



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Akli Mohand Oulhadj (Bouira)

Faculté des Sciences et des Sciences Appliquées
Département de Génie Mécanique

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master par
Ali Ou Tayeb SI FODIL
Et
Achour OUSDIDENE

Spécialité : Energétique

THEME

Analyse de l'hybridation des centrales électriques des réseaux isolés du sud avec des éoliennes

Les jurys composés :

| | | | |
|-------------------|----------------------|-----|-------------|
| -Mr. MESSAIT | Université de Bouira | MAA | Président. |
| -Mr. MERZOUK.M | Université de Bouira | MAA | Examineur. |
| - Mme. BAGHDADI.F | Université de Bouira | MAA | Promotrice. |

Remerciements

En préambule, nous souhaitons rendre grâce à Dieu, le clément et le miséricordieux de nous avoir donné la force et la patience de mener à bien ce modeste travail.

Nous tenons évidemment à débiter ces remerciements en témoignant de notre profonde reconnaissance envers Madame BAGHDADI fazia, avoir encadré et dirigé ce travail avec patience, ainsi que pour sa riche contribution et ses précieux conseils.

Ainsi que nous tenus a remercié monsieur HASSANE loqmane, étudiant en master 2 a université de bouira pour son soutien et son aide.

Nous remercions vivement Monsieur

Nous voulons exprimer nos remerciements aux membres de jury,

Nos remerciements s'adressent aussi, à tous ceux qui nous ont prêté main forte.

Dédicace

D'abord Je remercie **ALLAH** pour la faveur de la santé et de L'Islam et le tout puissant de m'avoir donné le courage pour accomplir ce modeste travail que

Je dédie :

A toi maman, l'être le plus cher au monde qui n'a jamais cessé de prier pour moi et pour tout ton affection et ton amour que dieu te protège inchallah.

A l'âme de mon cher père Djamel, J'espère que tu habites les paradis.

A ma sœur Hanane, pour tous ses encouragements et je souhaite toute la réussite dans leur travail. A mon cher grand-père said et A ma chère grand-mère tassadit(yama zaza) A mes oncles la Famille SIFODIL.

A mon binôme Achour, A mes chers amis Ahcen SAOUDI, Toufiq ADDAR, loqmane HASSANE, Hamimi SAADOUN, Idir DABOUZ, Rachid DJEDDA et AOUDJIT, les deux seours ZAMOUM, ahmiti et lamnouar DRICI pour tous les bons moments qu'on a passés ensemble, je vous souhaite beaucoup de réussite dans votre carrière.

A ma promotrice pour sa patience, ses conseils, sa disponibilité et pour l'excellence de son accompagnement et la confiance qu'il nous a accordé.

A mes enseignants sans aucune exception, A mes collègues promotion 2020 et à tous ceux que j'aime et qui m'aime.

II

Ali ou tayeb SI FODIL

Dédicace

D'abord Je remercie **ALLAH** pour la faveur de la santé et de L'islam et le tout puissant de m'avoir donné le courage pour accomplir ce modeste travail que

Je dédie :

A mes parents, les plus chers au monde et pour toute affection et amour que dieu les protègent inchallah.

A l'âme de mon cher grand-père, J'espère que tu habites les paradis.

A tout ma famille, pour leurs amours et pour leurs soutiens.

A mon binôme ali, A mes chers amis Ahcen SAOUDI, loqmane HASSANE, HARMALI tahar, BOUKRIF kheiredinne ,mazigh DAHI, meziane HAMADACHE pour tous les bons moments qu'on a passés ensemble, je vous souhaite beaucoup de réussite dans votre carrière.

A ma promotrice pour sa patience, ses conseils, sa disponibilité et pour l'excellence de son accompagnement et la confiance qu'il nous a accordé.

A mes enseignants sans aucune exception, A mes collègues promotion 2020 et à tous ceux que j'aime et qui m'aime.

OUSDIDENE achour

Résumé

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie.

L'énergie éolienne joue un rôle de plus en plus important dans le réseau électrique, elle ne peut plus être considérée comme une source d'énergie marginale. Par conséquent, l'impact sur le réseau de l'intermittence, inhérente à ce type d'énergie devient non négligeable. Dans ce travail on passe en revue les objectifs et les techniques utilisées dans le contrôle d'une éolienne tripales à axe horizontal basée sur une génératrice asynchrone doublement alimentée.

Nous développons le modèle mathématique en vue de la simulation et l'analyse de la génératrice. On procède au contrôle de l'inclinaison des pales de la turbine et de la génératrice pour pouvoir maîtriser les puissances active et réactive à la sortie de l'éolienne. Les exigences du fonctionnement du réseau en temps réel nous obligent à limiter les fluctuations de la puissance tout en assurant le maintien des paramètres en relation avec la variation de la vitesse du vent en Algérie.

Les résultats de simulations réalisés sur Simulink de MATLAB sont interprétés et commentés. Par ailleurs, l'implémentation numérique de la stratégie de contrôle est présentée dans le dernier chapitre, celle-ci nous a permis d'évaluer les performances de la stratégie.

Mots-clés : Énergies renouvelables, énergie éolienne, vent, machine asynchrone à double alimentation, contrôle, modèle mathématique, simulation.

Abstract

Renewable energy, allows a decentralized electrical energy production, which contributes to the solution of supplying isolated area with the necessary energy, Thus not being able to meet any need even minimal and improve their living conditions.

Wind energy is an increasingly important part in the grid, it cannot be considered as a marginal energy source. Therefore, the impact on the network and the intermittently, the inherent in this type of energy becomes significant. In this work we review the objectives and techniques used in the control of a three-bladed horizontal axis wind turbine based on a doubly fed induction generator.

We develop the mathematical model for the simulation and analysis of the generator. We control the inclination of the turbine blades and generator power to master the active and reactive power at the output of the turbine. The requirements of the operation in real-time network require us to limit power fluctuations while ensuring the parameters maintenance in relation to the variation of the wind speed in Algeria.

The results of simulations realized under MATLAB Simulink software are interpreted and discussed. Moreover, the digital control strategy implementation is presented in the last chapter, it allows us to assess the performance of the strategy.

Keywords: Renewable energies, wind power, wind speed, doubly fed induction machine, control, mathematical model, simulation.

ملخص

ان وجود مصادر الطاقة المتجددة، يسمح بإنتاج الكهرباء اللامركزية، مما يساهم في حل إمداد المنطقة المعزولة بالطاقة اللازمة، وذلك يعود لعدم القدرة على تلبية أي حاجة حتى بالحد الأدنى ولتحسين ظروفهم المعيشية

طاقة الرياح أصبحت وعلى نحو متزايد جزء مهم من الشبكة الكهربائية، بحيث لا يمكن اعتبارها مصدر هامشي من مصادر الطاقة. لذلك، فإن التأثير على الشبكة وبشكل متقطع متأصل في هذا النوع من الطاقة أصبح مهم للغاية. في هذا العمل نقوم بمراجعة الأهداف والتقنيات المستخدمة في التحكم بتوربينات الرياح ثلاثية الشفرات ذات المحور الأفقي المرتكز على مولد طاقة غير متزامن مزدوج التغذية (GADA).

لقد قمنا بتطوير النموذج الرياضي الخاص بالمولد وكافة نظام توليد الكهرباء المستخدم لغرض المحاكاة والتحليل، وتحكمنا في درجة ميل شفرات التوربين وطاقة المولد للسيطرة على الطاقة النشطة وغير النشطة الصادرة عند مخرج التوربين. ان متطلبات الشبكة الكهربائية تفرض منا الحد من تغيرات الطاقة مع الاخذ بعين الاعتبار خصوصية سرعة (تغير سرعة) الرياح في الجزائر.

يتم تفسير ومناقشة نتائج عمليات المحاكاة المنجزة من خلال برنامج "Simulink Matlab". وعلاوة على ذلك، تم تقديم و تنفيذ استراتيجية التحكم الرقمي في الفصل الأخير، وهو ما يسمح لنا باختبار و تقييم مدى نجاعة الاستراتيجية.

كلمات مفتاحية: طاقات متجددة، سرعة الرياح، رياح، مولد طاقة غير متزامن مزدوج التغذية، تحكم، نمذجة رياضية، محاكات.

Table des matières

| | |
|--|-----|
| Remerciements | I |
| Dedicace | II |
| Résumé | IV |
| Tables des matières | V |
| Listes des figures et des tableaux | VI |
| Nomenclature | VII |
| Introduction générale..... | 1 |

CHAPITRE I : Généralités sur les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

| | |
|--|----|
| 1.1. Introduction..... | 3 |
| 1.2. Définition de l'énergie renouvelable | 3 |
| 1.3. Avantage | 3 |
| 1.4. Inconvénient | 3 |
| 1.5. Différentes forme d'énergie renouvelable | 4 |
| 1.5.1. L'énergie hydraulique | 4 |
| 1.5.1.1. Avantages et Inconvénients de l'énergie hydraulique | 5 |
| 1.5.2.L'énergie éolienne | 6 |
| 1.5.2.1. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne | 7 |
| 1.5.3.L'énergie solaire | 8 |
| 1.5.3.1. Le solaire thermique | 8 |
| 1.5.3.2. Le solaire photovoltaïque | 9 |
| 1.5.3.3. Le solaire thermodynamique | 9 |
| 1.5.3.4. Avantages et inconvénients du L'énergie solaire | 10 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| 1.5.4. La géothermie | 11 |
| 1.5.4.1. Avantages et Inconvénients de l'énergie géothermique | 11 |
| 1.5.5.L'énergie biomasse | 12 |
| 1.5.5.1. Avantages et Inconvénients de la biomasse | 12 |
| 1.6. Le vent et son origine..... | 14 |
| 1.6.1. Direction et vitesse du vent | 15 |
| 1.6.2. La production électrique varie selon la vitesse du vent | 17 |
| 1.7. Définition et missions des systèmes hybrides..... | 17 |
| 1.8. Architecture des SEH..... | 18 |
| 1.9. Classification des SEH..... | 18 |
| 1.10. Dimensionnement des SEH..... | 19 |
| 1.11. Système Hybride Eolien-Diesel (SHED)..... | 20 |
| 1.11.1. Description du SHED..... | 20 |
| 1.11.2 Principaux composants d'un SHED..... | 21 |
| 1.11.2.1. Eolienne | 21 |
| 1.12. Importance de l'hybridation entre l'éolien et le diesel..... | 22 |
| 1.13. Régimes de fonctionnement d'un SHED..... | 22 |
| 1.14. Conclusion..... | 24 |

CHAPITRE II : Les Composantes du Système

| | |
|--|----|
| 2.2. Introduction | 24 |
| 2.2. Historique | 24 |
| 2.3. Architecture d'une éolienne | 26 |

Table des matières

| | |
|--|----|
| 2.3. Constitution d'une éolienne | 26 |
| 2.3.1 Rotor | 26 |
| 2.3.2.Nacelle | 26 |
| 2.3.3.Tour | 26 |
| 2.4.Fonctionnement d'une éolienne | 27 |
| 2.5.les différents types d'éoliennes..... | 28 |
| 2.5.1.Eolienne à l'axe horizontal | 28 |
| 2.5.2.Eolienne à l'axe vertical | 29 |
| 2.6. régulation mécanique de la puissance d'une éolienne | 30 |
| 2.7.Notions théoriques sur L'éolien | 32 |
| 2.7.1.Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique | 32 |
| 2.7.2. loi de Betz | 35 |
| 2.7.3. Eoliennes à vitesse fixe et variable | 36 |
| 2.7.3.1. Eolienne à vitesse fixe..... | 36 |
| 2.7.3.2. Eolienne à vitesse variable..... | 37 |
| 2.7.4. Coefficient de puissance | 38 |
| 2.7.5. Coefficient de couple | 39 |
| 2.7.6.Distribution de weibull | 39 |
| 2.8 Générateur diesel | 40 |
| 2.9 Le moteur diesel..... | 41 |
| 2.9.1 Définition..... | 41 |
| 2.10 les différents types de machines électriques utilisées..... | 41 |
| 2.10.1 Les machines synchrones..... | 41 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| 2.10.2 Les machines asynchrones..... | 42 |
| 2.10.3 Les machines à courant continu..... | 42 |
| 2.10.4 Les générateurs à réluctances variables..... | 42 |
| 2.11 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne..... | 42 |
| 2.11.1 Générateur Asynchrone..... | 42 |
| 2.11.1.1 Génératrices asynchrones à cage..... | 42 |
| 2.11.1.2 Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA)..... | 43 |
| 2.11.2 Génératrices synchrones..... | 44 |
| 2.11.2.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents..... | 44 |
| 2.11.2.2 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné..... | 45 |
| 2.12. Les Gisement éoliens en Algérie..... | 45 |
| 2.13. Données météorologiques de la région d'Adrar..... | 47 |
| 2.14. Conclusion | 47 |

CHAPITRE III : Modélisation et simulation de SHED

| | |
|--|----|
| 3.1.. Introduction | 48 |
| 3.2. L'outil Matlab/Simulink..... | 48 |
| 3.3. Contrôle et gestion de l'énergie du système hybride | 49 |
| 3.4. Modélisation de SHED..... | 50 |
| 3.5. Modélisation des composants de SHED | 51 |
| 3.5.1. Turbine | 51 |
| 3.5.1.1. Puissance aérodynamique..... | 52 |
| 3.5.1.2. Coefficient de puissance aérodynamique..... | 53 |
| 3.5.1.3. Couple aérodynamique..... | 53 |
| 3.5.1.4. Modèle du la turbine | 54 |
| 3.5.1.5. les résultats de la simulation | 55 |

Table des matières

| | |
|---|----|
| 3.5.1.6. Interprétations des résultats..... | 57 |
| 3.5.1.7. Contrôle en charge partielle..... | 57 |
| 3.5.2. Générateur Diesel | 58 |
| 3.5.2.1 Moteur diesel et régulateur de vitesse | 59 |
| 3.5.2.2. Modèle de moteur diesel | 59 |
| 3.5.2.3.les résultats de la simulation | 60 |
| 3.5.2.4. Interprétations des résultats..... | 61 |
| 3.5.3. Modélisation de la génératrice synchrone | 61 |
| 3.5.3.1. Modèle de génératrice synchrone | 62 |
| 3.5.4. Modélisation du convertisseur | 62 |
| 3.5.4.1.les résultats de la simulation | 64 |
| 3.5.4.2. Interprétations des résultats..... | 66 |
| 3.6. Conclusion | 67 |
| Conclusion générale..... | 68 |
| Perspectives | 69 |
| Références bibliographiques..... | 70 |

Liste des figures

| | |
|---|----|
| Figure 1.1: Les 5 familles énergies renouvelables | 4 |
| Figure 1.2: Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique..... | 6 |
| Figure 1.3: : Eolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b)..... | 7 |
| Figure 1.4 : les techniques d'énergie solaire | 8 |
| Figure 1.5 : chauffe-eau solaire monobloc..... | 8 |
| Figure 1.6 : Conversion de l'énergie solaire en électricité..... | 9 |
| Figure 1.7 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration..... | 9 |
| Figure 1.8 : Un réservoir géothermal..... | 10 |
| Figure 1.9 : La biomasse | 12 |
| Figure 1.10 : Conversion de l'énergie cinétique du vent | 16 |
| Figure 1.11 : La production électrique selon la vitesse du vent | 17 |
| Figure 1.12 : Schéma du système hybride éolien-diesel..... | 20 |
| Figure 1.13 : La ferme éolienne d'Adrar..... | 21 |
| Figure 1.14 : Variation de la puissance produite par un SHED et la consommation du carburant..... | 22 |
| Figure 2. 1 : éolienne de pompage | 25 |
| Figure 2.2 : Moulins à vent | 25 |
| Figure 2.3 : les éléments principaux d'une éolienne..... | 27 |
| Figure 2.4 : Principe de la conversion d'énergie éolienne..... | 27 |
| Figure 2.5 : Éolienne a axe vertical la Savonius | 28 |
| Figure 2.6 : éolienne a axe vertical la Darrieus..... | 29 |
| Figure 2.7 : Éolienne a axe horizontal..... | 29 |
| Figure 2.8 : la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent..... | 30 |
| Figure 2.9 : les expressions des forces [I]..... | 31 |
| Figure 2.10 : principe de la conversion d'énergie d'une éolienne..... | 33 |
| Figure 2. 11 : Caractéristiques de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation..... | 34 |
| Figure 2.12 : Tube de courant autour d'une éolienne..... | 35 |
| Figure 2.13 : Coefficient de puissance pour les différents Types d'éoliennes..... | 36 |

Liste des Figures et des Tableaux

| | |
|--|----|
| Figure 2.14 : Coefficient de puissance pour différentes turbines éoliennes..... | 38 |
| Figure 2.15 : Caractéristique $C_p(\lambda, \beta)$ d'une éolienne tripale de 1.5 MW..... | 38 |
| Figure 2.16 : Configuration de générateur diesel..... | 40 |
| Figure 2.17 les élément du moteur diesel..... | 41 |
| Figure 2.18 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe) | 43 |
| Figure 2.19 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable..... | 43 |
| Figure 2.20 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation..... | 44 |
| Figure 2.21 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents..... | 45 |
| Figure 2.22 : Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné..... | 45 |
| Figure 2.23 : Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol..... | 46 |
| Figure 3.1 : Bibliothèque SIMULINK..... | 49 |
| Figure 3.2 : Contrôle et gestion de l'énergie du système hybride | 50 |
| Figure 3.3 . Système de conversion de l'énergie éolienne étudié..... | 50 |
| Figure 3.4 . La turbine..... | 51 |
| Figure 3.5 . Schéma de bloc d'une turbine éolien..... | 54 |
| Figure 3.6 : Schéma de bloc avec sup système d'une turbine éolienne..... | 55 |
| Figure 3.7 : la variation de couple turbine en fonction de temps..... | 55 |
| Figure 3.8 : coefficient aérodynamique en fonction de temps..... | 56 |
| Figure 3.8 : la courbe de la vitesse de rotation en fonction de temps..... | 56 |
| Figure 3.9 : la courbe de puissance en fonction de temps..... | 56 |
| Figure 3.10 : Puissance captée par la turbine pour différente vitesse de vent en fonction de sa Vitesse de rotation (à $\beta_{opt}=0$) | 57 |
| Figure 3.11 : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour un angle de calage optimale (0°) | 58 |
| Figure 3.12 : Modèle simplifié du générateur diesel..... | 58 |
| Figure 3.13 : Schéma bloc d'un moteur diesel..... | 59 |
| Figure 3.14 : Les paramètres de base d'un moteur diesel FG WILSON P150-1 | 60 |
| Figure 3.15 : la courbe de puissance en fonction de temps..... | 60 |
| Figure 3.16 : la courbe de vitesse de rotation en fonction de temps..... | 61 |
| Figure 3.17 . Schéma de bloc de la GSAP | 62 |
| Figure 3.18 . Modèle de convertisseur a..... | 63 |
| Figure 3.19 . Modèle de convertisseur b..... | 63 |
| Figure 3.20 : le schéma globale d'un générateur diesel avec génératrice + onduleur..... | 64 |

