques de vent, ainsi que pour évaluer les performances de différentes configurations d'éoliennes. Ces modèles peuvent également être utilisés pour concevoir des éoliennes plus efficaces en optimisant les paramètres de conception tels que la forme et la taille des pales, la hauteur de la tour et la disposition des éoliennes dans un parc éolien.

Les modèles numériques d'éoliennes peuvent être réalisés à différentes échelles, allant des modèles de pales individuelles aux modèles de parcs éoliens entiers. Les modèles de pales individuelles sont souvent utilisés pour simuler la dynamique des pales et pour optimiser leur conception, tandis que les modèles de parcs éoliens entiers sont utilisés pour évaluer la performance d'un parc éolien entier dans des conditions de vent variables.

Cependant, les modèles numériques d'éoliennes sont souvent complexes et nécessitent des ressources informatiques importantes. Ils nécessitent également des données précises sur les conditions de vent et la topographie environnante pour fournir des résultats précis. En outre, la validation des résultats des modèles numériques d'éoliennes est essentielle pour garantir leur précision.

En résumé, les modèles numériques d'éoliennes sont des outils puissants pour la conception et l'optimisation des éoliennes, ainsi que pour la prédiction de leur performance dans des conditions de vent variables. Cependant, leur complexité et leurs exigences en matière de ressources informatiques nécessitent une expertise et des ressources considérables pour leur développement et leur utilisation efficaces.

III.2.4. Modèles hybrides

Les modèles hybrides d'éoliennes sont des modèles qui combinent les approches analytiques, empiriques et numériques pour modéliser la dynamique de l'éolienne. Ces modèles sont conçus

pour tirer parti des avantages de chaque approche et pour compenser les faiblesses des autres approches.

Par exemple, un modèle hybride d'éolienne peut utiliser une approche analytique pour modéliser les propriétés aérodynamiques des pales de l'éolienne, une approche empirique pour modéliser la réponse de l'éolienne aux conditions de vent variables, et une approche numérique pour modéliser l'écoulement du vent autour de l'éolienne et son impact sur les performances de l'éolienne.

Les modèles hybrides d'éoliennes peuvent être utilisés pour prédire la performance de l'éolienne dans une grande variété de conditions de vent, ainsi que pour évaluer les performances de différentes configurations d'éoliennes. Ils peuvent également être utilisés pour concevoir des éoliennes plus efficaces en optimisant les paramètres de conception tels que la forme et la taille des pales, la hauteur de la tour et la disposition des éoliennes dans un parc éolien.

Cependant, les modèles hybrides d'éoliennes peuvent être plus complexes que les approches individuelles et nécessitent une expertise considérable pour leur développement et leur utilisation efficaces. En outre, la validation des résultats des modèles hybrides d'éoliennes est essentielle pour garantir leur précision.

En résumé, les modèles hybrides d'éoliennes sont des outils puissants pour la conception et l'optimisation des éoliennes, ainsi que pour la prédiction de leur performance dans des conditions de vent variables. Cependant, leur complexité et leurs exigences en matière de ressources informatiques nécessitent une expertise et des ressources considérables pour leur développement et leur utilisation efficaces.

III.2.5. Simulation matérielle dans la boucle (HIL)

La simulation matérielle dans la boucle (Hardware-in-the-Loop ou HIL en anglais) est une technique qui permet de tester un système électronique ou électromécanique en temps réel en utilisant un simulateur pour représenter l'environnement dans lequel le système fonctionnera. Cette technique est largement utilisée dans l'industrie pour tester des systèmes tels que les contrôleurs de moteurs électriques, les avions, les voitures, les éoliennes, etc.

Dans le cas des éoliennes, la simulation HIL est utilisée pour tester les contrôleurs de l'éolienne en temps réel en utilisant un simulateur pour représenter les conditions de vent et de charge auxquelles l'éolienne sera soumise. La simulation HIL permet aux ingénieurs de tester le contrôleur de l'éolienne dans des conditions réelles sans avoir besoin d'une éolienne physique ou de conditions météorologiques réelles, ce qui peut être coûteux et difficile à réaliser.

Pour mettre en œuvre une simulation HIL pour une éolienne, il faut d'abord construire un simulateur qui peut reproduire les conditions de vent et de charge. Ce simulateur peut être basé sur un modèle numérique de l'éolienne et de l'environnement, et peut être exécuté sur un ordinateur ou un système embarqué. Le simulateur est alors connecté au contrôleur de l'éolienne en utilisant des interfaces de communication standard telles que des protocoles de communication Ethernet ou CAN.

Une fois que le simulateur est connecté au contrôleur de l'éolienne, les ingénieurs peuvent tester le contrôleur en temps réel en utilisant des signaux de commande générés par le simulateur et en mesurant les signaux de retour du contrôleur. Les résultats de la simulation HIL peuvent ensuite être utilisés pour optimiser le contrôleur de l'éolienne ou pour tester différents scénarios de fonctionnement.

En résumé, la simulation matérielle dans la boucle est une technique utile pour tester les contrôleurs de l'éolienne en temps réel en utilisant un simulateur pour représenter les conditions de vent et de charge. Cette technique permet aux ingénieurs de tester les contrôleurs dans des conditions réelles sans avoir besoin d'une éolienne physique ou de conditions météorologiques réelles, ce qui peut être coûteux et difficile à réaliser.