Liste des Figures et des Tableaux

| | |
|---|----|
| Figure.3.21 : la courbe du couple générateur synchrone..... | 64 |
| Figure.3.22 : la charge et l'intensité de courant en fonction de temps..... | 65 |
| Figure.3.23 : la tension de la sortie de génératrice en fonction de temps..... | 65 |
| Figure.3.24 : la tension de sortie d'onduleur en fonction de temps..... | 66 |

Liste des tableaux

| | |
|---|----|
| Tableau 1.1: Avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique | 6 |
| Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne..... | 7 |
| Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients du L'énergie solaire..... | 10 |
| Tableau 1.4 : Avantages et Inconvénients de l'énergie géothermique..... | 11 |
| Tableau 1.5: Avantages et Inconvénients de la biomasse | 13 |
| Tableau 1.6 : Echelles Beaufort..... | 15 |
| Tableau 1.7. Classification des SEH par gamme de puissance..... | 18 |
| Tableau .2.1 : Comparaison entre l'éolienne a axe vertical et horizontal [F]..... | 30 |
| Tableau 2.2 : Comparaison des Eoliennes a Vitesse Fixe et a Vitesse Variable. | 37 |
| Tableau2.3 : Données climatiques du site étudié..... | 47 |

NOMENCLATURE :

Désignation latine

| Symbole | Désignation | unité |
|----------------|---|--------------|
| C_D | Coefficient de traînée | - |
| C_l | Coefficient de portance | - |
| C_p | Coefficient de puissance de l'éolienne | - |
| dA | Surface du tronçon de la pale | - |
| E_c | Énergie cinétique | [J] |
| G | gain de multiplicateur de vitesse | - |
| m | une masse d'air | [kg] |
| P | La puissance | [W] |
| P_{ear} | Puissance aérodynamique | [W] |
| P_{max} | Puissance maximale | [W] |
| P_n | Puissance électrique nominale de l'éolienne | [W] |
| $P_{turbine}$ | Puissance de sortie de turbine | [W] |
| P_v | Puissance du vent | [W] |
| R | le rayon de l'hélice | [m] |
| v | La vitesse | [m/s] |
| V_v | Vitesse du vent | [m/s] |
| w | Module du vent apparent | - |
| Ω | Vitesse de rotation de la turbine | [tr/mn] |

Désignation grecque

| Symbole | Désignation | unité |
|-----------|-----------------------------------|----------------------|
| λ | Coefficient de vitesse spécifique | - |
| α | Angle d'incidence | [rd] |
| β | Angle d'orientation des pales | [rd] |
| ρ | Masse volumique de l'air | [kg/m ³] |

Abréviation :

BP basse pression

ER énergie renouvelable

GES gaz à effet de serre

HAWT Horizontal Axis Wind Turbine

HP haute pression

PV photovoltaïque

S.T.E.P. Stations de Transfert d'Energie par Pompage

VAWT Vertical Axis Wind Turbine

INTRODUCTION GENERALE

Introduction générale

Dans le système électrique actuel, la majorité de l'énergie est injectée à partir des centrales de grandes puissances (de la centaine aux milliers de MW) sur le réseau, et une exploitation centralisée permet d'optimiser la gestion de la production pour le bénéfice des clients. Les réseaux de distribution ne sont pas conçus pour accueillir de la production d'énergie, leurs structures et leurs exploitations sont fortement marquées par le fait que l'énergie est transportée des niveaux de tension les plus hauts vers le plus bas. Poussée par un contexte favorable (volonté politique, intérêt économique...), la production décentralisée se développe dans de nombreux pays. Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. La production de l'électricité à partir des énergies renouvelables peut se faire par plusieurs façons que nous citons à titre d'exemple :

- L'électricité produite par le photovoltaïque.
- L'électricité produite par l'éolien
- L'électricité produite par l'hydraulique.
- L'électricité produite par géothermie.

L'énergie produite par l'éolienne est de nature continue ce qui n'est pas adéquat dans le cas où on veut raccorder ce dernier avec le réseau électrique, pour cela il faut concevoir un système capable de transformer l'énergie continue en énergie alternatif, cette conversion se passe par le biais d'un onduleur commandé en modulation de largeur d'impulsion afin de contrôler l'amplitude, la fréquence et la phase du courant injecté dans le réseau.

Le déroulement de cette mémoire se fera de la manière suivante :

Dans le premier chapitre, généralités sur les énergies renouvelables son principes de fonctionnement les avantages les inconvénients, Le vent et son origine et sur les système hybride éolien-diesel.

Dans le deuxième chapitre, on va donner quelques définitions état de l'art sur la conversion éolienne on va parler brièvement des différents types de ces derniers. On a détaillé l'éolienne où on verra les principales notions concernant cette dernière avec les différents types de générateur et de moteur diesel.

Introduction générale

Le troisième chapitre nous avons fait une simulation d'une intégration d'une éolienne et générateur diesel avec GSAP et l'onduleur dans un réseau de logiciels MATLAB/Simulink avec des interprétations des graphes.

Le travail est clôturé par une conclusion générale et les perspectives.

Chapitre I

**Les énergies
renouvelables et les
systèmes
hybrides**

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

1.1. Introduction

Les technologies d'ER sont des modes de production d'énergie qui utilisent des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités. Ces sources renouvelables permettent aux pays d'alimenter les zones isolées en électricité, de produire de l'électricité raccordée au réseau et de réaliser leurs objectifs de diminution de GES.

Les principales sources d'ER sont : le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la biomasse et la géothermie [1].

1.2. Définition de l'énergie renouvelable

On appelle énergie renouvelable un ensemble de sources d'énergie qui sont inépuisables à l'échelle humaine, largement disponibles, essentiellement gratuites et sont compatibles avec un certain respect environnemental. Elles peuvent être converties, selon les besoins, en électricité ou en chaleur. La cogénération d'électricité et de chaleur est possible dans le cas de la géothermie, de la biomasse et de l'énergie solaire [2].

1.3. Avantages des énergies renouvelables

- Les énergies renouvelables sont disponibles naturellement.
- Elles ne produisent pas de gaz à effet de serre.
- Les conséquences des accidents, dus à ces énergies, ne sont pas importantes et ils sont faciles à résoudre par rapport aux énergies conventionnelles (centrale nucléaire ou pétrolière).
- Le coût d'une énergie renouvelable est principalement fixé par l'investissement industriel.
- La destruction des systèmes de production d'énergie renouvelable est facile, rapide et peu coûteuse.

1.4. Inconvénients des énergies renouvelables

- L'intermittence des sources des énergies renouvelables (à l'exception de l'énergie géothermique).
- Les énergies renouvelables demandent de l'espace et ont un impact sur les usages des territoires.
- Une énergie renouvelable n'est pas nécessairement propre, et inversement (l'énergie issue de la combustion de la biomasse est propre à condition que la production ne soit pas excessive et permette à la flore de réabsorber tout le dioxyde de carbone dégagé).
- La construction des installations influence l'aspect visuel du paysage.

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

- Les sources renouvelables offrent une variation indépendamment de la demande, comme les énergies solaire et éolienne qui exigent l'utilisation des systèmes de stockage d'énergie [3].

1.5. Différentes forme d'énergie renouvelables

Parmi les énergies renouvelables nous citons :

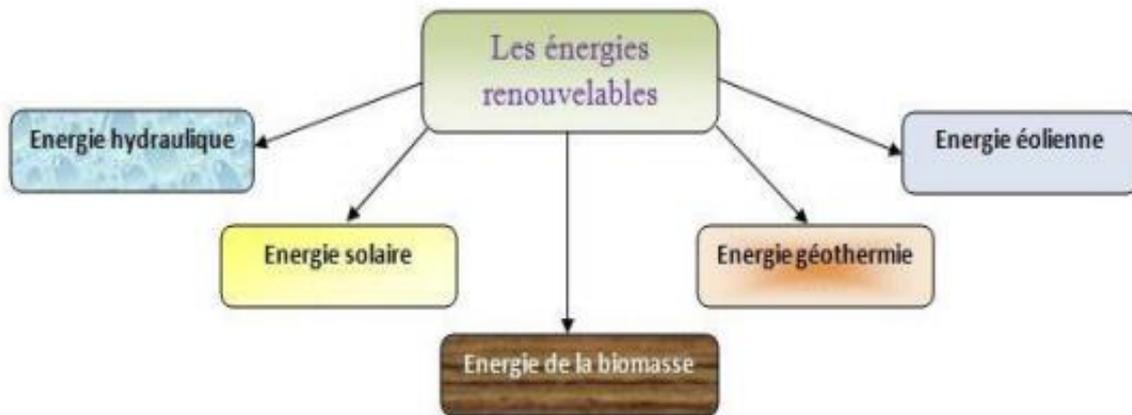


Figure 1.1 : Les 5 familles énergies renouvelables.

1.5.1. L'énergie hydraulique

Les centrales hydrauliques transforment l'énergie cinétique d'un flux d'eau en énergie électrique par l'intermédiaire d'une ou plusieurs turbines hydrauliques, couplées à des générateurs électriques (fig. 1.2).

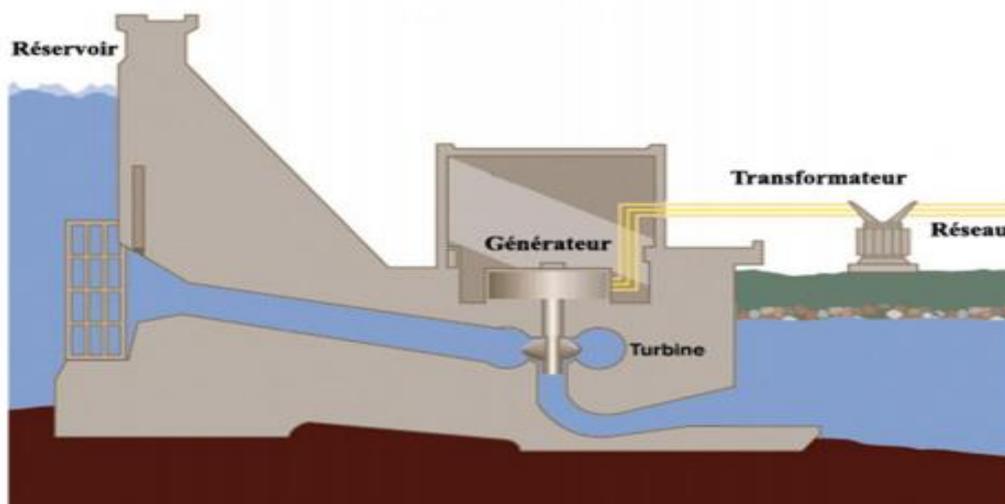


Figure 1.2 : Schéma en coupe d'un barrage hydroélectrique.

La puissance maximale dépend de la hauteur de chute, du débit d'eau et des caractéristiques mécaniques de la turbine. Il y a trois types principaux de centrales hydroélectriques:

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

- **Les centrales dites gravitaires** pour lesquelles les apports d'eau dans la réserve sont essentiellement issus du cours d'eau par gravitation,
 - **Les Stations de Transfert d'Energie par Pompage (S.T.E.P.)** aussi connues sous l'appellation centrales hydrauliques à réserve pompée ou centrale de pompage turbinage, qui permettent de pomper l'eau d'un bassin inférieur vers un bassin supérieur. Elles sont souvent utilisées comme une forme de stockage : pompage durant le creux de la demande à partir d'électricité produite par des équipements de base (nucléaire) et production d'électricité par turbinage durant la pointe, en substitution ou en complément à celle, plus coûteuse, des équipements de pointe,
 - **Les usines marémotrices** au sens large qui utilisent l'énergie du mouvement des mers, qu'il s'agisse du flux alterné des marées (marémotrice au sens strict), des courants marins permanents (dites aussi hydroliennes) ou du mouvement des vagues.[4]
- Les centrales gravitaires et celles de transfert d'énergie par pompage peuvent aussi être classées en trois types selon la hauteur de la chute de l'eau :
- **chute haute** (> 200 m),
 - **chute moyenne** (entre 50 et 200 m),
 - **chute basse** (< 50 m).

1.5.1.1. Avantages et Inconvénients de l'énergie hydraulique

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">• C'est une ressource renouvelable. En effet, l'eau utilisée est toujours intégralement restituée.• C'est une ressource locale, et donc stratégique pour les questions d'indépendance énergétique.• Elle n'est généralement pas émettrice de gaz à effet de serre (GES) durant sa phase d'exploitation. C'est toujours vrai pour les ouvrages "au fil de l'eau" (sans stockage), sur lesquelles se porte un intérêt particulier.• Elle n'est pas intermittente à court terme, contrairement à l'énergie solaire et à l'énergie | <ul style="list-style-type: none">• La construction de barrages peut bouleverser, voire détruire, certains écosystèmes.• L'installation de centrales hydroélectriques entraîne souvent d'importants déplacements de population ainsi que la disparition de surfaces agricoles.<ul style="list-style-type: none">• L'installation d'une centrale hydroélectrique est très coûteuse et doit répondre à un cahier des charges très contraignant (résistance aux crues et aux séismes, études d'impact |

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

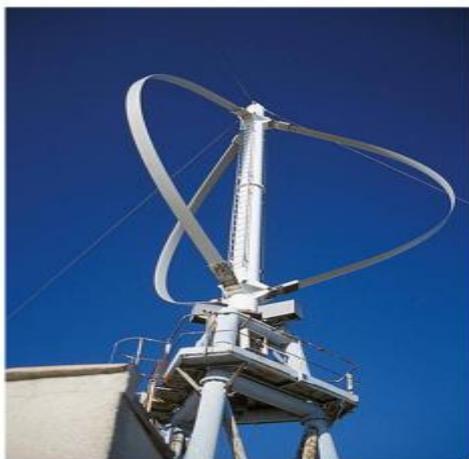
| | |
|---|-----------------------------|
| <p>éolienne. La production hydraulique varie bien entendu suivant des cycles saisonniers, les cours d'eau pouvant être diminués l'été ou au contraire renforcés par la fonte de glaciers.</p> <ul style="list-style-type: none">• Le matériel ou les équipements sont robustes et ont fait leurs preuves avec une exploitation simple et une durée de vie longue [5]. | <p>environnemental...).</p> |
|---|-----------------------------|

Tableau 1.1 : Avantages et inconvénients de l'énergie hydraulique.

1.5.2. Les éoliennes

Une éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Ensuite cette énergie est transformée en énergie électrique par l'intermédiaire d'une machine électrique.

Les termes « parc éolien » ou « ferme éolienne » sont utilisés pour décrire les unités de production groupées, installées à terre – « on shore » ou dans la mer – « Offshore ». Les coûts d'investissement sont relativement élevés, surtout pour le « offshore », mais l'énergie primaire est gratuite et l'impact environnemental est petit. Dans certaines régions, les éoliennes posent quand même quelques problèmes, liés au bruit de basse fréquence, désagréable pour les personnes qui habitent à côté et les impacts avec les troupeaux sur les oiseaux [6]. Les petites éoliennes peuvent être à axe vertical ou axe horizontal (figure 1.3)



a)



b)

Figure 1.3 : Eolienne à axe vertical (a) et axe horizontal (b).

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

1.5.2.1. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

| Avantages | Inconvénients |
|---|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles. • L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement Radical du climat par la production énorme et directe du CO2. • L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets Radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire. • Mode d'exploitation des éoliennes et la possibilité de les arrêter à n'importe quel Moment, leur donne l'avantage d'avoir un bon rendement, contrairement aux modes de Fonctionnement continus de la plupart des centrales thermiques et nucléaires. | <ul style="list-style-type: none"> • Nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique Produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux. • Coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie Classique surtout sur les sites moins ventés. • Bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs. [7] |

Tableau 1.2 : Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.

1.5.3. L'énergie solaire

Le soleil est de loin la source d'énergie la plus grande. L'énergie solaire, est disponible partout sur la Terre, en quantité égale dans l'année. Facile à exploiter, elle présente un bon rendement grâce à la technologie actuelle, et semble avoir un avenir prometteur par rapport aux autres formes d'énergies [8].

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

Les technologies actuelles permettent de convertir l'énergie solaire sous deux formes : en chaleur (énergie thermique) ou en électricité.

Selon les besoins énergétiques et les conditions présentes, trois filières d'exploitation de l'énergie solaire sont disponibles [9].

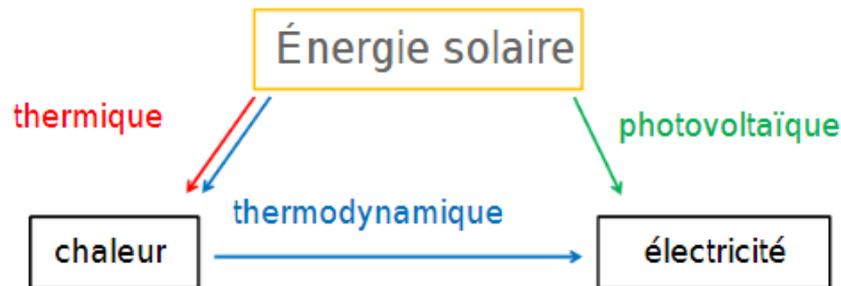


Figure 1.4 : les techniques d'énergie solaire.

L'énergie solaire est exploitée selon trois techniques :

1.5.3.1. Le solaire thermique

La conversion du rayonnement solaire en chaleur par des capteurs thermiques [10]. L'utilisation de l'énergie solaire thermique consiste à utiliser l'énergie thermique obtenue par le rayonnement du soleil pour chauffer un fluide, en fonction de sa température, est utilisé pour produire de l'eau chaude et même vapeur [3].



Figure 1.5 : chauffe-eau solaire monobloc.

1.5.3.2. Le solaire photovoltaïque

La production d'électricité à partir de panneaux solaires photovoltaïques (PV) est en plein essor partout sur la planète. Il s'agit d'une avenue appropriée dans les pays qui ont difficilement accès à des ressources renouvelables pour générer leur électricité [11].

La conversion directe du rayonnement lumineux en électricité par des capteurs (cellule photovoltaïque). Les panneaux photovoltaïques composés de cellules à base de silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons [8].

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

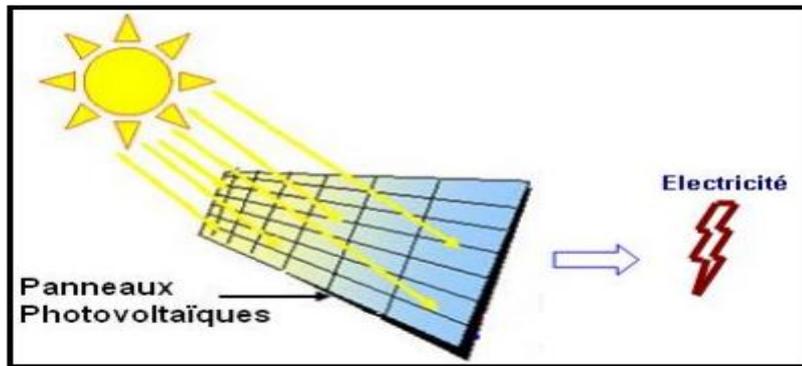


Figure 1.6 : Conversion de l'énergie solaire en électricité.

1.5.3.3. Le solaire thermodynamique

Le solaire thermodynamique utilise le solaire thermique pour produire de l'électricité selon le même principe qu'une centrale électrique classique mais en utilisant des centrales Héli thermoélectriques :

Trois principaux types de centrales sont utilisés :

- Centrales à capteurs cylindro-paraboliques pour des températures entre 300 et 350 °C.
- Centrales à capteurs paraboliques permettant d'obtenir des températures de 1000 °C.
- Centrales à tour pour atteindre 1000 °C.[12]

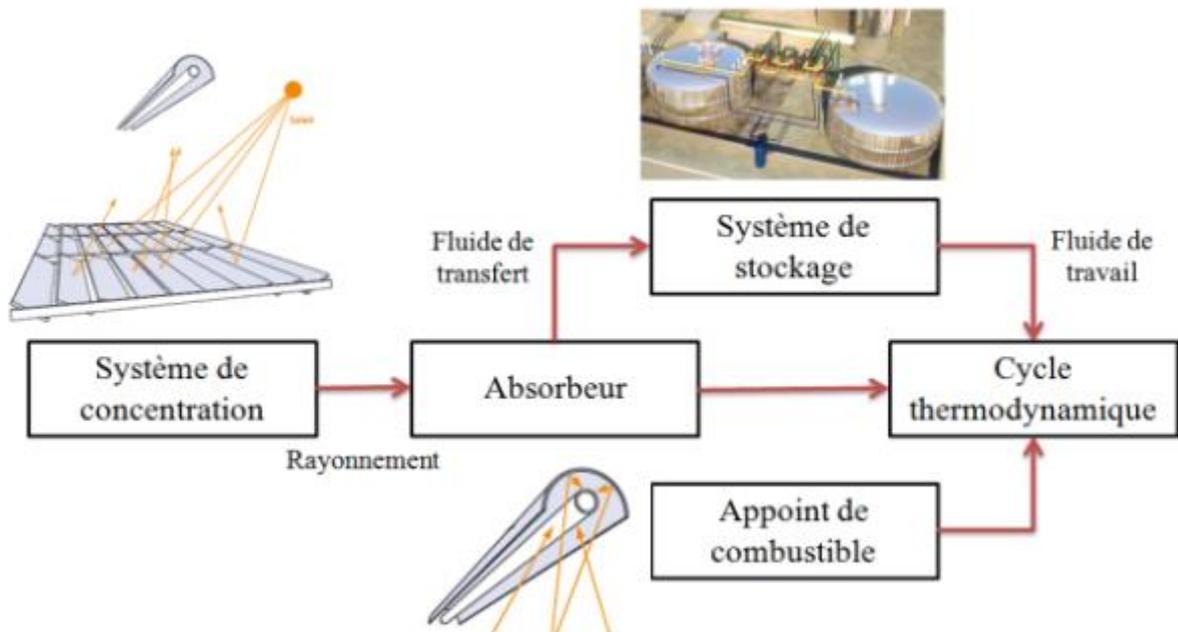


Figure 1.7 : Principe de fonctionnement d'une centrale solaire à concentration.

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

1.5.3.4. Avantages et inconvénients du L'énergie solaire

| Avantages | Inconvénients |
|--|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Gratuité de cette ressource et énormité de son potentiel réparti sur le globe Terrestre.• Propreté durant son utilisation.• Grande fiabilité.• Peu d'entretien.• Grande souplesse de production (variant de milliwatts aux mégawatts).• Utilisation autonome et décentralisée | <ul style="list-style-type: none">• Source diffuse du rayonnement solaire qui nécessite de grandes surfaces.• Technologie coûteuse.• Facteur de charge faible.• Stockage difficile.• Difficulté à recycler les composants du système.• Investissement élevé dépendant des décisions politiques. [13] |

Tableau 1.3 : Avantages et inconvénients du L'énergie solaire.

1.5.4. La géothermie

La géothermie (du grec "Géo", la terre, et "Thermie", la chaleur) consiste à capter la chaleur de la croûte terrestre pour produire du chauffage (température inférieure à 90°) ou de l'électricité (température entre 90 et 150°). La géothermie a pour origine l'évacuation de la chaleur de l'intérieur du globe, chaleur qui a pour origine la désintégration de certains corps radioactifs. [6]

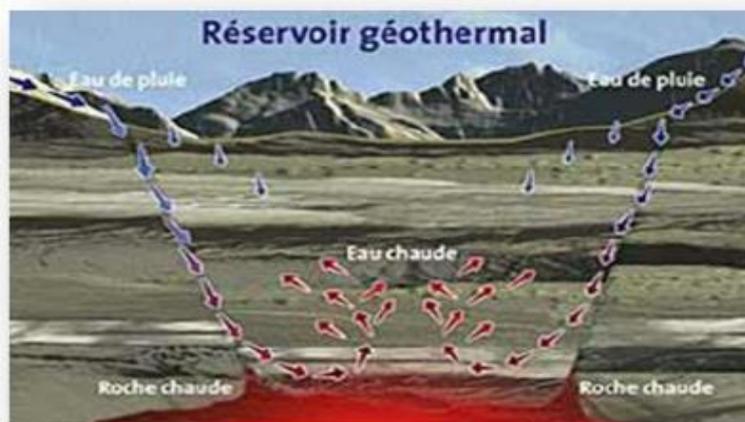


Figure 1.8 : Un réservoir géothermal.

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

1.5.4.1. Avantages et Inconvénients de l'énergie géothermique

| Avantages | Inconvénients |
|--|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Source d'énergie renouvelable pour la production de chaleur seulement.• La chaleur est utilisée directement dans le chauffage des bâtiments, l'agriculture, l'industrie, l'aquaculture, la culture en serres, les thermopompes et les thermes.• Source d'énergie à haute température de l'ordre de 2000°C, propre, fiable et économique.• Possibilité du couplage avec les centrales électriques, les réseaux de chaleur et de faire de la cogénération. Le séchage de bois, le chauffage des serres ou d'installations touristiques, la pisciculture, les séchages agricoles, également dans l'industrie tel que le lavage de la laine, distillation et réfrigération. | <ul style="list-style-type: none">• Les sites les plus intéressants sur la planète sont déjà exploités.• Source d'énergie non renouvelable pour la production d'électricité (en raison du tarissement des puits géothermiques).• Coût très élevé en raison du prix de réalisation du forage qui parfois ne peut être rentable qu'à une profondeur considérable.• Nécessité de disposer d'un terrain suffisant pour l'exploitation de l'énergie géothermique. [14] |

Tableau 1.4 : Avantages et Inconvénients de l'énergie géothermique.

1.5.5. La biomasse

La biomasse est une masse de matière organique renouvelable et alternative. Elle comprend les arbres, les plantes, la fibre végétale, les déchets d'origines animale et industrielle et les déchets urbains solides.

Elle est la source d'énergie la plus ancienne utilisée par l'humanité. Il s'agit de toute matière organique végétale ou issue des êtres vivants. Elle comprend donc aussi tous les déchets organiques. Elle est très utilisée, notamment pour produire de la chaleur.

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides



Figure 1.9 : La biomasse.

1.5.5.1. Avantages et Inconvénients de la biomasse

Lors de l'utilisation et la transformation de la biomasse pour produire de l'énergie, cette dernière offre de nombreux avantages et inconvénients qui ont une influence sur l'économie et l'environnement. Parmi ses avantages et ses inconvénients, on cite :

| Avantages | Inconvénients |
|---|---|
| <ul style="list-style-type: none">• La biomasse participe au traitement et à la destruction des déchets organiques.• A l'heure où le prix des carburants ne cesse d'augmenter, cette énergie serait une bonne alternative au pétrole.• Les ressources de la biomasse sont disponibles à grande échelle.• La biomasse est une ressource renouvelable lorsqu'utilisée et gérée de façon durable• La biomasse peut être convertie en différentes formes d'énergie. Par exemple, le bois peut être traité et converti en gaz.• L'utilisation du bois-énergie maîtrise le coût de l'énergie sur le long terme puisque, à la différence des énergies fossiles, le combustible bois n'est que très peu influencé par les variations conjoncturelles du prix du baril de pétrole.• la biomasse n'est pas inerte : après une | <ul style="list-style-type: none">• La production de biocarburants à un prix conséquent n'est pas encore totalement développée.• Pour produire de la biomasse, il faut des terres agricoles, sauf qu'il y en a peu de disponible.• Les cultures vivrières devront donc être rachetées ou abandonnées au profit de la production de biocarburants.• La biomasse peut être polluante si elle est mal utilisée (par exemple ; un hectare de sol absorbe normalement 4 tonnes de dioxyde de carbone par an alors qu'un hectare mal-labouré rejette 1 tonne de dioxyde de carbone par an).• L'inconvénient majeur de la mise en pratique de la biomasse est que le |

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

| | |
|--|--|
| <p>période plus au moins longue, elle se dégrade et retourne à l'état gazeux (CO₂, CH₄, NH₃, etc.). Sa valorisation énergétique correspond à la maîtrise technologique de ces processus. Elle procure des énergies renouvelables (chauffage à la paille ou biogaz, etc.) et des amendements/engrais organiques ou minéraux qui se substituent aux énergies fossiles et aux fertilisants du commerce. Cette utilisation raisonnée participe au maintien des équilibres biogéochimiques : ainsi les émissions de CO₂ renouvelable émanant de la combustion de biogaz sont neutres vis-à-vis de l'effet de serre.</p> | <p>bois, qui devient source d'énergie après combustion, est souvent surexploité par les industriels. Ce qui provoque une déforestation. Cela peut avoir des effets nocifs sur la biodiversité. De plus, la combustion du bois rejette des éléments néfastes dans l'atmosphère [15]</p> |
|--|--|

Tableau 1.5: Avantages et Inconvénients de la biomasse.

1.6 Le vent et son origine

L'air dont se compose l'atmosphère, exerce sur la terre une pression, appelée pression atmosphérique. Sur la surface de la terre, la pression atmosphérique n'est pas même partout. Il existe des secteurs où règne une basse pression et des secteurs où règne une haute pression. L'air froid, plus lourd, descend, créant une zone de haute pression (HP).

Inversement, l'air chaud, plus léger, monte naturellement dans les couches hautes de l'atmosphère avec pour conséquence la création d'une zone de basse pression (BP). La différence de pression entre ces deux masses d'air est à l'origine du vent. L'air contenu dans la haute pression a tendance à s'engouffrer dans la basse pression qui l'avoisine.

Le vent provient du déplacement d'une masse d'air de la haute vers la basse pression. Plus la haute pression est proche de la basse pression, plus le vent est fort.

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

L'air qui constitue l'atmosphère est un mélange de gaz et de particules solides ou liquides, concentrés dans la troposphère. Dans cette région, le déplacement de l'air par rapport à la surface terrestre, appelé vent, résulte de l'équilibre entre les forces en présence [16].

Pour un observateur à l'arrêt par rapport au sol, il existe quatre forces majeures qui agissent sur une partie élémentaire d'air :

- **Les forces de pression**

Ces forces génèrent les déplacements des masses d'air constituant le vent. Elles proviennent des différences locales de pression dues aux différences de température en fonction de la latitude, et des influences continentales et océaniques. Elles sont perpendiculaires aux surfaces isobares et dirigées des hautes vers les basses pressions.

- **La force de Coriolis**

Cette force est liée à la rotation de la Terre sur son axe. Elle est Perpendiculaire à la vitesse du vent et orientée vers l'est dans l'hémisphère Nord. Elle n'est Significative que pour les déplacements atmosphériques de haute altitude en raison de la Faiblesse relative des autres forces en présence.

- **Les forces de frottement**

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air sur le sol. Généralement appliqués aux mouvements d'air présents dans l'atmosphère, les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans [16].

1.6.1. Direction et vitesse du vent

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne.

Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître les vitesses moyennes du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s.

| Degrés Beaufort | V_v Vitesse du vent (m/s) | V_v Vitesse du vent (km/h) | Description Générale | Pression sur Surface plane (daN/m ²) |
|-----------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------|--|
| 0 | 0 à 0.4 | 1 | Clame | |
| 3 | 3.5 à 5.5 | 12 à 19 | Petite brise | 3.2(5m/s) |
| 4 | 5.5 à 8 | 20 à 28 | Jolie brise | 6.4(7m/s) |
| 6 | 11.4 à 13.9 | 39 à 49 | Vent frais | 22(13m/s) |
| 8 | 17.4 à 20.4 | 62 à 74 | Coup de vent | 52(20m/s) |
| 11 | 28.4 à 32.5 | 103 à 117 | Violente tempête | 117 (30m/s) |
| 17 | 54.1 à 60 | 202 à 220 | Cyclone | 470(60m/s) |

Tableau 1.6 : Echelles Beaufort

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne.

Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude.

Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s.

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

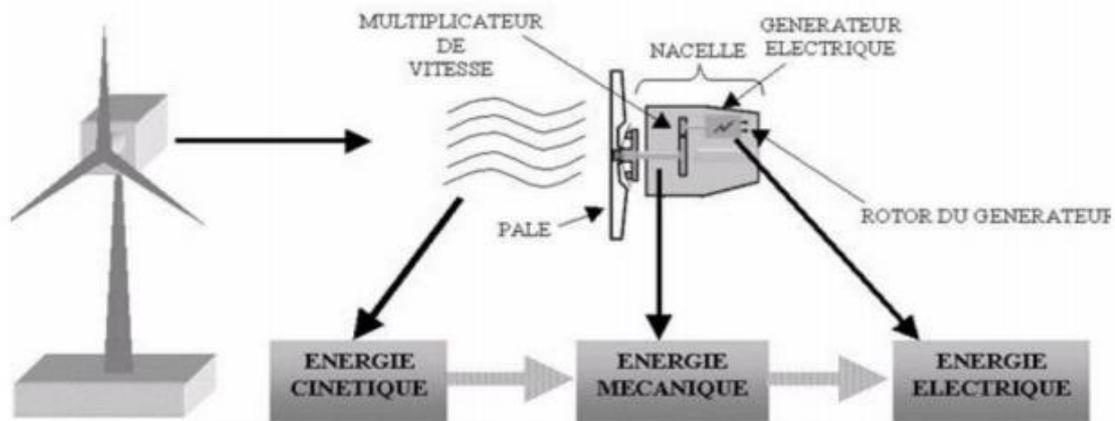


Figure 1.10: Conversion de l'énergie cinétique du vent.

1.6.2. La production électrique varie selon la vitesse du vent

- Lorsque le vent est inférieur à 10 km/h (2,8 m/s), l'éolienne est arrêtée car le vent est trop faible. Cela arrive que 15 à 20 % du temps.
- Entre 10 et 36 km/h (2,8 et 10 m/s), la totalité de l'énergie du vent disponible est convertie en électricité, la production augmente très rapidement.
- À partir de 36 km/h (10 m/s), l'éolienne approche de sa production maximale : les pales se mettent progressivement à tourner sur elles-mêmes afin de réguler la production.
- À 45 km/h (12,5 m/s), l'éolienne produit à pleine puissance. Les pales sont orientées en fonction de la vitesse du vent. La production reste constante et maximale jusqu'à une vitesse de vent de 90 km/h. • À partir de 90 km/h (25 m/s), l'éolienne est arrêtée progressivement pour des raisons de sécurité, et les pales sont mises en drapeau. Cela n'arrive que sur les sites très exposés, quelques heures par an, durant les fortes tempêtes.

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

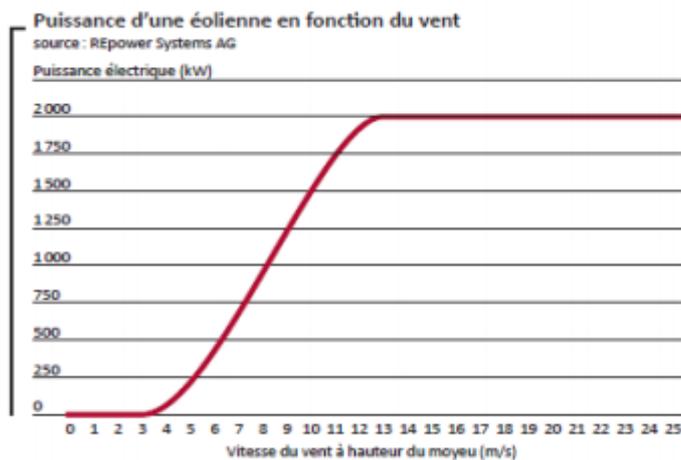


Figure 1.11 : La production électrique selon la vitesse du vent

1.7. Définition et missions des systèmes hybrides

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation utilisant deux ou plus des technologies de la génération d'énergies : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables. L'objectif d'utiliser des technologies multiples est de réunir les avantages et les meilleures caractéristiques opérationnelles de chaque système.

Les performances d'un SEH (le rendement et la durée de vie) sont influencées d'une part par sa conception, c'est-à-dire le dimensionnement des composants, le type de composants et leur l'architecture etc. dont dépend le choix de la stratégie de fonctionnement. Notons que quelques paramètres permettent d'évaluer leurs performances qui sont : l'économie du carburant, le coût du kW, le nombre et la durée des pannes, le nombre d'arrêts pour l'entretien etc.

1.8. Architecture des SEH

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesels (GD) et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SEH peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Tous ces composants peuvent être connectés en différentes architectures. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [17] : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et le système de distribution. Les sources d'énergie renouvelable

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

peuvent être connectées au bus a CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système.