III.3. Définition de MATLAB

MATLAB est un environnement de programmation et de calcul numérique développé par MathWorks. Il offre une interface conviviale pour résoudre des problèmes mathématiques complexes, effectuer des analyses de données, des simulations et des visualisations. MATLAB est connu pour sa manipulation efficace des matrices et offre une vaste bibliothèque de fonctions mathématiques, de calcul numérique, de traitement du signal et de l'image. Il permet également de programmer en utilisant son propre langage de script et propose des interfaces pour communiquer avec d'autres langages de programmation. En résumé, MATLAB est un outil polyvalent pour l'analyse et la résolution de problèmes mathématiques et scientifiques.

Des études récentes impliquent à la fois des modèles de simulation et des données expérimentales [21]. [22] examinent le potentiel de l'énergie éolienne urbaine et divers problèmes liés à la technologie éolienne.[23] divulguent le potentiel, le développement et les limites de la technologie VAWT pour les applications urbaines et soulignent l'importance d'études supplémentaires pour son amélioration. L'article de synthèse de [24] souligne l'importance d'informations précises, de techniques, de méthodologies et de défis concernant l'évaluation des ressources éoliennes [25]. décrit les techniques d'augmentation actuelles basées sur divers systèmes d'augmentation de débit et discute des stratégies utilisées pour augmenter

la vitesse au vent sur la turbine. Cet article présente un examen global du parc éolien urbain, de son potentiel et de ses défis. Il se concentre sur les progrès récents de l'utilisation des ressources éoliennes et de la technologie des turbines des parcs éoliens urbains. L'état actuel de l'application commerciale et les caractéristiques économiques des micro-parcs éoliens sont également décrits ainsi que les conséquences environnementales. Les données requises ont été obtenues à partir de divers travaux de recherche publiés, de rapports de projets gouvernementaux et non gouvernementaux et de documents de fabrication. L'observation et la discussion des orientations futures de la recherche sont également incluses. Il a été souligné que, bien que le parc éolien domestique ait d'énormes perspectives, sa production ne peut jamais être égale à celle des parcs éoliens commerciaux terrestres ou offshore en raison de la nature imprévisible du vent urbain. Au lieu de cela, les parcs éoliens urbains peuvent être une option supplémentaire pour augmenter la quantité d'énergie électrique produite dans cette région. Par conséquent, pour utiliser l'énergie éolienne urbaine à fort potentiel pour la production d'électricité décentralisée, une étude plus approfondie de l'infrastructure de cartographie du vent et de la technologie de turbine appropriée est nécessaire.

III.4. Définition de Greenius

Afin de fournir des algorithmes de calcul de performance avec une résolution horaire pour les centrales solaires à concentration, l'outil de simulation greenius a été développé à l'Institut de recherche solaire. Il permet des prévisions rapides et faciles du rendement électrique et est particulièrement utile dans les phases initiales des projets et pour les études de faisabilité. Le logiciel met principalement l'accent sur les centrales solaires thermiques, mais des modèles pour des simulations détaillées de plusieurs autres technologies d'énergie renouvelable ont été ajoutés au logiciel ces dernières années. Cela inclut des collecteurs solaires non concentrés pour la fourniture de chaleur industrielle, des installations photovoltaïques et des parcs éoliens.

Depuis 2013, greenius est disponible gratuitement grâce au financement du ministère fédéral de l'Économie et de l'Énergie dans le cadre du projet FreeGreenius. Grâce à son interface utilisateur graphique intuitive et aux composants standard fournis avec des valeurs spécifiques typiques, le logiciel présente une courbe d'apprentissage relativement plate. En plus de la simulation technique des centrales électriques, une section économique est également incluse dans le logiciel. Des indicateurs clés typiques tels que la valeur en capital ou le temps d'amortissement font partie de chaque simulation de projet. Le logiciel est continuellement enrichi de nouvelles technologies et fonctionnalités.

III.6. Description de systèmes éolien

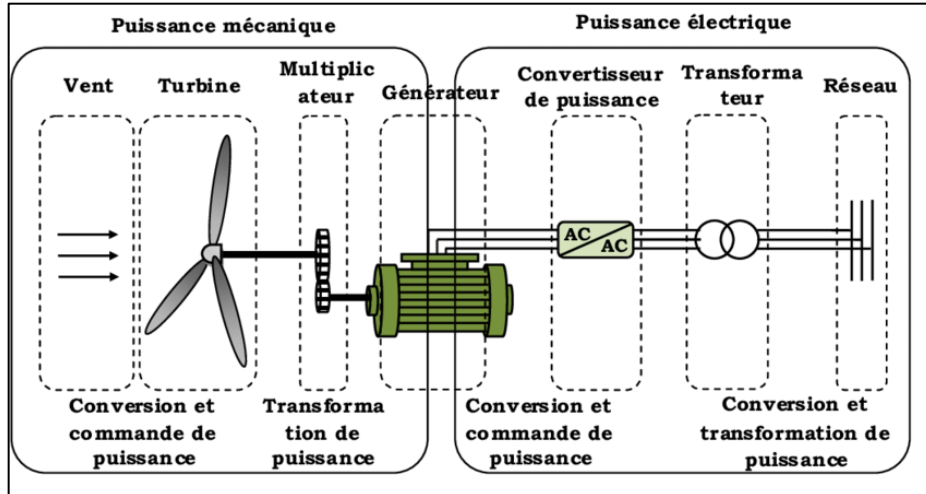


Figure 3.1 Description de systèmes éolien [28]

L'éolienne Enercon E-30 est un modèle d'éolienne fabriqué par la société allemande Enercon GmbH, spécialisée dans la production d'éoliennes. Toutes les informations de cette éolien est détaillé au tableau 2.4 et l'annexe A

Tableau 3.1 Données Générales de l'éolienne Enercon E-30

Données Générales	
Constructeur	Enercon (Allemagne)
Nom de l'aérogénérateur	E30/200
Puissance nominale	200 kw
Diamètre de rotor	30 m
Surface balayée	707 m ²
Surface spécifique	3.54 m ² /kW
Nombre de pales	3
Limitation de puissance	Pitch
Mise en service	1994

Générateur

- Type : SYNC Wounded ;
- Nombre : 1 ;
- Vitesse maximale de rotation : 48 tours/minute ;
- Tension de sortie : 440 V ;
- Fabricant : Enercon ;

Tour

- Hauteur minimale de la nacelle : 36 m ;
- Hauteur maximale de la nacelle : 50 m ;

III.7. Résultats de simulation

III.7.1 Simulation par Greenius

Pour les simulations, les valeurs horaires moyennes de la vitesse du vent à partir de l'ensemble de données météorologiques sont utilisées. Étant donné que la puissance des éoliennes ne dépend pas linéairement de la vitesse du vent, cela sous-estime systématiquement la puissance de sortie. Le facteur de modèle d'énergie k_E essaie de compenser cela. Il est défini comme suit

$$K_E = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3}{\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i\right)^3} = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i^3}{v^3} \geq 1 \quad (\text{III.1})$$

Greenius utilise la fonction empirique suivante pour le facteur de profil énergétique :

$$K_E = 1 + f_1 \cdot v^{f_2} \quad (\text{III.2})$$

Les paramètres f_1 et f_2 peuvent être définis. Sans autre information, il est fortement recommandé de ne pas modifier ces paramètres. À des vitesses de vent plus élevées, la vitesse du vent reste plus constante, de sorte que seules de légères variations par rapport à la valeur moyenne peuvent être attendues. Si f_1 est réglé sur zéro, le facteur de modèle d'énergie n'a aucune influence.

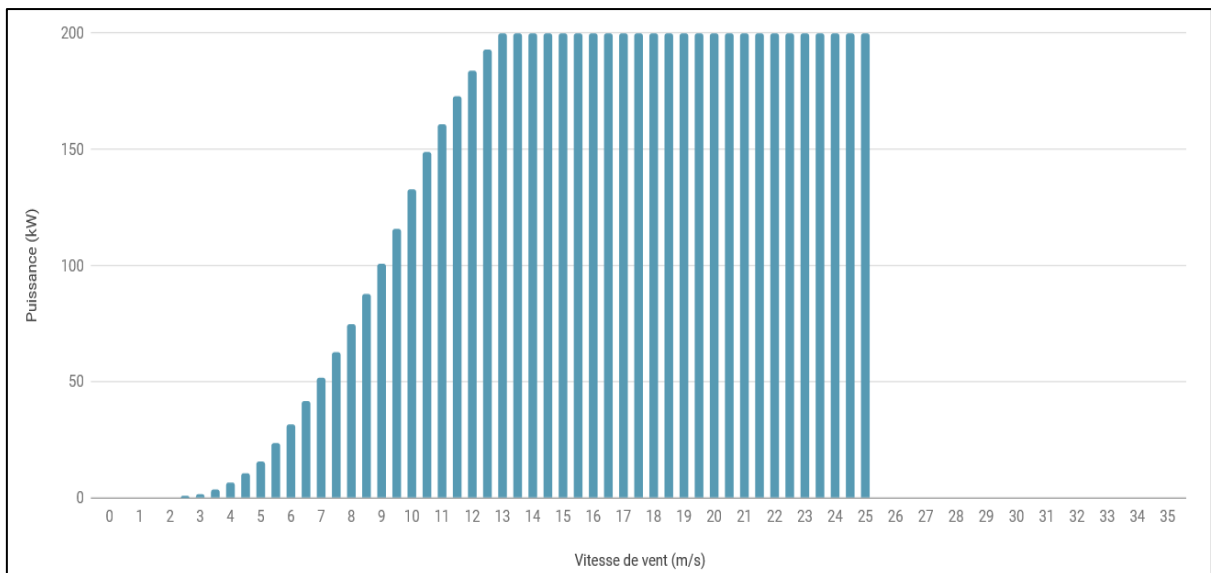


Figure 3.2 Courbe de puissance de ENERCON E30 200 kw

Après avoir obtenu les données météorologiques nécessaires, nous insérons le fichier Tm2 dans le programme Greenius. On obtient les résultats suivants (Figure 3.5) :