L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. Sachant qu'à part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie.

Ainsi, dans un SEH avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle :charge et source.

1.9. Classification des SEH

Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tableau 1.7).

| Puissance du SEH[KW] | Application |
|----------------------|--|
| Faible :<5 | Systèmes autonome : stations de télécommunications, pompage d'eau, autres applications isolées |
| Moyenne :10-25 | Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé , des zones rurales... |
| Grande :<500 | Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires) |

Tableau 1.7. Classification des SEH par gamme de puissance

Les sites isolés peuvent être classifiés en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable [18].

Le Taux de pénétration en puissance (TPP) est défini comme le rapport entre la puissance éolienne installée et la puissance maximum de la charge. Tandis que le taux de pénétration en énergie (TPE) est défini comme le rapport entre l'énergie éolienne annuelle produite et l'énergie consommée par la charge. Le SHED est dit à haute pénétration si le

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

TPP>1.

1.10. Dimensionnement des SEH

La conception des SEH exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des sources d'énergie, des convertisseurs et du système de stockage, ainsi que l'implantation d'une stratégie de fonctionnement efficace. De plus, pour obtenir un taux de pénétration important des sources d'énergie renouvelable, sans la dégradation de la qualité de l'énergie fournie, une étude de dimensionnement du système hybride s'impose.

Les logiciels de dimensionnement sont des outils indispensables pour l'analyse et la comparaison des différentes combinaisons possibles des sources utilisées dans les SEH ;

Les principaux facteurs du dimensionnement sont :

- Les conditions environnementales du site (vitesse du vent, température, humidité, etc.).
- Le profil de la charge.
- Les préférences et les demandes du client.
- Les ressources financières.
- La disponibilité de la technologie et le support technique.

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation des SEH :

MATLAB, HOMER, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, INSEL....Tous ces logiciels ont pour but d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisation sont différentes [17].

1.11. Système Hybride Eolien-Diesel (SHED)

Dans les systèmes isolés qui associent des turbines éoliennes et des machines génératrices diesel la distribution est faite en CA. Cette association de système de génération est nommée (Wind-diesel). Ces systèmes produisent de l'énergie avec une ou plusieurs sources éoliennes afin de réduire la consommation du carburant tout en gardant une qualité de l'énergie acceptable. Sachant que économiquement la justification de l'investissement du choix de l'équipement nécessaire pour en profiter du maximum de l'énergie du vent doit influencer sur la récupération de l'économie réalisée sur le carburant.

A cause de la grande quantité de mini-réseaux isolés dont l'énergie primaire est le pétrole, dans les pays développés ou dans les pays en voie de développement, le marché pourra réadapter ces systèmes en systèmes hybrides avec des sources renouvelables de faible cout, comme l'éolien, est substantiel [19].

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

1.11.1. Description du SHED

En générale, la conception préliminaire du SHED prévoit la génération de l'électricité en utilisant en parallèle une source d'énergie classique (groupe électrogène diesel) déjà existante et une source d'énergie renouvelable (éolienne) comportant un seul modèle de turbines.

En plus de ces deux principaux éléments, le SHED peut aussi incorporer des convertisseurs statiques et dynamiques, un système de stockage, des charges principales et de délestages et un système de surveillance, etc.

Tous ces composants peuvent être connectés selon différentes architectures, l'architecture de notre étude est présentée dans la Figure 1.12 [20]

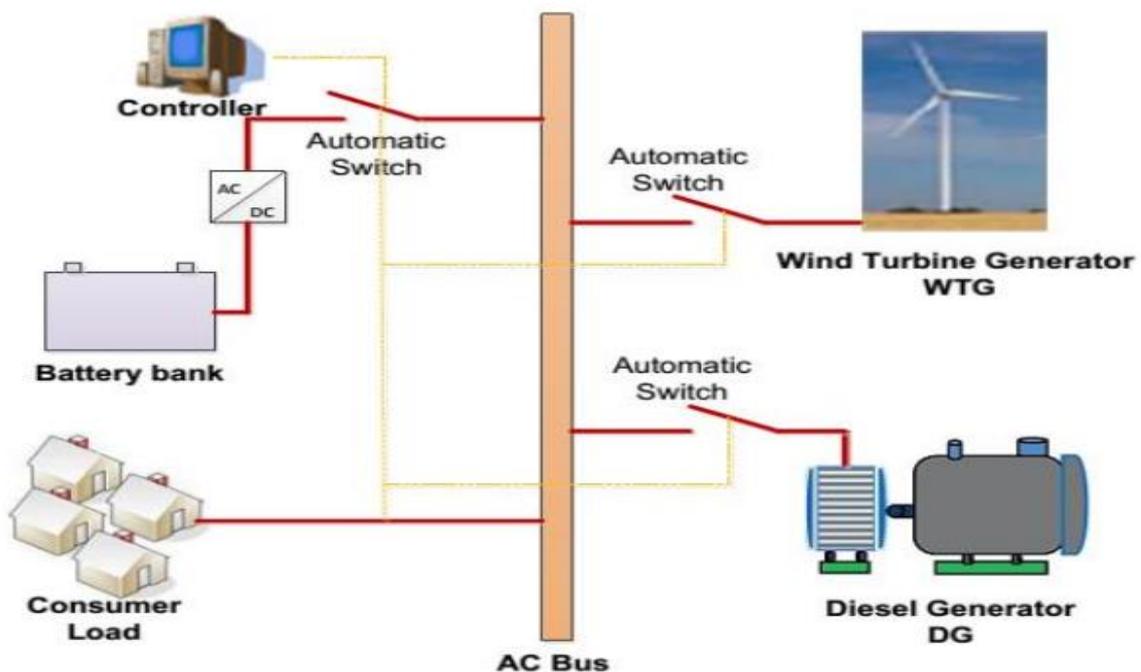


Figure 1.12 : Schéma du système hybride éolien-diesel

1.11.2 Principaux composants d'un SHED

1.11.2.1. Eolienne

L'éolienne, fiable et rentable représente la source d'énergie idéale pour de nombreuses applications. Les éoliennes existent en plusieurs dimensions, la technologie largement dominante aujourd'hui est celle à axe horizontal, à turbine tripale, parfois bipale et à rotor face au vent. Ces éoliennes peuvent fonctionner à vitesse fixe ou variable [21]. Les deux types de machines électriques les plus utilisées sont les machines asynchrones et synchrones

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

sous leurs diverses variantes. La Figure 1.13 c'est l'exemple de la ferme éolienne d'Adrar qui dispose désormais d'une capacité de 10 MW [22].



Figure 1.13 : La ferme éolienne d'Adrar.

1.12. Importance de l'hybridation entre l'éolien et le diesel

Le SHED (Figure 1.12) représente une solution intéressante pour l'électrification des consommateurs dans les sites isolés même s'il est très complexe comparativement aux solutions courantes mono-source. Le SHED présente par contre un intérêt évident considérable par sa flexibilité incomparable, sa souplesse de fonctionnement et son prix de revient vraiment attractif. Ceci permet d'optimiser au maximum le système de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique et économique.

Cette façon de concevoir l'intégration éolienne

1. Génère des économies de carburant beaucoup plus intéressantes qu'une génératrice diesel fonctionnant seule.
2. permet de réduire les déficits d'exploitation des réseaux autonomes en apportant des économies sur l'entretien et sur le coût de remplacement des groupes diesels.
3. assurant en tout temps l'énergie suffisante demandée par la charge et c'est possible produisant le maximum d'énergie à partir des éoliennes, tout en maintenant une qualité déterminée d'énergie fournie [17].
4. permet de palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie (vent).

Un système hybride éolien-diesel doit notamment

1. obéir à des règles d'exploitation en temps réel basées sur une priorité économique des ressources énergétiques disponibles.

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

2. compter sur une gestion automatisée des composants du système afin de garantir la stabilité du système en tout temps en incluant les transitions entre les différents modes d'opération du système.

De plus, l'économie de carburant et la baisse de prix obtenus par la génération hybride doivent au moins couvrir l'investissement assuré pour les générateurs éoliens et les autres composants auxiliaires du système. Un système de régulation performant qui maintient les groupes diesel au-dessus de leur puissance minimum de bon fonctionnement permettra d'optimiser leur fiabilité et le taux de pénétration de l'énergie éolienne.

1.13. Régimes de fonctionnement d'un SHED

Suivant l'intensité du vent, trois modes de fonctionnement peuvent être distingués pour les systèmes à haute pénétration (Figure 1.14), [23]

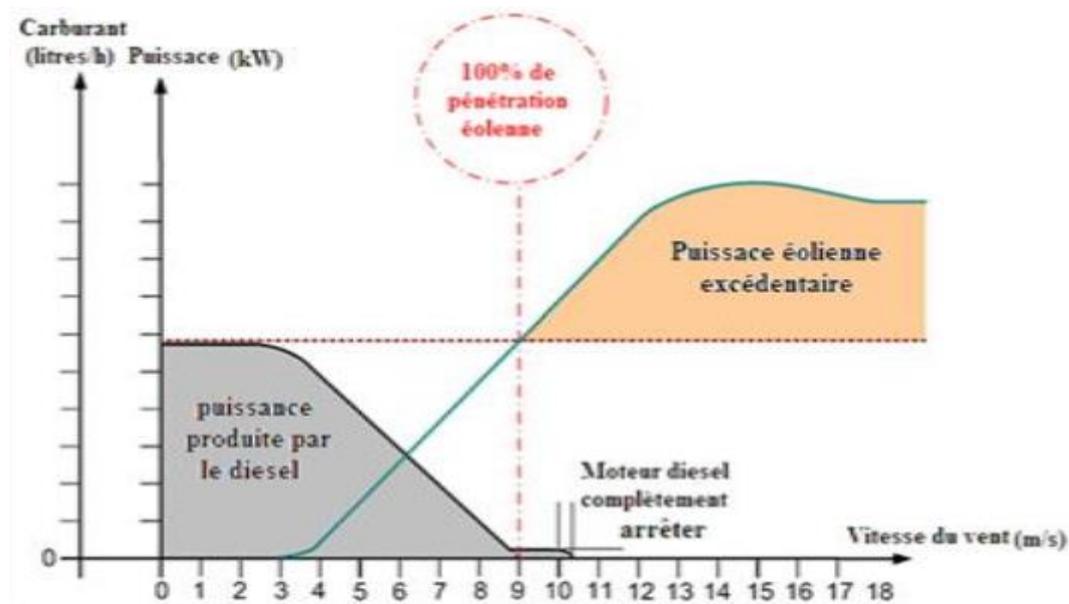


Figure 1.14 : Variation de la puissance produite par un SHED et la consommation du carburant

1. Vents faibles ($v_w \leq 3\text{m/s}$) : diesels seuls (Diesel Only DO) : C'est le groupe électrogène qui assure la production de puissance et les asservissements de tension et de fréquence. Dans ce cas, le système de contrôle des éoliennes est hors circuit.

2. Vents moyens ($3\text{m/s} < v_w \leq 10\text{m/s}$) : diesels et éoliennes en service (Wind-Diesel WD) : Lorsque les vents sont d'intensité moyenne la puissance de l'éolienne n'est généralement pas suffisante pour fournir à elle seule la totalité de la demande. Les éoliennes contribuent à fournir une partie de la puissance demandée par la charge et le groupe

Chapitre 1 : Les énergies renouvelables et les systèmes hybrides

électrogène fournit alors la différence. Ceci permet de diminuer l'apport des diesels et par conséquent de réaliser des économies. Dans ce mode de fonctionnement, les régulations de tension et de fréquence sont réalisées par le groupe électrogène.

3. Vents forts ($v_w > 10\text{m/s}$) : éoliennes seules (Wind Only WO) : Avec des vents suffisamment forts pour que la production éolienne soit supérieure à la demande, il est alors possible d'arrêter complètement les groupes diesels. Une configuration connue mais non unique consiste à utiliser un embrayage unidirectionnel entre les diesels et les génératrices synchrones afin de découpler ces dispositifs [24], [25]. Les diesels étant arrêtés et découplés des machines synchrones, ces dernières n'entraînent aucune charge.

Dans le cas où l'éolienne satisfait la demande de la charge, le surplus de l'énergie doit être stocké dans les batteries pour l'utilisation de secours.

1.14. Conclusion

Ce chapitre s'est consacré à la présentation des énergies renouvelables et Différentes forme avec les avantages et les inconvénients et les systèmes d'énergie hybrides (SEH) associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelable.

Chapitre II

Les Composantes du Système

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

2.1. Introduction

L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution, ni déchet. De plus, l'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergies propres durables où on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications particulières telles que des communautés isolées et pour les applications nationales.[17]

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différentes notions théoriques.

2.2. Histoire de l'éolien

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité, elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie éolienne remontent à 2000 ans avant J.-C environ. Hammourabi, fondateur de la puissance de Babylone, avait conçu tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie utilisant la puissance du vent. La première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. Les Chinois ont également exploité la puissance du vent pour les systèmes de pompage de l'eau.

Le début du Moyen-Âge a vu l'apparition des moulins en Europe avec comme application l'assèchement des lacs et terrains inondés aux Pays-Bas ainsi que la moudre de grains.

Chapitre 2 : Les Composantes du Système



Figure 2. 1 : éolienne de pompage



Figure 2.2 : Moulins à vent

La génération d'énergie électrique par le vent a débuté à la fin du XIX^{ème} siècle. Parmi les pionniers, on peut citer Paul La Cour au Danemark qui a associé une dynamo à une éolienne en 1891. Dans les années 1950, Johannes Juul (élève de Paul La Cour) devint aussi un pionnier dans l'utilisation de l'énergie éolienne en construisant les premières éoliennes produisant du courant alternatif.

La première crise pétrolière en 1973 contribua à éveiller l'intérêt pour l'énergie éolienne dans plusieurs pays. Ainsi plusieurs pays commencèrent à investir de l'argent pour améliorer notamment la technologie des aérogénérateurs.

L'industrie espagnole de l'énergie éolienne a remporté des victoires remarquables tant dans la conception que dans la fabrication des aérogénérateurs. Les États-Unis d'Amérique ont notamment lancé en Californie une opération à grande échelle au début des années 1980 en passant de 7 MW en 1981 à 386 MW en 1985 à 16 813 MW en 2007 à 25 170 MW en 2008 et en 2009 35 159 MW qui occupe la première place en production d'énergie éolienne. En 1991, l'Espagne avait seulement 7 MW de puissance installée ; à la fin de 2008, elle cumulait 16 689 MW de puissance installée et se hissait au troisième rang, et au quatrième rang en 2009 avec 19 149 MW, de tous les pays du monde en matière de production d'énergie éolienne.

Aujourd'hui, les études portent sur l'amélioration des matériaux ainsi que sur la chaîne de conversion de l'énergie du vent en énergie électrique exploitable par le réseau. Les premières éoliennes mettent en œuvre une génératrice asynchrone liée aux pales par l'intermédiaire d'une boîte de vitesse, fonctionnent à vitesse fixe et sont directement reliées au

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

réseau (pas d'interface électronique). Cette technologie était surtout employée au Danemark dans les années 1970. Les systèmes les plus récents se dirigent d'une part vers la vitesse variable pour maximiser la puissance captée du vent avec l'insertion d'interface d'électronique entre la génératrice et le réseau [26].

2.3. Constitution d'une éolienne

Une éolienne est généralement constituée de trois éléments principaux (Figure 2.3):

2.3.1. La tour

Généralement en tube d'acier. Sa hauteur dépend essentiellement des dimensions des pâles. (Par exemple le rayon d'une éolienne avec une hauteur de 100 m est de 45m)

2.3.2. La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur de vitesse, système de contrôle, système de refroidissement, une girouette indiquant la direction du vent, l'anémomètre mesurant la vitesse du vent et informe le système de commande quand celui-ci souffle assez fort et en fin d'un frein à disque (différent du frein aérodynamique) permettant d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement composé une machine synchrone ou asynchrone, des systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (Frein aérodynamique).

2.3.3. Le rotor

Le rotor formé par les pales assemblées dans leur moyeu.

- Les pales, qui permettent de capter la puissance du vent et la transformer au rotor ;
- Le moyeu, c'est le support des pales. Le moyeu doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne ou lors des changements brusques de la vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé, et non réalisé par soudure, bien que sa forme soit ainsi plus difficile à réaliser. [27]

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

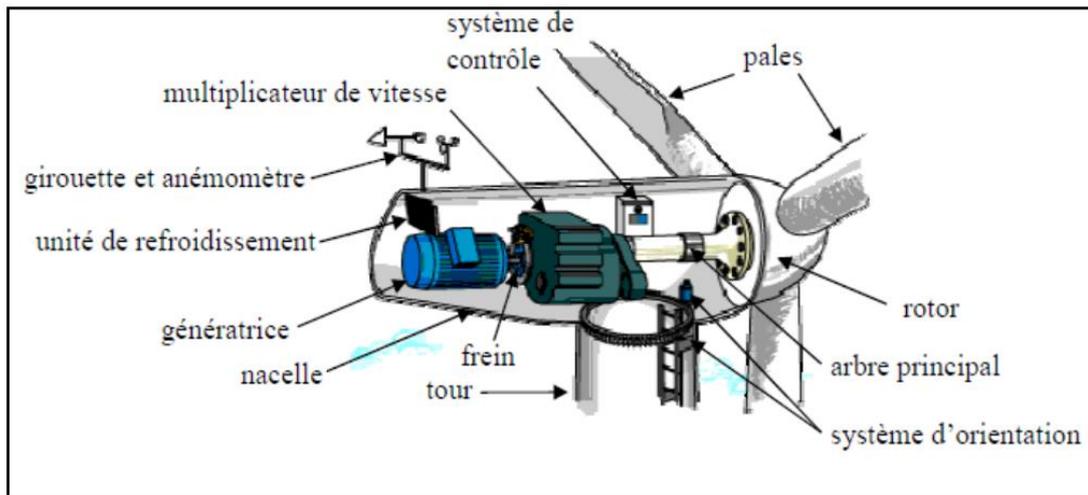


Figure 2.3 : les éléments principaux d'une éolienne.

2.4. Principe de fonctionnement

Une éolienne ou un aérogénérateur est simplement un dispositif capteur et convertisseur d'énergie, elle transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

La conversion éolienne se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique. Le fonctionnement général est illustré par la figure 2.4 : l'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécaniques, électriques ou d'automatique.

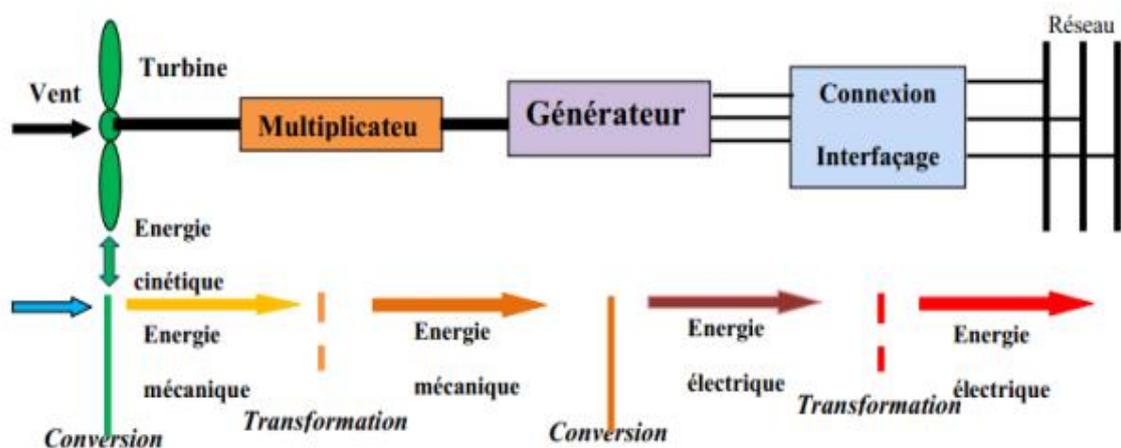


Figure 2.4 : Principe de la conversion d'énergie éolienne

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

Selon la puissance nominale délivrée, les éoliennes sont divisées en trois catégories :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 KW,
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 KW à quelques centaines des KW,
- Eoliennes de grande puissance : supérieure ou égale à 1 MW [37].

2.5. Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes peuvent être classées en deux types en fonction de l'orientation de leurs axes de rotation, le premier type est la turbine éolienne à axe vertical (Vertical Axis Wind Turbine VAWT) et le deuxième type d'éolienne étant à axe horizontal (Horizontal Axis Wind Turbine HAWT) :

2.5.1. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessibles.

a. Savonius

Du nom de son inventeur, breveté en 1925. Son fonctionnement repose sur le principe de la traînée différentielle exercée par le vent sur ses godets comme montré sur la figure (2.5). Elle présente un grand nombre d'avantages à savoir un couple moteur important. Outre son faible encombrement, qui permet d'intégrer cette éolienne aux bâtiments sans en dénaturer l'esthétique.



Figure 2.5 : Éolienne a axe vertical la Savonius

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

b. Darrieus

Du nom de l'ingénieur français qui déposa le brevet au début des années 30. Ce type du rotor est généralement sous forme parabolique comme montré sur la figure (2.6). Son fonctionnement est basé sur la variation cyclique d'incidence ce qui fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles soit soumis à des forces d'intensités et de directions variables.

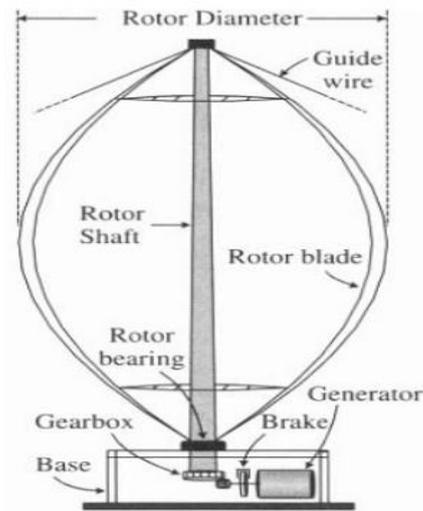


Figure 2.6 : éolienne à axe vertical la Darrieus

2.5.2. Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent comme montré sur la figure (2.7). Ce type d'éoliennes a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie son efficacité [38].

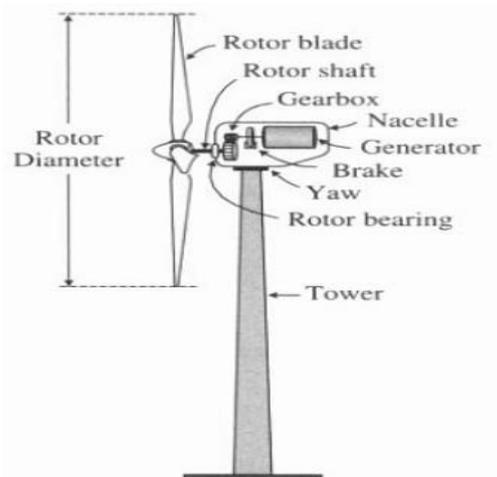


Figure 2.7 : Éolienne à axe horizontal.

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

Une comparaison est dressée dans le tableau 2.1 résumant les inconvénients et les avantages de chaque type d'éolienne.

| L'éolienne | Avantages | Inconvénients |
|------------|--|---|
| HAWT | <ul style="list-style-type: none"> • Grande efficacité de conversion d'énergie éolienne. • Exploite plus de vent. • Possibilité de régulation de la puissance. • Emprise au sol minimal. | <ul style="list-style-type: none"> • Cout d'installation élevée (A cause de la longueur de la tour et la longueur des câbles électriques). • La nécessité d'un système d'orientation. • L'entretien est trop compliqué à cause de la hauteur |
| VAWT | <ul style="list-style-type: none"> • Cout de l'installation faible et son entretien n'est pas compliqué. • Fonctionnement non lié à la direction du vent . | <ul style="list-style-type: none"> • Faible rendement • Le démarrage de l'éolienne n'est pas automatique. • Faible vitesse du vent à proximité du sol • Occupe plus de terrain au sol. |

Tableau .2.1 : Comparaison entre l'éolienne a axe vertical et horizontal [39].

2.6 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Le dimensionnement en puissance de l'ensemble de la turbine, du générateur et de toute la mécanique de structure (nacelle, mât) associée est défini pour une vitesse du vent nominale au-delà de laquelle il est nécessaire d'écrêter la puissance [40]. Ainsi, la courbe idéale et typique d'un aérogénérateur a l'allure de celle présentée à la figure 2.8 [41].

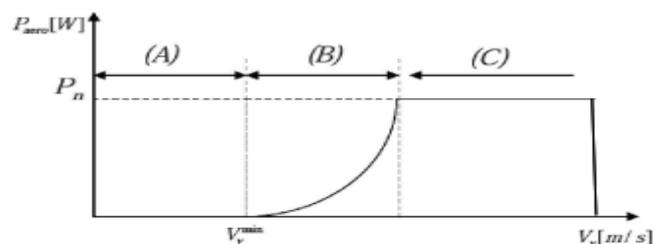


Figure 2.8 : la caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent.

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

La caractéristique de puissance en fonction de la vitesse du vent comporte trois zones distinctes :

- la zone A, ou $P_{turbine} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance) ;
- la zone B, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent.
- la zone C ,ou généralement la vitesse de rotation est maintenue constante par un dispositif de régulation et ou la puissance $P_{turbine}$ fournie reste sensiblement égale a P_n .

Dans les grandes machines (au-delà de quelques 100 KW) ,on rencontre deux familles de systèmes de limitation de la puissance aérodynamique :les systèmes « *pitch* » (a pas variable)dans lesquels on règle l'orientation des pales pour réduire C_p sensiblement avec V_v^3 et les systèmes « *stall* »(a décrochage aérodynamique naturel) ou les pales ont un profil optimisé pour obtenir de décrochage (chute de C_p en V_v^3) dans ce cas, la courbe de puissance maximale n'est pas parfaitement plate mais présente une « *bosse* ».il existe également des dispositifs intermédiaires qualifiés de « *stall actif* » dans lesquels un très faible réglage de L'angle de calage associé à un profil de pale optimisé permet d'obtenir un compromis entre complexité du système de réglage et qualité de la courbe de puissance obtenue.

Comme le montrent les expressions des forces dans la figure 2.9, celles-ci augmentent rapidement avec le vent apparent et la puissance correspondante peut devenir rapidement supérieure à la puissance nominale de la machine .il faut donc à un moment donnée pouvoir limiter le couple. Le réglage du couple, donc de la puissance captée par la turbine, se fait essentiellement par action sur la portance qui dépend principalement de l'angle d'incidence α ,le réglage de la puissance va donc se faire par action sur α .

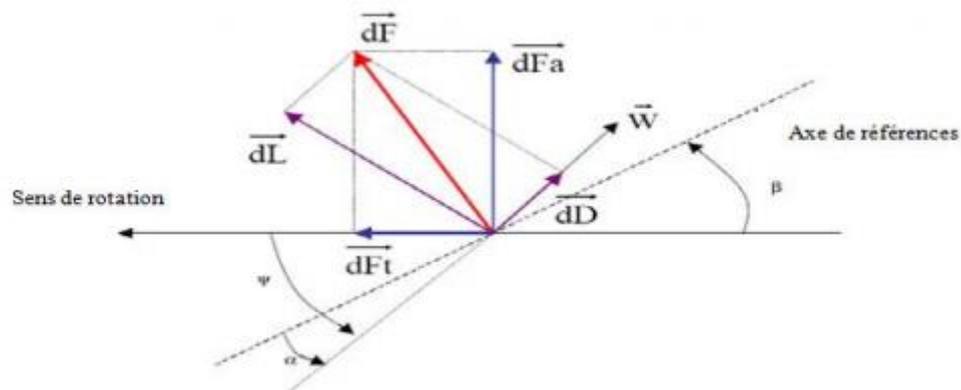


Figure 2.9 : les expressions des forces. [43]

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

On peut décomposer la force résultante \overline{dF} de la manière suivante :

-La portance \overline{dL} , normale a la direction du vent apparent .

-La force de trainée \overline{dD} , parallèle a la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

-La poussée axiale \overline{dF}_a , perpendiculaire au plan de rotation

-La poussée tangentielle \overline{dF}_t , dans la direction rotation.

On déduit aisément les expressions de la poussée axiale et tangentielle en fonction de la portance et de trainée :

$$\overline{dF}_t = \overline{dL} \sin(\Phi) - \overline{dD} \cos(\Phi) \quad (2.1)$$

$$\overline{dF}_a = \overline{dL} \cos(\Phi) - \overline{dD} \sin(\Phi) \quad (2.2)$$

C'est le couple résultant des forces tangentielles qui va provoquer la rotation de la turbine.

Les modules des forces \overline{dL} et \overline{dD} :

$$\overline{dL} = \frac{1}{2} \cdot \rho w^2 \cdot dA \cdot C_L \quad (2.3)$$

$$\overline{dD} = \frac{1}{2} \cdot \rho w^2 \cdot dA \cdot C_D \quad (2.4)$$

Avec :

dA =Surface du tronçon de la pale.

C_L =Coefficient de portance (sans dimension)

C_D =Coefficient de trainée (sans dimension)

w :Module du vent apparent.

2.7. Notions théoriques sur L'éolien

2.7.1 Principe de conversion D'énergie cinétique du vent(Vf)

Un système éolien, quel que soit sa technologie convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- La conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ; cette conversion se fait au niveau de la turbine.
- La conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique au niveau de la génératrice.

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

Suivant la technologie utilisée la connexion de la génératrice au réseau se fait soit directement, soit par l'intermédiaire total ou partiel d'une interface d'électronique de puissance. Une transmission mécanique assure la liaison entre la turbine et le rotor de la génératrice.

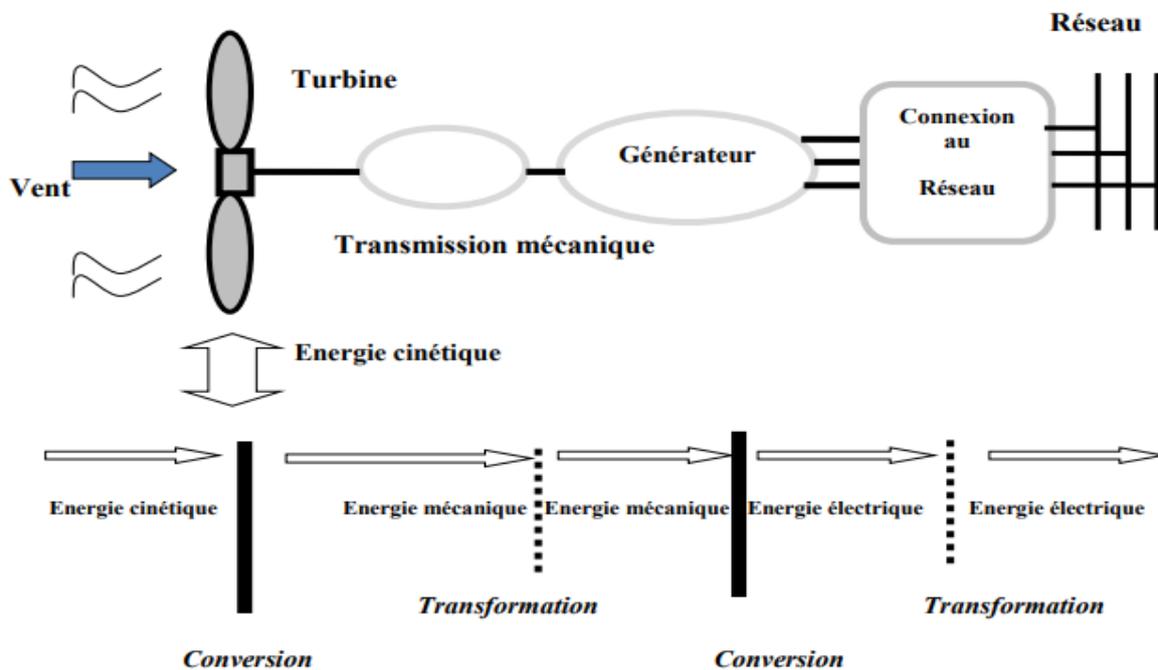


Figure 2.10 : principe de la conversion d'énergie d'une éolienne.

Si on considère une masse d'air, m (kg), qui se déplace avec la vitesse v (m/s), l'énergie cinétique de cette masse est :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad (2.5)$$

Si pendant une unité de temps, cette énergie pouvait être complètement récupérée à l'aide d'une hélice qui balaie une surface A (m^2), située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée fournie serait alors :

$$P_v = \frac{1}{2}\rho Av^3 \quad (2.6)$$

ρ : Masse volumique de l'air.

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz.

$$P_{max} = \frac{16}{27}P_v \quad (2.7)$$

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini par la relation suivante.

$$C_p^{opt} = \frac{p_{max}}{p_v} = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (2.8)$$

En réalité, jusqu'à présent, seulement 60% à 70% de cette puissance maximale théorique est peut être exploitée par les engins les plus perfectionnés. Ce rendement, appelé coefficient de puissance C_p de l'éolienne, est propre à chaque voilure. Ce coefficient lie la puissance éolienne à la vitesse du vent.

$$P_e = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v^3 C_p \quad (2.9)$$

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ :

$$C_p = C_p(\lambda) \quad (2.10)$$

Avec

$$\lambda = \frac{R\Omega}{v} \quad (2.11)$$

Où R est le rayon de l'hélice et $R\Omega$ est la vitesse linéaire périphérique en bout des pâles.

Compte tenu du rapport du multiplicateur de vitesse G , la puissance mécanique P_g disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_g = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 v^3 C_p \left(\frac{R\Omega}{Gv} \right) \quad (2.12)$$

Cette relation nous donne la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation du générateur Figure (2.11)

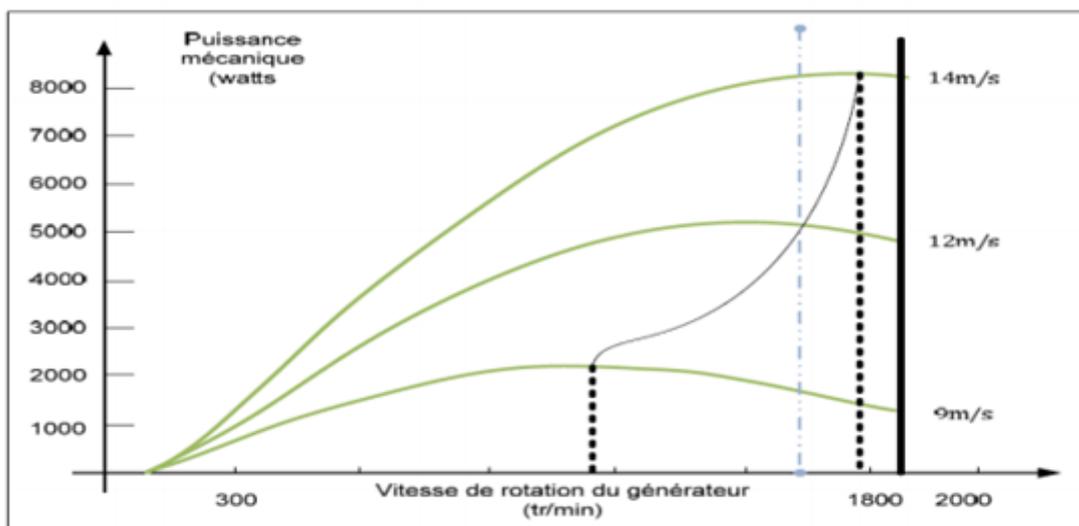


Figure 2.11 : Caractéristiques de la puissance mécanique en fonction de la vitesse de rotation.

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure.2.11) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.[43]

2.7.2. Le théorème de BETZ

La théorie globale du moteur éolien s'applique essentiellement à axe horizontal. Betz suppose que le générateur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse et à l'infini en aval d'une vitesse, représenté sur la figure (2.12) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur est nécessairement inférieure de la vitesse V_2 en aval. Soit donc V_1 la vitesse de l'air en amont, V_2 celle en aval V et celle au travers de S , la section balayée par les pales de l'éolienne.

Soient $(\frac{V_1+V_2}{2})$ la vitesse moyenne et m_{cste} la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde :

$$m_{cste} = \frac{\rho s(V_1+V_2)}{2} \quad (2.13)$$

La puissance P_m alors extraite s'exprime par la moitié du produit de la masse et de la diminution de la vitesse du vent (seconde loi de Newton) :

$$P_m = \frac{m_{cte}(V_1^2+V_2^2)}{2} \quad (2.14)$$

Soit en remplaçant m_{cte} par son expression dans (2.14) :

$$P_m = \frac{\rho s(V_1+V_2)(V_1^2+V_2^2)}{4} \quad (2.15)$$

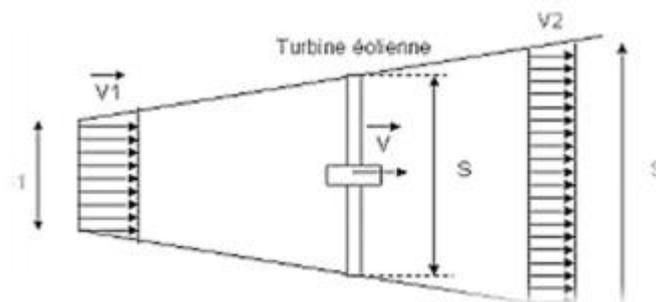


Figure 2.12 : Tube de courant autour d'une éolienne.