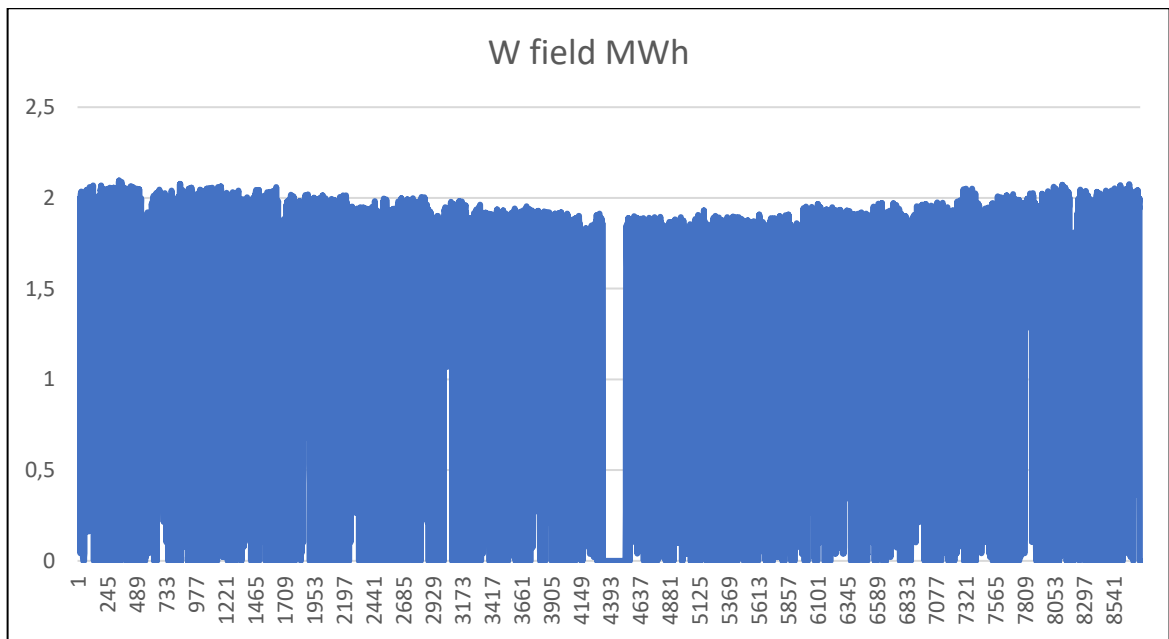


Figure 3.3 Puissance de sortie horaire pendant une année

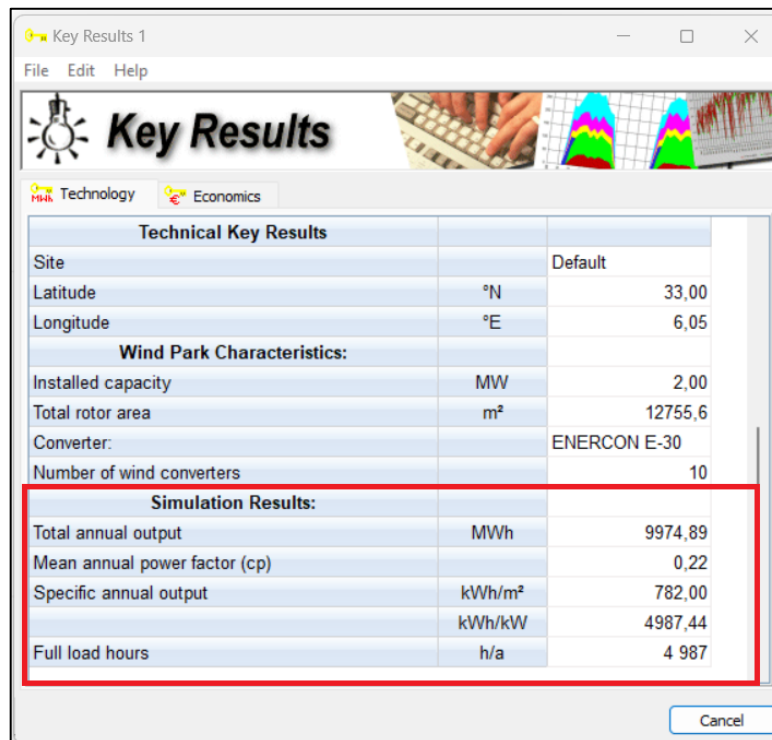


Figure 3.4 Interface des résultats techniques de simulation

D'après le résultat de simulation (Figure 3.6) du logiciel Greenius, la production nette d'électricité de centrale au site Temacine est 9974.89 MWh/a. Le nombre d'heures pendant lesquels la centrale produit de l'électricité est de 4987 heures/an.

D'après (Figure 3.3 et 3.4), nous pouvons voir que les résultats des simulations concordent. A travers lequel on remarque la quantité de production horaire estimée à 1.14 mégawattheures en moyenne.

III.7.2. Simulation par Matlab

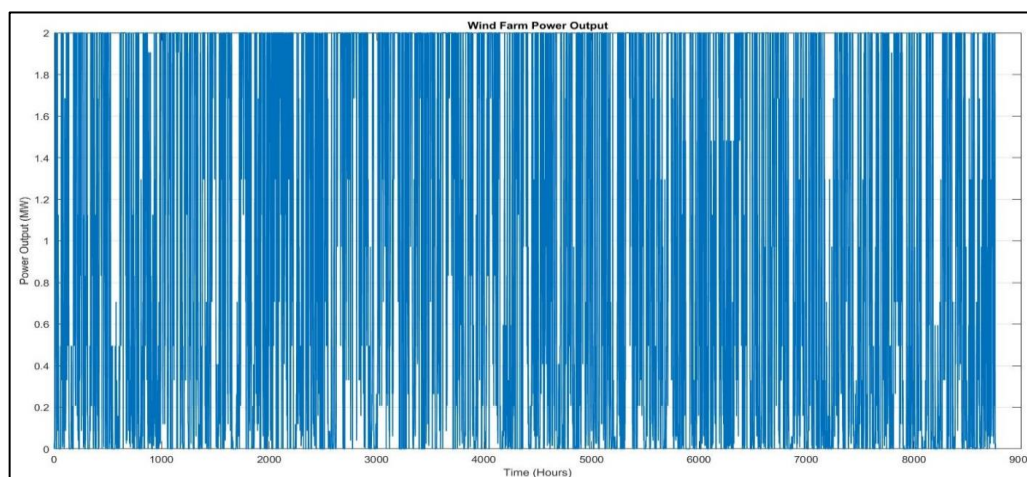


Figure 3.5 Puissance de sortie horaire – MATLAB

Des simulations ont été réalisées pendant 8760 heures. Grâce à ce champ d'éoliennes, une moyenne de 1,14 mégawatts est produite chaque heure. Les résultats de simulation obtenue par le logiciels MATLAB montre que compatibles avec l'objectif de ce travail.