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse. Soit à la vitesse V_1 , la puissance P_{mt} correspondante serait alors :

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

$$p_{mt} = \frac{\rho s V_1^3}{2} \quad (2.16)$$

Le ratio entre la puissance extraite du vent et la puissance totale théoriquement disponible est alors :

$$\frac{p_m}{p_{mt}} = \frac{\left(1 + \left(\frac{V_2}{V_1}\right)\right)\left(1 - \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^2\right)}{2} \quad (2.17)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus selon (figure 2.13) on s'aperçoit que le rapport p_m/p_{mt} appelé aussi coefficient C_p présente un maximum de $16/27$ soit 0.59. C'est cette limite théorique, appelée limite de betz, qui fixe la puissance maximale extraite pour une vitesse du vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent [44]

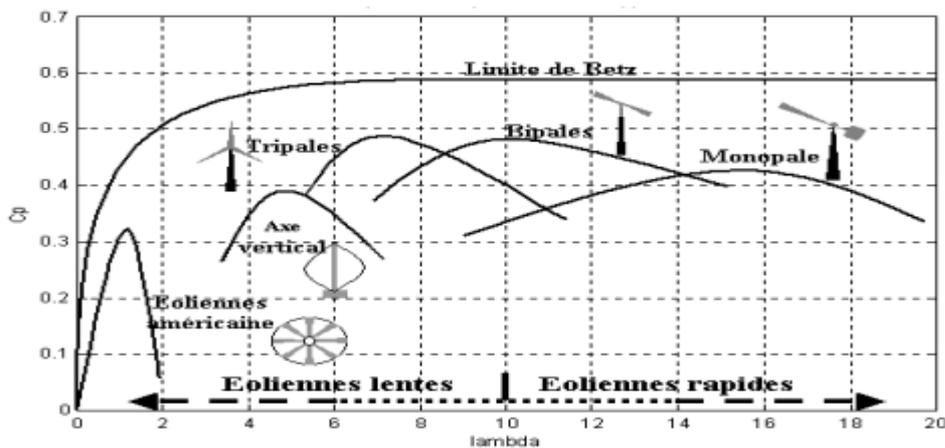


Figure 2.13 : Coefficient de puissance pour les différents Types d'éoliennes.

2.7.3. Eoliennes à vitesse fixe et variable

2.7.3.1. Eolienne à vitesse fixe

Les turbines éoliennes peuvent également être classifiées à des turbines à vitesse fixe, et autres à vitesse variable. Comme leur nom l'indique les turbines à vitesse fixes tournent à une vitesse relativement constante. Cette vitesse est déterminée par le rapport du réducteur de vitesse, la fréquence du réseau électrique et le nombre de pôles de la génératrice. Ces turbines atteignent un rendement de conversion maximum uniquement pour une vitesse de vent donnée, et l'efficacité du système dégrade une fois la vitesse de vent change. La turbine à vitesse fixe est protégée par un contrôle aérodynamique des éventuelles rafales de vent, elle génère une puissance électrique très fluctuante par rapport aux autres sources d'énergies qui offrent une énergie constante dans le temps et facilement réglable.

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

2.7.3.2. Eolienne à vitesse variable

D'une autre part les turbines à vitesse variable, peuvent atteindre un rendement de conversion d'énergie sur une vaste plage de vitesse de vent. La turbine change constamment sa vitesse de rotation dépendamment de la vitesse du vent pour maximiser la puissance. Dans ce cas, la vitesse spécifique λ , qui représente la vitesse du bout de la pale par rapport à la vitesse du vent, peut être maintenue dans ces valeurs optimales de manière à réaliser une extraction maximale de la puissance électrique. Afin que la vitesse de la turbine soit ajustable, l'éolienne est connectée au réseau électrique via des convertisseurs de puissance.

Comme le montre le tableau ci-dessous, les principaux avantages des turbines à vitesse variable sont leurs rendements de conversion d'énergie élevé, une énergie électrique de bonne qualité et qui ne présente aucune nuisance pour le réseau électrique, et finalement le stress mécanique réduit sur l'ensemble de la chaîne mécanique. Leurs principaux inconvénients sont le coût de construction et les pertes énergétiques dues à l'utilisation des convertisseurs de puissance. Toutefois, ce coût additionnel et les pertes sont compensés par la forte production d'énergie électrique [7].

| Mode de fonctionnement | Avantages | Inconvénients |
|------------------------|---|---|
| Vitesse Fixe | <ul style="list-style-type: none">• Simple, robuste, fiable.• Faible cout de construction et maintenance. | <ul style="list-style-type: none">• Rendement de conversion d'énergie faible.• Fort stress mécanique qui augmente le cout de la structure devant supporter ceci.• Fluctuation importante de la puissance. |
| Vitesse Variable | <ul style="list-style-type: none">• Fort rendement de conversion d'énergie.• Puissance électrique de meilleure qualité.• Stress mécanique réduit. | <ul style="list-style-type: none">• Cout et pertes supplémentaires dues à l'utilisation des convertisseurs.• Contrôle du système plus Complicqué. |

Tableau 2.2 : Comparaison des Eoliennes a Vitesse Fixe et a Vitesse Variable.

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

2.7.4. Coefficient de puissance

Sachant que le coefficient de puissance est une grandeur propre pour chaque éolienne et dépend de la vitesse relative λ (fonction de la vitesse du vent) et de l'angle d'orientation des pales β . La Figure 2.14 donne les différents coefficients de puissance pour chaque type d'éolienne.

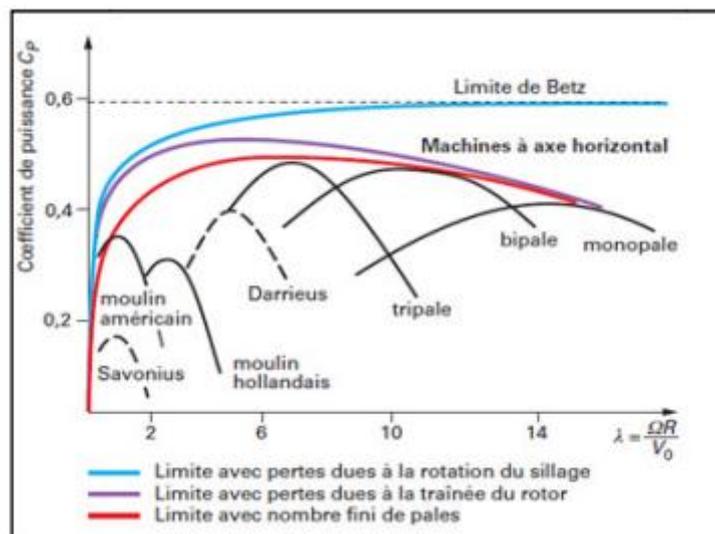


Figure 2.14 : Coefficient de puissance pour différentes turbines éoliennes.

A titre d'exemple, l'expression du coefficient de puissance d'une turbine éolienne tripale de 1.5 MW est approximé par l'équation 2.18 :

$$C_p(\lambda, \beta) = (0.5 - 0.0167(\beta - 2)) \sin \left[\frac{\pi(\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3(\beta - 2)} \right] - 0.00184 (\lambda - 3) (\beta - 2) \quad (2.18)$$

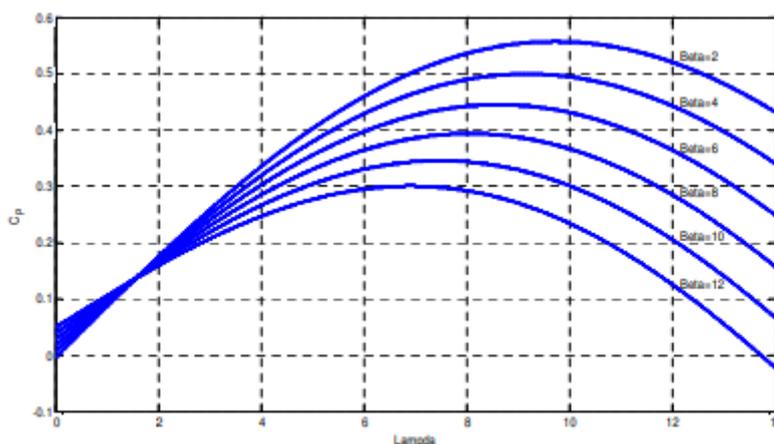


Figure 2.15 : Caractéristique $C_p(\lambda, \beta)$ d'une éolienne tripale de 1.5 MW. [37]

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

2.7.5 Coefficient de couple

Le coefficient de couple C_m est assez proche du coefficient de puissance C_p . Il est fort utile afin d'estimer la valeur des couples pour différents points de fonctionnement, notamment à vitesse de rotation Ω_t nulle, ce qui correspond à une valeur de C_p nulle pour une valeur de C_m non nulle.

En combinant les équations précédentes la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur peut s'exprimer par [45] :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^2 \quad (2.19)$$

Avec :

$$\lambda_n = \frac{\Omega_t R}{V_1} \quad (2.20)$$

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$T_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda V} = \frac{C_p}{\lambda} \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 V^2 \quad (2.21)$$

La valeur du coefficient de couple est déterminée par la formule suivante :

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{2T_t}{\rho S_t R_t V^2} \quad (2.22)$$

T_t : Couple de la turbine éolienne (N.m). [45]

2.7.6 Distribution de Weibull

Le modèle le plus utilisé pour traduire la variation des vitesses de vent est la loi de distribution de Weibull Sa densité de probabilité se présente sous la forme :

$$f(V) = \left(\frac{k}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^k\right) \quad (2.23)$$

En assimilant les fréquences aux probabilités, la densité de probabilité $f(V)$ représente la distribution en fréquences des vitesses mesurées.

k et C sont des paramètres appelés communément les paramètres de Weibull. Le paramètre k (facteur de forme) est sans dimension et caractérise la forme de la distribution de fréquence alors que C détermine la qualité du vent (facteur d'échelle). Ce dernier a la dimension d'une vitesse.

La détermination de ces paramètres permet la connaissance de la distribution des vents pour un site donné. Le traitement peut se faire directement ou en passant par les fréquences par classes en considérant les moyennes.

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

La fonction de répartition est donnée par :

$$F(V \leq V_x) = \int_0^{V_x} f(V) dV = 1 - \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \quad (2.24)$$

$$F(V \geq V_x) = \int_{V_x}^{\infty} f(V) dV = \exp\left(-\left(\frac{V_x}{C}\right)^k\right) \quad (2.25)$$

2.8 Générateur diesel

Dans le cas des installations à sources d'énergies renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone. La fréquence du réseau est liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré. Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive. Quand le générateur diesel fournit de l'énergie au réseau, il sera connecté généralement à un bus CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels [47].

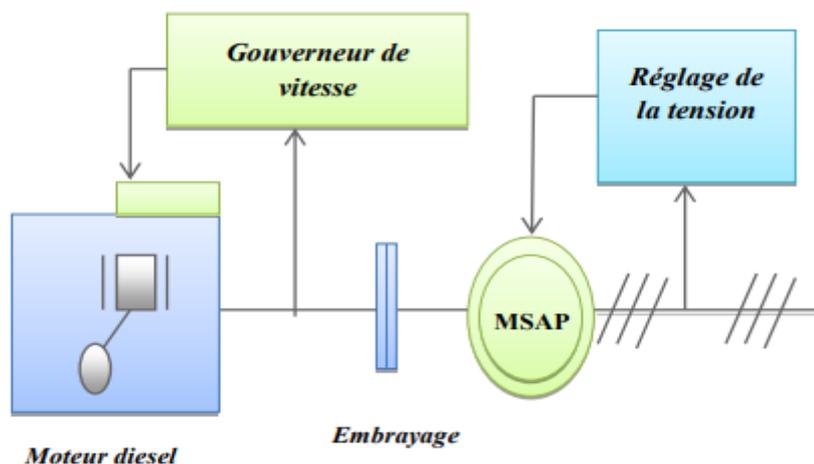


Figure2.16 : Configuration de générateur diesel.

2.9 Le moteur diesel

2.9.1 Définition

L'élément principal dans la construction du groupe diesel est le moteur diesel. On peut se considérer que les premières automobiles furent créées en 1890 construit avec un moteur allemand de Daimler. Mais en 1892 que M. Rudolf Diesel invente le moteur diesel [44]. Il

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

s'agit d'un moteur à allumage par compression ayant un rendement plus élevé que les machines à vapeur et les moteurs à essence à l'époque. Les premiers moteurs diesel rejoignent le monde de l'industrie sont reliés plus précisément avec le marché d'automobile dans les années 1920. La combustion dans les moteurs diesel s'effectue avec un mélange hétérogène composé d'air et de carburant diesel. Ce mélange est favorable à l'auto-inflammation et n'a donc pas besoin d'étincelle pour s'enflammer. Au début, le diesel est injecté dans le cylindre au moyen d'une pompe à air mais avec les évolutions de la technologie, le carburant est injecté au moyen d'un système haut pression qui pulvérise le carburant [45]. La figure 2.17 montre les différents composants d'un moteur diesel.

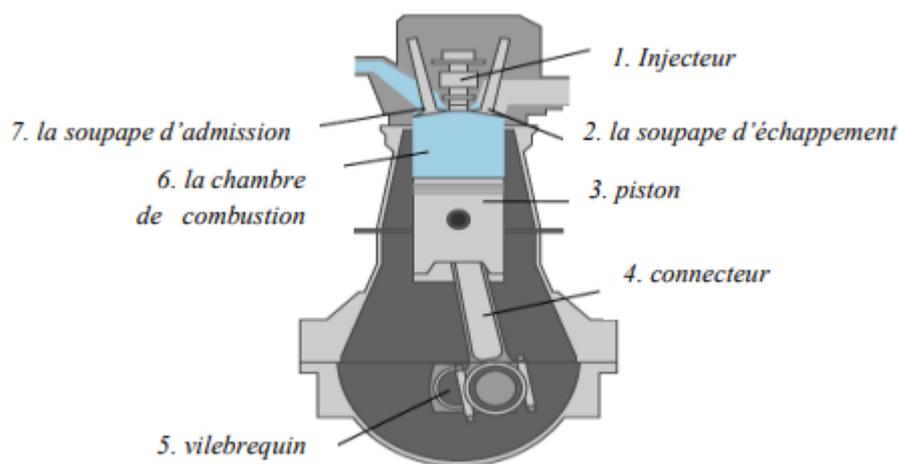


Figure 2.17 les éléments du moteur diesel.

2.10 les différents types de machines électriques utilisées

En général les machines les plus utilisées sont :

2.10.1 Les machines synchrones

C'est ce type de machines qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment pour de très grandes puissances (centrale thermique, hydrauliques et nucléaire) la gamme de puissance de ces générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien varie de 500 kW à 2 MW [41].

2.10.2 Les machines asynchrones

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator. Ces générateurs asynchrones utilisés dans le domaine éolien de moins de 20kw [42].

2.10.3 Les machines à courant continu

Ce type présente une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge, mais ces machines sont chères et ont un grand poids [43].

2.10.4 Les générateurs à réluctances variables

Sont des machines mécaniquement robustes ; ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses, une large marge de variation de la vitesse de rotation et leur commande est simple [26].

2.11 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable.

Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Elles peuvent être très différentes selon que l'on est en forte ou en petite puissance, en fonctionnement à vitesse fixe (ou peu variable) ou à vitesse variable[41].

2.11.1 Générateur Asynchrone

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator.

2.11.1.1 Génératrices asynchrones à cage

C'est dans les grandes puissances que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Au départ, le faible coût et la standardisation des machines asynchrones a conduit à une très large domination des génératrices asynchrones à cage directement couplées au réseau jusqu'à des puissances dépassant le mégawatt. Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire .

Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau. Dans le cas des aérogénérateurs de dimensions importantes (puissance, rayon des

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

pales), la vitesse de rotation est peu élevée, ce que nécessite d'insérer un multiplicateur mécanique de vitesse .

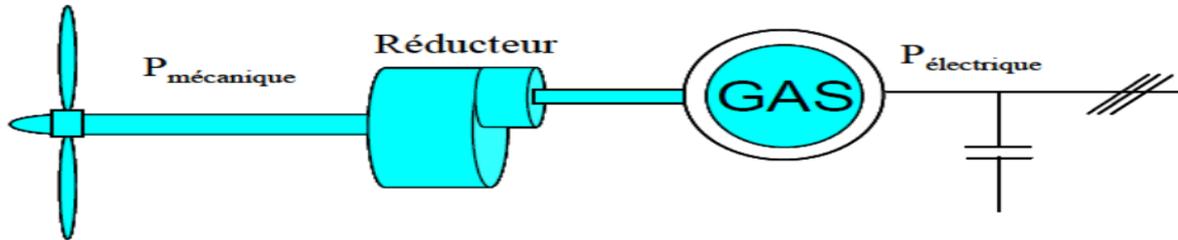


Figure 2.18 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe).

Une autre structure consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variateur de fréquence dimensionné pour la puissance transitoire, et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée.

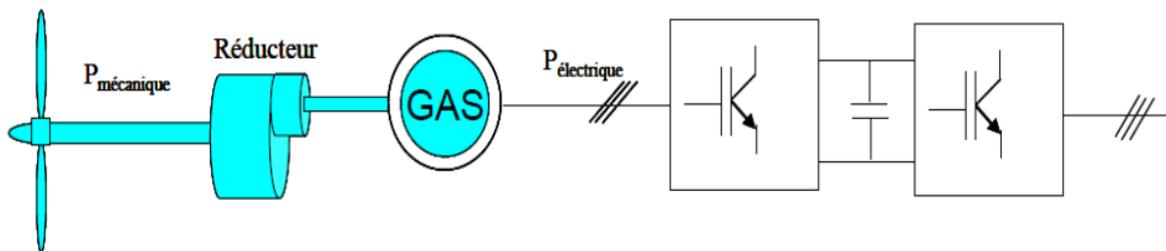


Figure 2.19 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable.

2.11.1.2 Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA)

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de générateur asynchrone doublement alimenté. Dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur, qui fait office de variateur de fréquence. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. Ce système permet un fonctionnement à vitesse variable sur une plage spécifique de fonctionnement. Le convertisseur compense la différence des fréquences mécanique et électrique par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor.

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

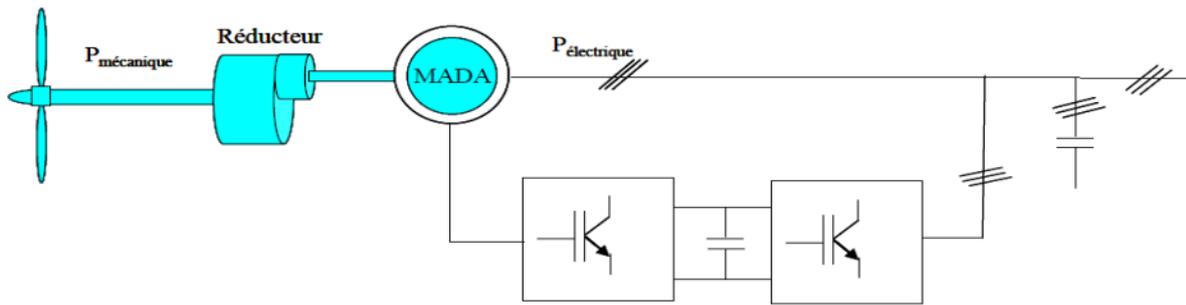


Figure 2.20 : Système éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation.

2.11.2 Génératrices synchrones

L'avantage du générateur synchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique de la génératrice synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut s'utiliser pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses [40].

Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique, lequel permet un fonctionnement à vitesse variable.

2.11.2.1 Générateur Synchrone à Aimants Permanents

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif.

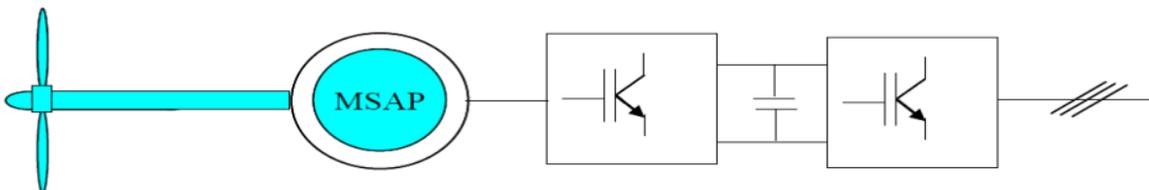


Figure 2.21 : Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents.

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

2.11.2.2 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

C'est ce type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille [39].

On trouve également des machines synchrones associées à un multiplicateur de vitesse. Ces machines fonctionnent à vitesse variable. Elles débitent sur un redresseur commandé, puis la tension continue est convertie à travers un onduleur MLI pour être compatible avec le réseau.

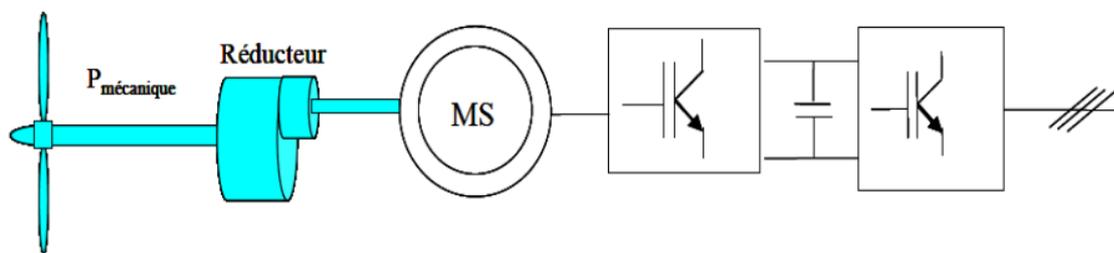


Figure 2.22 : Système éolien basé sur la machine synchrone à rotor bobiné.

2.12. Les Gisements éoliens en Algérie

Un programme de traitement de données des mesures de la vitesse du vent élaboré par l'Office Nationale de la Métrologie et le Centre de Développement des Energies Renouvelable (CDER) permet de établir une carte du vent de l'Algérie (la vitesse moyenne annuelle du vent) comment présenter dans la Figure 2.23

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

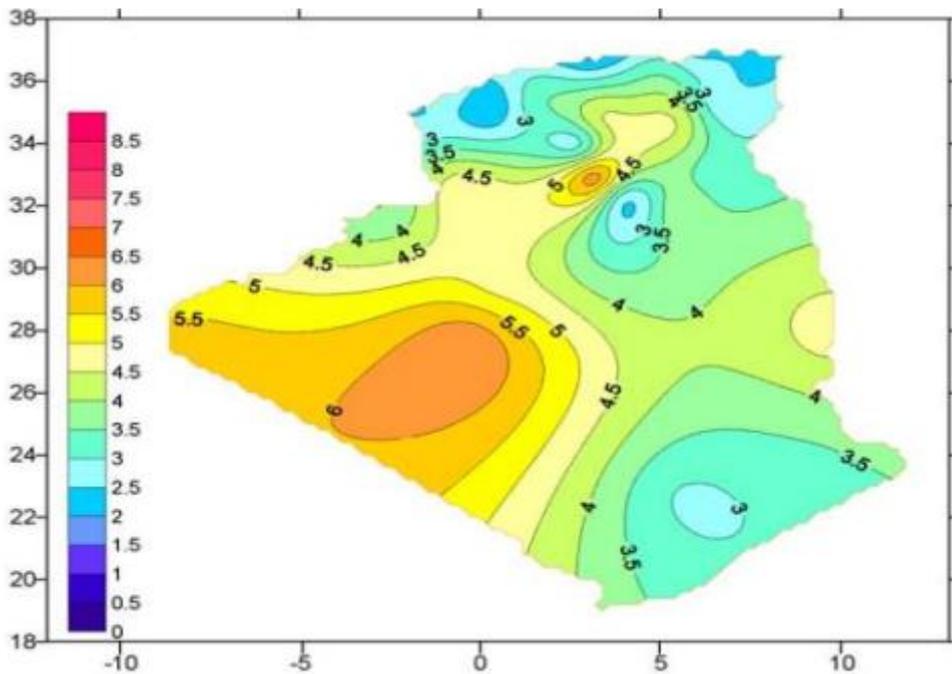


Figure 2.23. Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol.[46]

L'Algérie est généralement très venteuse 78% de sa surface se caractérise par des vitesses supérieures à 3 m/s, avec environ 40% de ces vitesses supérieures à 5 m/s. Les cartes de vent montrent que les vitesses de vent les plus élevées sont réparties dans le sud tandis que le nord est généralement moins venteux. On a également constaté que la région sud-ouest présente un grand potentiel avec des vitesses dépassant 4 m/s pour le site de Bechar, 5 m/s pour le site de Tindouf et même plus de 6 m/s pour le site d'Adrar. Le fait que la région du sud-ouest du pays dispose d'un potentiel éolien significatif peut être attribué à deux acteurs. Le premier est qu'il est situé dans une zone de pression différence (vent dans les latitudes près de 30°N). La seconde est qu'il est proche de l'océan Atlantique (les perturbations météorologiques atteignent la région avec une intensité élevée). D'autre part, dans le sud-est du pays, on a constaté que le potentiel éolien est relativement plus faible par rapport à la partie ouest où les vitesses les plus élevées 4.5 m/s ont été observées pour la région d'In- amenas[46].

Enfin, on constate que les trois régions situées au sud-ouest du Sahara (Tindouf, Bechar et Adrar) semblent être les plus favorables à l'installation de fermes éoliennes car elles cumulent à elles seules un potentiel économique approchant les 24 TWh par an. Mais l'exploitation du potentiel éolien de ces régions se heurte souvent à de fortes contraintes d'ordre technique et économique citant entre autres l'éloignement et l'absence de connexion avec le réseau électrique national ce qui entraînerait un investissement plus lourd[47].

Chapitre 2 : Les Composantes du Système

2.13. Données météorologiques de la région d'Adrar

La région d'Adrar a climat caractérisant un type continental d'désertique, une pluviométrique très faible avec des précipitations rares et irrégulières d'une année à une autre et par un régime thermique qui présente lui aussi de grandes variations avec des hivers rigoureusement froids et des étés très chaud. La fréquence des vents est très grande durant toute l'année. Les vitesses sont très élevées puisque la fréquence des vents de vitesses supérieure à 5 m/s est de l'ordre de 20 à 40 % (voir Tableau 2.3 ci-dessous), [48]

| Mois | Janvier | Février | Mars | Avril | Mai | Juin | Juillet | Aout | Septemb | Octobre | Novembr | Decembr |
|-------------------|---------|---------|------|-------|------|------|---------|------|---------|---------|---------|---------|
| T_{max} (°C) | 23.2 | 22.4 | 29.2 | 34.3 | 37 | 42.1 | 46.3 | 45 | 43.5 | 31.6 | 27.1 | 21.3 |
| T_{min} (°C) | 7.6 | 6 | 12.8 | 18.5 | 20.8 | 25.4 | 28.7 | 29.1 | 26.7 | 17.3 | 11.4 | 6.2 |
| Humidité (%) | 39.5 | 22.9 | 20.3 | 19.8 | 17.5 | 13.4 | 9 | 12 | 13.1 | 34.2 | 25.3 | 37 |
| V(m/s) | 5.2 | 6.2 | 6.8 | 6.2 | 6.4 | 7.4 | 5.1 | 5.6 | 4.7 | 6.2 | 5 | 5.9 |

Tableau 2.3. Données climatiques du site étudié.

Notre étude dépend essentiellement sur la vitesse du vent. Le Tableau 2.3 illustre les vitesses moyennes journalières du vent de chaque mois de l'année 2011, qui ont été mesurées à la station météorologique de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) à Adrar [49].

2.14. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz).

Chapitre III

**Modélisation et
simulation de
SHED**

3.1. Introduction

Dans ce chapitre on va établir un modèle mathématique et des schémas bloc qui va traduire le comportement des composants de SHED.

La modélisation est importante pour la conception de SH qui contient des composants de différents domaines qui sont couplés à l'objectif de déduire les performances optimales.

La simulation est caractérisée par la conception des systèmes basés sur les diagrammes blocs. Le contenu de ce chapitre montre la modélisation et la simulation d'une turbine tripale horizontale de type **NORDEX N27-150** pour la première modélisation, et pour la deuxième on a fait un moteur diesel de type **FG WILSON P150-1** et une génératrice.

3.2. L'outil Matlab/Simulink

MATLAB fait partie d'un ensemble d'outils intégrés dédiés au traitement du Signal. En complément du noyau de calcul Matlab, l'environnement comprend des modules optionnels qui sont parfaitement intégrés à l'ensemble :

- Une vaste gamme de bibliothèques de fonctions spécialisées (Toolboxes).
- Simulink, un environnement puissant de modélisation basée sur les schémas-blocs et de simulation des systèmes dynamiques linéaires et non linéaires.
- Des bibliothèques de blocs Simulink spécialisés (Blocksets).
- D'autres modules dont un Compilateur, un générateur de code C, un accélérateur.
- Un ensemble d'outils intégrés dédiés au Traitement du Signal : le DSP Workshop.

SIMULINK est une plate-forme de simulation multi-domaine et de modélisation des systèmes dynamiques.

Il fournit un environnement graphique et un ensemble de bibliothèques contenant des blocs de modélisation qui permettent le design précis, la simulation, l'implémentation et le contrôle de systèmes de communication et de traitement du signal [50].

La figure (3.1) représente la bibliothèque Simulink dans lequel sont insérés les différents éléments de la simulation.

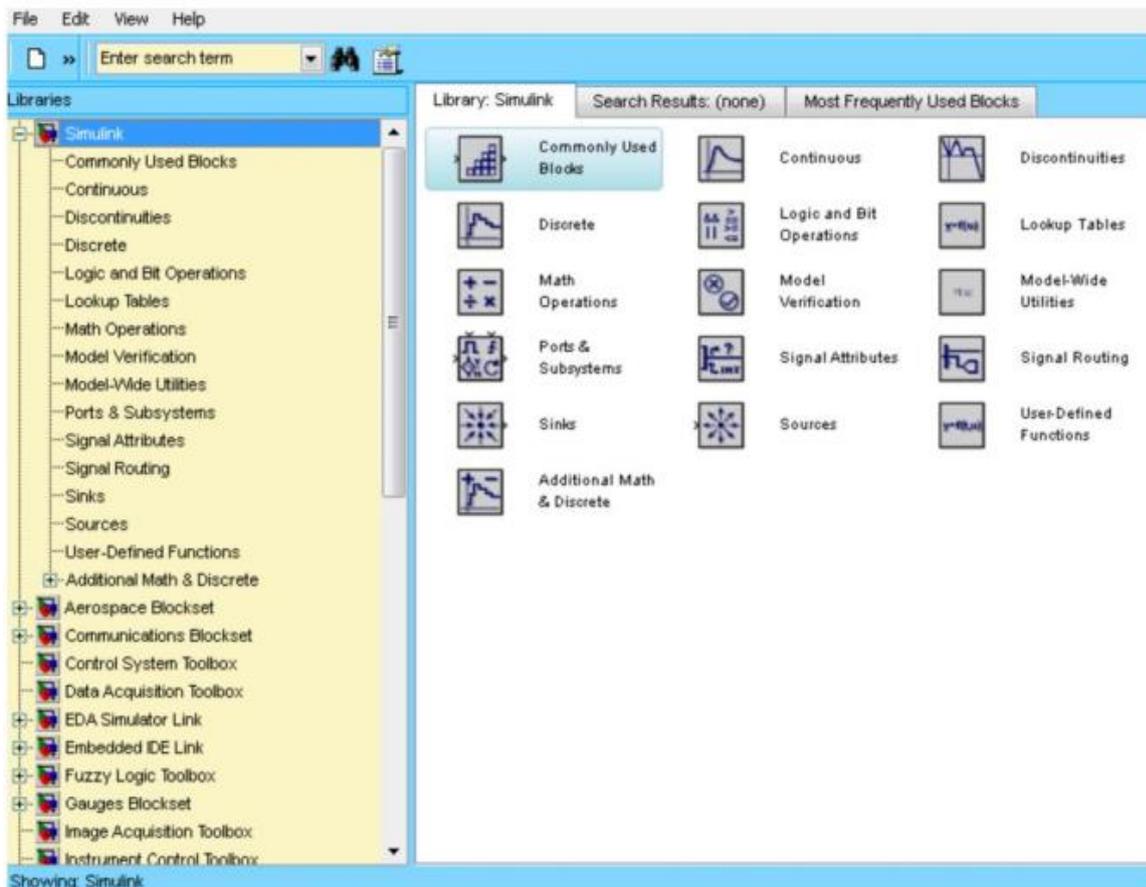


Figure 3.1 : Bibliothèque SIMULINK.

3.3. Contrôle et gestion de l'énergie du système hybride

La gestion d'énergie est conclue après la production et la consommation de l'énergie afin d'obtenir un bilan énergétique optimal, et fournir une énergie fiable et de qualité adressée aux consommateurs.

La non satisfaction d'énergie renouvelable consiste toujours à faire un jumelage avec une autre source d'énergie, pour notre cas on a alimenté notre système par un générateur diesel en parallèle, d'une façon discontinue (lorsque l'éolienne s'arrête le générateur diesel le remplace). Alors :

- Les générateurs diésel demeurent la source primaire pour contrôler la tension et la fréquence du réseau.
- La synchronisation en fréquence s'effectue en fonction du générateur diesel.
- Les générateurs diésel sont observés en continu afin d'être prêt à toute éventualité.

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de SHED

La figure représente le plan de la gestion de classification des composantes de SHED étudiés dans notre cas, ce qui permet au système de supervision de décider combien et quelles sources il faut mettre en marche.

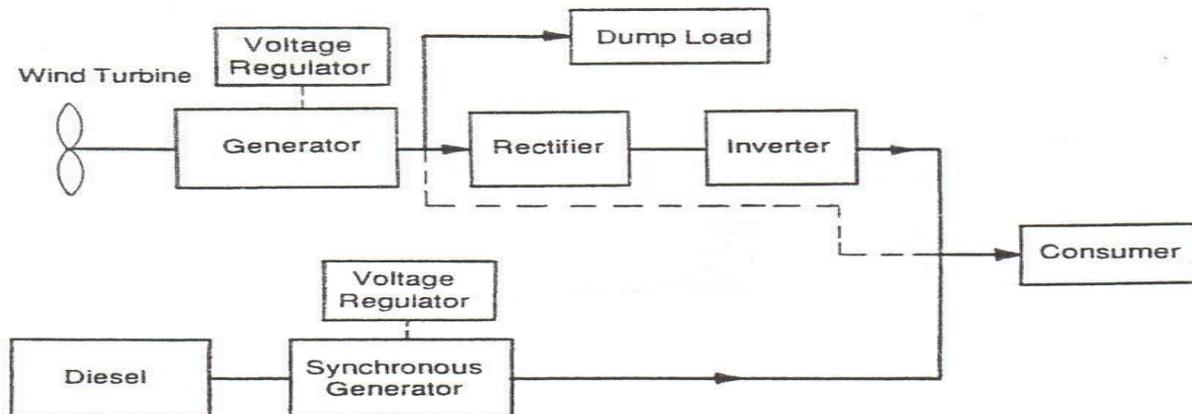


Figure 3.2 : Contrôle et gestion de l'énergie du système hybride.