À travers les résultats précédents. On remarque que le logiciel MATLAB est plus précis que Greenuis.

La raison de l'écart entre les deux logiciels (Greenuis et Matlab) est que :

- Le programme MATALAB s'appuyait sur les vitesses de l'air saisies lors de la mise en œuvre du processus de simulation. Sans tenir compte d'autres facteurs.
- Programme Greenis. Un programme préparé pour extraire toutes les données nécessaires au processus de simulation à partir du document TM2 de données aéronautiques. Parmi ces données (pression atmosphérique, densité de l'air, facteur de puissance, facteur de modèle d'énergie...etc)
- Les modèles mathématiques est différente entre les deux logiciels

III.7.3. Coût d'investissement

Les coûts de production de l'énergie éolienne varient considérablement en fonction de plusieurs facteurs, notamment la taille du projet, l'emplacement du projet, le type de turbines utilisées, les coûts de construction et d'installation, ainsi que les coûts d'exploitation et d'entretien (Tableau 3.2).

Tableau 3.2 Paramètres économiques de système éolien

Calculacion de LEC	Valeur
Coûts d'électricité modéré (LEC)	0,0256 €/kWh
Coûts d'investissement total (IC)	2 292 150 €

Echéance d'IC	0,0782
Valeur actualisée nette des coûts de fonctionnement (CO) €	971 535 €
Rente d'OC	0,0782

Le coût total de l'investissement est estimé à 2.3 millions euros. Le coût de production d'un kilowatt est de 0,0256 euros.

Grâce à la station éolienne, 9974,89 mégawattheures sont générés. Soit 9974.89 mégawattheures. À partir de là, nous calculons le coût total de production :

$$C_t = 9974890 \text{ kwh} \times 0,0256 \text{ €} = 255357.24 \text{ €}$$

III.7.4. Revenus d'investissement

Par le biais du Journal officiel national [24]. Le prix d'achat du kilowattheure a été répertorié par le ministère de l'Énergie et des Mines. Dans la première phase du contrat, qui est estimée à cinq ans. Le prix d'achat a été fixé à 13,10 DZD, soit 0,089 EUR

Et dans la deuxième étape, qui est le nombre d'années restantes du contrat. Le prix d'achat a été fixé à 9,55 DZD, équivalent à 0,064 EUR, pour le nombre d'heures de fonctionnement dépassant 2185 heures (Tableau 3.3) .

On note que le *taux de change était basé sur le site Web de xe.com le 23/05/2023 à 23h28.*

Tableau 3.3 Journal officiel national n° 23 publié le 23 avril 2014

Limite Reglementaire D'ajustement	Nombre D'heures De Fonctionnement (Kwh / Kw / An	TARIF D'achat GARANTI(DA/Kwh)	
		PHASE I	PHASE II
- 15 %	1615 - 1674	13,10	16,66
	1675 - 1749		15,86
	1750 - 1824		15,01
	1825 - 1899		14,09
Potentiel de référence	1900 - 1974		13,10
+ 15 %	1975 - 2049		12,11
	2050 - 2124		11,19
	2125 - 2184		10,34
	≥ 2185		9,55

A la base de ces données, nous pouvons calculer le retour sur investissement comme suit :

Le retour sur investissement (ROI) est un indicateur financier utilisé pour évaluer la rentabilité d'un investissement ou d'une dépense. Il mesure le rendement ou le gain financier réalisé par rapport au coût initial de l'investissement. Le ROI est généralement exprimé en pourcentage ou en ratio.

PHASE I

$$\text{Retour}_{\text{Annuel}} = 9974890 \text{ kwh} \times 0,089\text{€} = 887765.21\text{€}$$

PHASE II

$$\text{Retour}_{\text{Annuel}} = 9974890 \text{ kwh} \times 0,064\text{€} = 638392.96\text{€}$$

Intérêt D'investissement

L'intérêt d'investissement est un facteur essentiel pris en compte par les investisseurs lors de l'évaluation des opportunités d'investissement. Il leur permet de comparer différentes options d'investissement, d'évaluer le risque associé à un investissement et de prendre des décisions éclairées pour maximiser leur rendement financier.

$$\text{Intérêt}_{\text{annuel}} = \text{Retour}_{\text{Annuel}} - C_t$$

PHASE I

$$\text{Intérêt}_{\text{annuel}} = 887765.21\text{€} - 255357.24 \text{ €} = 632407.97\text{€}$$

PHASE II

$$\text{Intérêt}_{\text{annuel}} = 638392.96\text{€} - 255357.24 \text{ €} = 383035.72\text{€}$$

Tous les facteurs sont supposés constants pour faciliter le calcul.

Sur la base des résultats précédents du calcul des bénéfices, nous avons constaté que la station engrange des bénéfices théoriques estimés à 632407,97 EUR (9.3 million DZD).

Ces bénéfices sont des bénéfices théoriques hors frais et taxes. Cependant, il est considéré comme de bons bénéfices en plus du gain principal, qui est la centrale éolienne, qui est une source d'énergie renouvelable. Ce qui nous garantira également des bénéfices renouvelés.

III.8. Conclusion

En conclusion, cette étude met en évidence l'importance de l'investissement dans l'énergie renouvelable dans les zones désertiques comme moyen de répondre à la demande croissante en électricité et de promouvoir la durabilité environnementale. Nous avons présenté une analyse complète du projet de champ de production d'énergie éolienne dans cette région, les résultats démontré des aspects positifs. Avec un coût total de 0.23 million euro, le projet peut générer un bénéfice annuel de 632407,97 euros. Grâce à sa production annuelle de 99.7489 gigawatts, une quantité importante d'énergie propre, durable et gratuit est fournie pour être utilisée dans le réseau électrique local.

Enfin, nous espérons que cette recherche sera une contribution précieuse à la compréhension de l'importance de l'investissement dans l'énergie renouvelable et le développement de projets durables pour répondre à nos besoins énergétiques croissants de manière écologique et économique.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif de ce travail est d'apporter une contribution à l'étude de la simulation d'éoliennes en zone désertique, en incluant également l'aspect du rendement économique. Cette approche vise à comprendre non seulement les aspects environnementaux et sociaux, mais aussi l'impact financier et économique de la présence d'éoliennes dans ces régions arides.

La simulation permet d'évaluer le potentiel de production d'énergie des éoliennes dans la zone désertique, en prenant en compte les conditions de vent, les modèles météorologiques et le profil énergétique de la région. Grâce à cette analyse approfondie, il est possible de déterminer la viabilité économique du projet, en évaluant les coûts d'installation, les revenus générés par la production d'électricité, les économies d'énergie et les potentiels retours sur investissement.

En optimisant l'emplacement des éoliennes et en tenant compte des aspects économiques, il est possible de maximiser le rendement économique du projet. Cela comprend la réduction des coûts de construction et de maintenance, l'optimisation de la production d'électricité et la rentabilité à long terme.

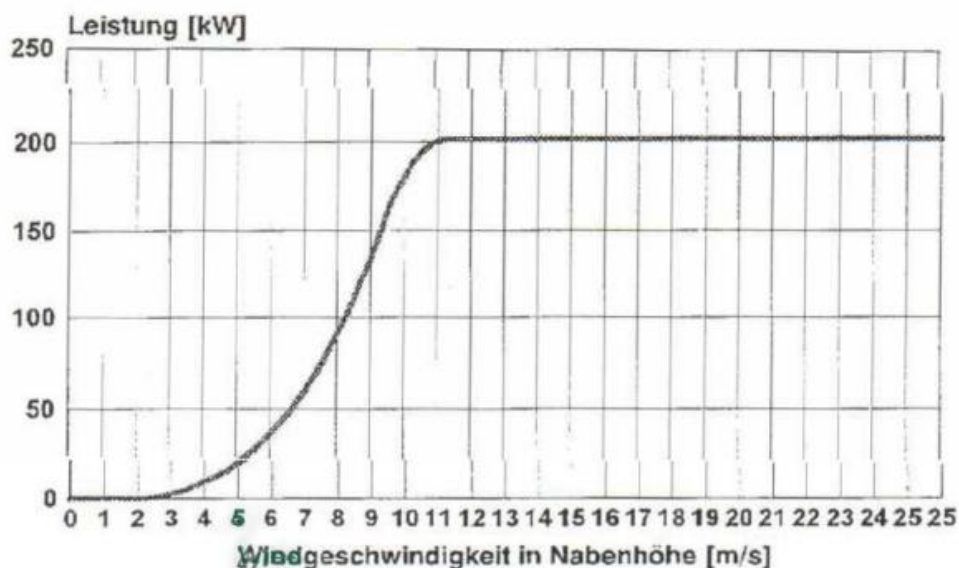
En résumé, la simulation d'éoliennes en zone désertique apporte une contribution essentielle à l'étude en intégrant l'évaluation du rendement économique. Cette approche permet d'optimiser les aspects environnementaux, sociaux et économiques du projet, assurant ainsi une utilisation efficace des ressources et une transition vers une énergie renouvelable plus durable sur le plan financier.

Annexe

Fiche Technique Enercon E30



ENERCON-30



Typ ENERCON-30
Hersteller ENERCON
Gesellschaft für Energieanlagen mbH & Co.
Nennleistung 200 kW
Leistung (10 m/s) 178 kW
Rotordurchmesser 30 m
Nabenhöhe: 50 m

Rotor mit Blattverstellung	
Typ	Luvläufer mit aktiver Blattverstellung
Drehrichtung	Uhrzeigersinn
Blattanzahl	3
Blattlänge	13,8 m
Rotorfläche	707 m ²
Profil	ENERCON
Hersteller	ENERCON
Blattmaterial	GFK / Epoxydharz, mit integriertem Blitzschutz
Drehzahl	variabel, 14-43 U min ⁻¹
Rotorachs-winkel	3°
Konnewinkel	0°
Blattverstellung	Je Rotorblatt ein autarkes Stellsystem mit zugeordneter Notverstellung

Antriebsstrang mit Generator	
Nabe	Starr
Lagerung	Kegelrollengelagerte Rotorwelle
Generator	Direktgetriebene geregelte Synchronmaschine in Ringbauweise
Netzeinspeisung	geregelter Pulswechselfrichter mit Gleichspannungszwischenkreis, Nennspannung 400V
Bremssysteme	Drei autarke Blattverstellungssysteme, Rotorhaltebremse, Rotorarretierung, 30° rastend
Windnachführung	Aktiv über Stellgetriebe, Dämpfung über Reibungslager
Turm	verzinkter Stahlrohrturm, Lackierung im ENERCON-Design

Netztechnische Daten ENERCON-30

1 Netzspannungsüberwachung:

- 1.1 Überspannung: 100 % = 230 V (minimaler Einstellwert)
106 % = 245 V (normaler Einstellwert)
Schrittweite 1,5 % = 3,5 V 115 % = 265 V (maximaler Einstellwert)
- 1.2 Unterspannung: 100 % = 230 V (maximaler Einstellwert)
91 % = 210 V (normaler Einstellwert)
Schrittweite 3 % = 7 V 70 % = 160 V (minimaler Einstellwert)
- 1.3 Auslösezeiten: 0,1s (minimaler Einstellwert)
0,2s (normaler Einstellwert)
Schrittweite 0,1 s 1,0s (maximaler Einstellwert)

2 Frequenzüberwachung

- 2.1 Frequenzsteigerung: 50,0 Hz (minimaler Einstellwert)
50,4 Hz (normaler Einstellwert)
Schrittweite 0,2 Hz 52,0 Hz (maximaler Einstellwert)
- 2.2 Frequenzrückgang: 50,0 Hz (maximaler Einstellwert)
49,6 Hz (normaler Einstellwert)
Schrittweite 0,2 Hz 48,0 Hz (minimaler Einstellwert)
- 2.3 Auslösezeiten: 0,1s (minimaler Einstellwert)
0,2s (normaler Einstellwert)
Schrittweite 0,1 s 1,0s (maximaler Einstellwert)

3 Einstellwerte für $\cos \varphi$

- 3.1 Fest: z.B. 1,0 gilt über den gesamten Leistungsbereich
- 3.2 Variabel: von 0,89 cap. bis 0,89 ind. gilt über den gesamten Leistungsbereich

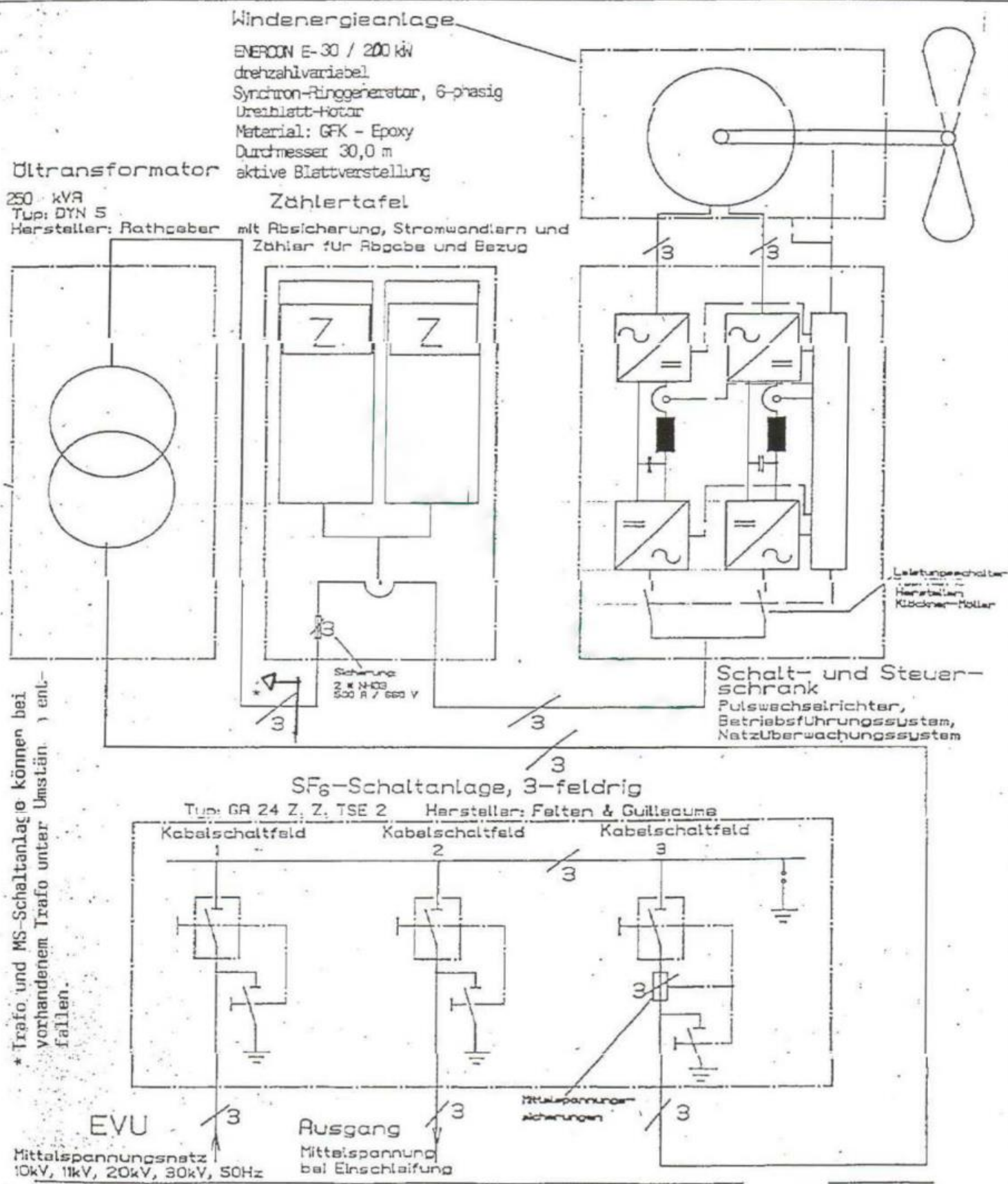
4 Einschaltstrom 1 kW = 1,6 A für maximal 10 s

5 sonstige elektrische Daten

Nennleistung: 200 kW Spitzenleistung: 200 kW /
Anschlußart: 3 x 400 V, 1 x 230 V Nennstrom: 290 A

TECHNISCHE KENNZEICHNUNG DER WINDKRAFTANLAGE

Prinzipschaltbild Pulswechselrichter



* Trafo- und MS-Schaltanlage können bei vorhandenem Trafo unter Umständen entfallen.

Datum: 11.01.94
 Datei: ISETE405

ENERCON ELEKTRIC
 26605 Aurich

E-30 Prinzip-
 schaltplan

Bibliographie

- [1] Archer, C.L., & Jacobson, M.Z. (2005). Evaluation of global wind power. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 110(D12).
- [2] International Energy Agency. (2021). Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026. Paris : IEA.
- [3] REN21. (2021). Renewables 2021 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat.
- [4] Agence Internationale de l'Energie (AIE), "Renewables 2021 Algeria", <https://www.iea.org/reports/renewables-2021/algeria>
- [5] Observatoire des Energies Renouvelables et de l'Efficacité Energétique (ADEREE), "Energie renouvelable en Algérie : Situation et perspectives", http://www.aderee.dz/IMG/pdf/etude_energie_renouvelable_en_algerie.pdf
- [6] Le Matin DZ, "Energies renouvelables : L'Algérie fixe un objectif de production de 22.000 MW", <https://www.lematindz.net/news/31489-energies-renouvelables-lalgerie-fixe-un-objectif-de-production-de-22000-mw.html>
- [7] Global Wind Energy Council (GWEC). (2021). Global Wind Report 2021. <https://gwec.net/global-wind-report-2021/>
- [8] Agence Internationale de l'Energie (AIE). (2019). Algeria 2019 Review. <https://www.iea.org/reports/algeria-2019-review>
- [9] Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie (APRUE). (2020). Appel d'offres national et international pour la réalisation de cinq (05) parcs éoliens. <http://apru.dz/appels-doffres/ao-national-et-international-pour-la-realisation-de-cinq-05-parcs-eoliens/>
- [10] Ministère de la Transition Energétique et des Energies Renouvelables (MTEER). (2020). Loi de finances 2020. <http://www.mte.gov.dz/fr/index.php/loi-de-finances-2020>
- [11] Renewable Energy Global Innovations (REGI). (2020). Renewable Energy Research & Development. <https://www.reginnovations.org/renewable-energy-research-and-development/>
- [12] American Wind Energy Association (AWEA). (2021). Wind Energy Research. <https://www.awea.org/wind-energy-research>
- [13] National Renewable Energy Laboratory (NREL). (2021). Wind Energy Research. <https://www.nrel.gov/wind/research.html>

[14] The European Wind Energy Association (EWEA). (2016). Wind Energy Technology Roadmap 2015-2030. https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/reports/Wind_Energy_Technology_Roadmap_2015_2030.pdf

[15] D.DJEMAA << Etude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l'éolienne>> Thèse Magister Université El-hadj lakhdhar – Batna, 2010

[16] F. A. FARRET, B. PALLE ET M. G. SIMOES « Full expandable model of parallel self-excited induction generators », IEE Proc-Electr, Power Appl, vol 152, No 1, January 2005.

[17] D. SEYOUM, M. F. RAHMAN ET C. GRANTHAM « Terminal voltage control of a Wind turbine driven isolated induction generator using stator oriented field Control », Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC'03), Eighteenth Annual IEEE, vol. 2, Miami Beach, 9-13 Février 2003, pp.846-852.

[18] O. GERGAUD, B. MULTON ET H. BEN AHMED « Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance », Electrotechnique du Futur, Nancy, France, 14-15 Novembre 2001, pp. 1-6.

[19] H. CAMBLONG « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable », Thèse de Doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

[20] Z. Lubosny; Wind Turbine Operation in Electric Power Systems; Springer-Verlag Berlin, ISBN 3- 540 40340-X.

[21] Wang, Q., Chang, L., Sep. 2004. An intelligent maximum power extraction algorithm for inverter-based variable speed wind turbine systems. IEEE Trans. Power Electron. 19 (5), 1242–1249. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.833459>.

[22] Ishugah, T.F., Li, Y., Wang, R.Z., Kiplagat, J.K., Sep. 01, 2014. Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: a review. Renew. Sustain. Energy Rev. vol. 37, 613–626. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.053>. Elsevier.

[23] Shah, S.R., Kumar, R., Raahemifar, K., Fung, A.S., Nov. 2018. Design, modeling and economic performance of a vertical axis wind turbine. Energy Rep. 4, 619–623. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2018.09.007>.

- [24] Murthy, K.S.R., Rahi, O.P., May 01, 2017. A comprehensive review of wind resource assessment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 72, 1320–1342. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.038>. Elsevier.
- [25] Wong, K.H., Chong, W.T., Sukiman, N.L., Poh, S.C., Shiah, Y.C., Wang, C.T., Jun. 01, 2017. Performance enhancements on vertical axis wind turbines using flow
- [26] Z. Sabrine, Optimisation par GREENIUS d'une centrale photovoltaïque dans la région de Tataouine en TUNISIE,
- [27] « Wilaya d'Ouargla : répartition de la population résidente des ménages ordinaires et collectifs, selon la commune de résidence et la dispersion » [archive]. Données du recensement général de la population et de l'habitat de 2008 sur le site de l'ONS
- [28] Zoheir Tir, Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade, Jul 2010.
- [29] Journal officiel de la republique algerienne n° 23, Correspondant au 23 avril 2014