3.4. Modélisation de SHED

Le système de conversion de l'énergie éolienne étudié est représenté sur la figure (3.3)

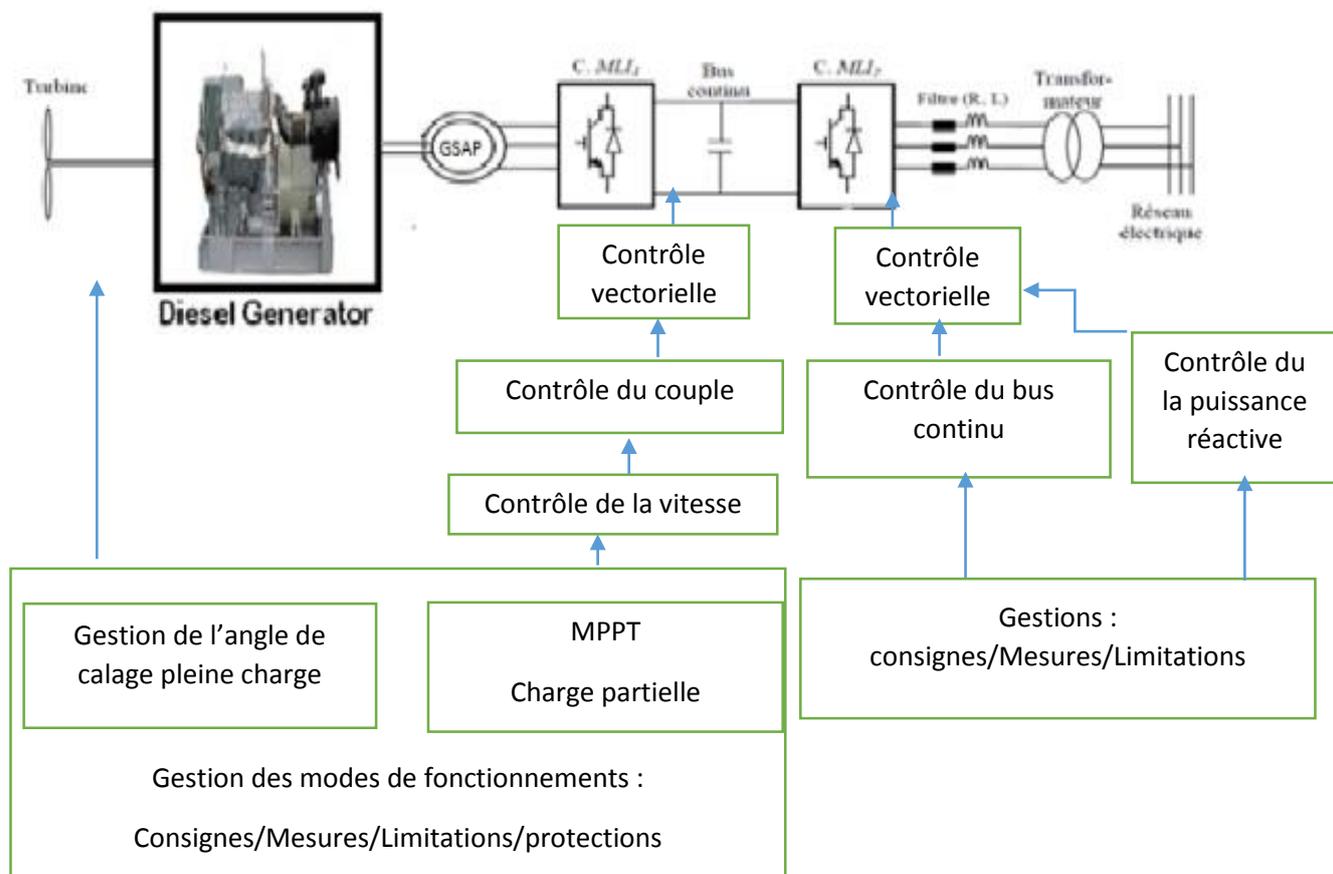


Figure 3.3 : Système de conversion de l'énergie éolienne étudié. [51]

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de SHED

Cette structure comprend, outre la génératrice synchrone à aimants permanents, un redresseur MLI1, un bus continu, un onduleur MLI2, une liaison au réseau via un filtre. Dans la structure de commande, le contrôle de la génératrice en couple est assuré par le redresseur MLI1 et l'onduleur à MLI2 permet de contrôler la tension du bus continu, la puissance réactive, et de synchroniser l'ensemble au réseau.

Cette structure nous offre une possibilité de découplage du fonctionnement de la génératrice et la gestion de l'injection de puissance dans le réseau électrique. On peut donc opérer l'ensemble en deux parties. Une partie englobe la turbine et la génératrice commandée par le convertisseur côté génératrice (CCG), l'autre partie concerne la connexion au réseau électrique à travers l'onduleur MLI2 jouant le rôle du convertisseur côté réseau (CCR), [51,53]. Cette étude différenciée par commodité sera détaillée dans la suite de notre travail.

3.5. Modélisation des composants de SHED

3.5.1. Turbine

La turbine retenue comprend trois pales profilées orientables de longueur R . Elles sont fixées à travers un moyeu sur un arbre d'entraînement tournant à une vitesse Ω_{tr} . Cet arbre entraîne une génératrice synchrone à grand nombre de pôle dans notre cas.

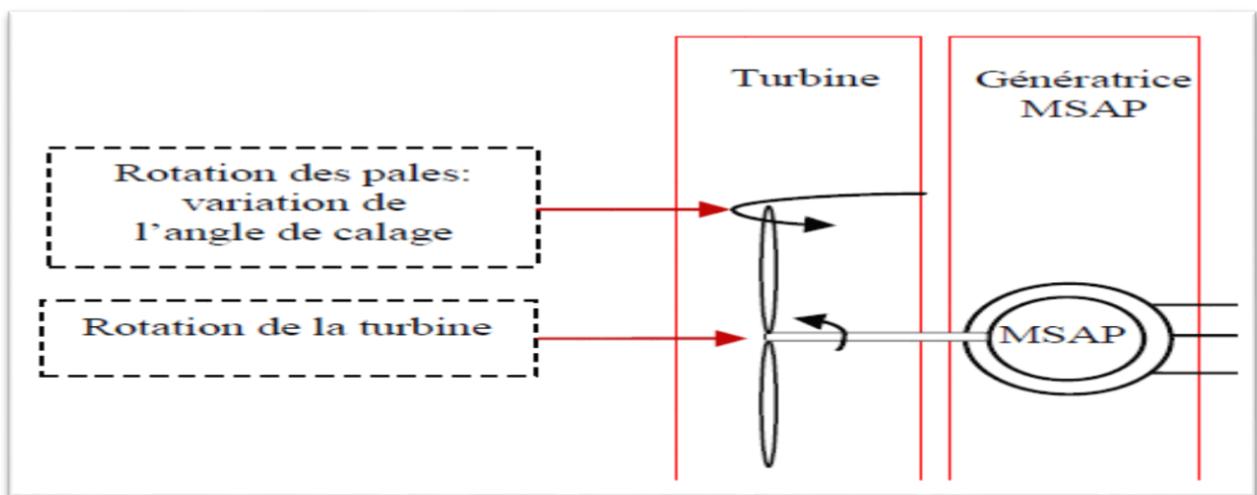


Figure 3.4. La turbine [52].

Les trois pales sont considérées de conception identique et possèdent donc :

- Le même moment d'inertie J_{pales}

Ces pales sont orientables et chacune d'elles reçoit une force F_1 , F_2 , F_3 qui dépend de la vitesse de vent qui lui est appliquée

L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de SHED

- Son moment d'inertie J_a

Le rotor de la génératrice possède :

- Un moment d'inertie J_g

Le rotor transmet un couple entraînant C_{tr} à la génératrice électrique et tourne à la vitesse notée Ω_{tr} . Si l'on considère une répartition uniforme de la vitesse du vent sur toutes les pales et donc une égalité de toutes les forces de poussée ($F_1 = F_2 = F_3$) alors on peut considérer l'ensemble des trois pales comme un seul et même système mécanique dont on peut simplifier la modélisation. On obtient alors un modèle mécanique comportant deux masses, [53].

La transmission mécanique entre la turbine et la génératrice peut être modélisée par le système d'équations (3.1). L'absence de multiplicateur de vitesse se justifie par la machine synchrone à aimants permanents retenue qui possède un grand nombre de paires de pôles ($p=75$) [58].

$$\begin{cases} C_{tr} - C_{em} - f_v \cdot \Omega_g = J_t \frac{d\Omega_t}{dt} \\ \Omega_{tr} = \Omega_g \\ J_t = J_{pales} + J_g + J_{arbre} \end{cases} \quad (3.1)$$

Avec :

f_v : Coefficient de frottements visqueux

3.5.1.1. Puissance aérodynamique

La puissance aérodynamique P_{tr} extraite par la turbine en fonction du facteur de C_p puissance est donnée par :

$$P_{tr} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{vent}^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (3.2)$$

Le paramètre C_p est sans dimension, il exprime la capacité de l'éolienne à extraire l'énergie du vent. Ce paramètre caractéristique de l'aérogénérateur est une fonction de la vitesse spécifique λ et de calage β et est appelé coefficient de puissance.

On définit la vitesse spécifique λ appelé également le ratio de la vitesse de bout de pale (tip-speed-ratio) comme étant le rapport de la vitesse tangentielle périphérique ($\Omega_{tr} \cdot R$) sur la vitesse instantané du vent V_{vent} [54,55,56].

$$\lambda = \frac{\Omega_{tr} \cdot R}{V_{vent}} \quad (3.3)$$

Avec :

R : Le rayon de l'aire balayé par les pâles

Ω_{tr} : La vitesse de rotation de la turbine.

3.5.1.2. Coefficient de puissance aérodynamique

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ exprime l'efficacité de la turbine dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Il dépend du nombre de pales du rotor et de leur profil aérodynamique (profils des sections variables sur la longueur). Celui-ci tient compte de la puissance nominale souhaitée, du type de régulation (pitch ou stall) et du type de fonctionnement (à vitesse fixe ou variable) de l'aérogénérateur, [55,56].

Le coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ peut être obtenu par des essais en soufflerie. Il se présente sous la forme d'une fonction non linéaire de la vitesse spécifique λ et de l'angle de calage β . La valeur maximale théorique du coefficient de puissance C_{pmax} est donnée par la limite de Betz [57] :

$$C_{pmax} = \frac{16}{27} \approx 0.5926 \quad (3.4)$$

On peut trouver dans la littérature des équations empiriques et non linéaires du coefficient de puissance qui modélisent sa variation par rapport à la vitesse spécifique et l'angle de calage des pales, [23,31]. La formule utilisée dans cette étude est la suivante, [23] :

$$\begin{cases} C_p(\lambda, \beta) = 0.73 \left(\frac{162}{A} - 0.58\beta - 0.002\beta^{2.14} - 13.2 \right) e^{-\frac{18.4}{A}} \\ A = \frac{1}{\frac{1}{\lambda - 0.002\beta} - \frac{0.003}{\beta^3 + 1}} \end{cases} \quad (3.5)$$

3.5.1.3. Couple aérodynamique

La variation instantanée de l'énergie cinétique du vent capturée par l'aéroturbine se transforme en puissance mécanique P_{tr} qui développe un couple moteur C_{tr} faisant ainsi tourner le rotor à une vitesse Ω_{tr}

$$P_{tr} = C_{tr} \cdot \Omega_{tr} \quad (3.6)$$

Ou autrement

$$C_{tr} = \frac{P_{tr}}{\Omega_{tr}} \quad (3.7)$$

En substituant l'expression (3.2) de P_{tr} dans (3.7) et en tenant compte de (3.3), l'expression du couple aérodynamique peut être présentée sous la forme :

$$C_{tr} = \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R^3 \cdot V_{vent}^2 \cdot C_q(\lambda, \beta) \quad (3.8)$$

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de SHED

Avec :

$$C_q(\lambda, \beta) = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \quad (3.9)$$

Avec :

$C_q(\lambda, \beta)$: Le coefficient du couple aérodynamique

3.5.1.4. Modèle de la turbine

Le schéma bloc illustré sur la **Figure 3.5** et **Figure 3.6** représente le modèle de l'ensemble de la chaîne cinématique de la turbine, est obtenu en modélisant et en regroupant sous MATLAB/SIMULINK les équations mathématiques présentées précédemment :

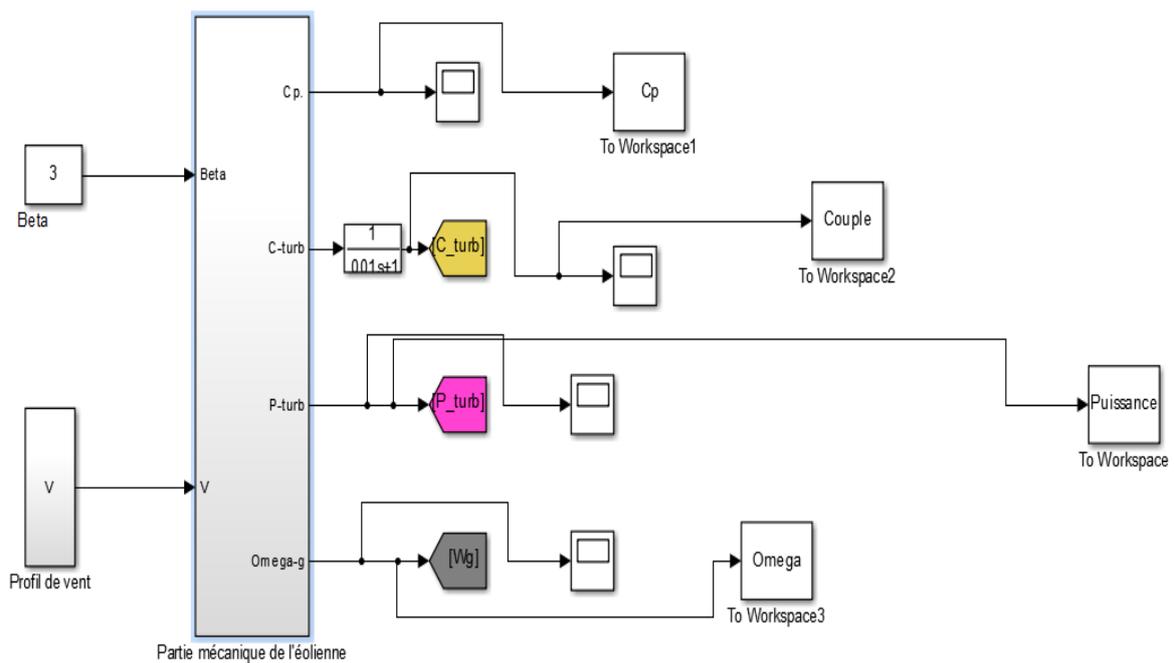


Figure 3.5. Schéma de bloc d'une turbine éolien.

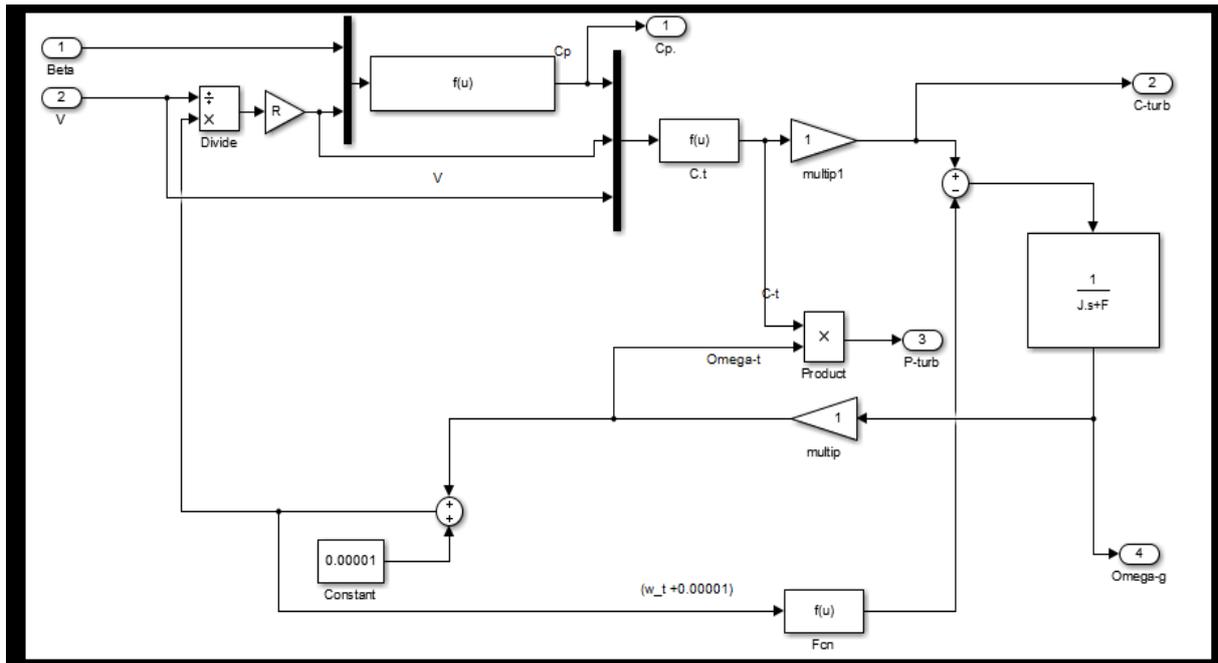


Figure 3.6 : Schéma de bloc avec sup système d'une turbine éolienne.

3.5.1.5.les résultats de la simulation :

Les figures ci-dessous représentent l'allure de différents paramètres du système en fonction du temps :

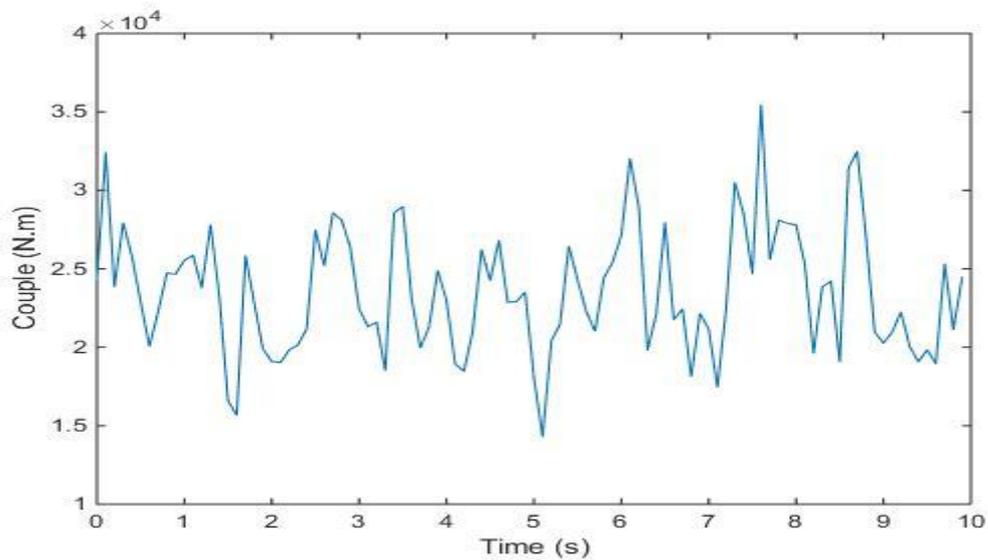


Figure 3.7 : la variation de couple turbine en fonction de temps.

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de SHED

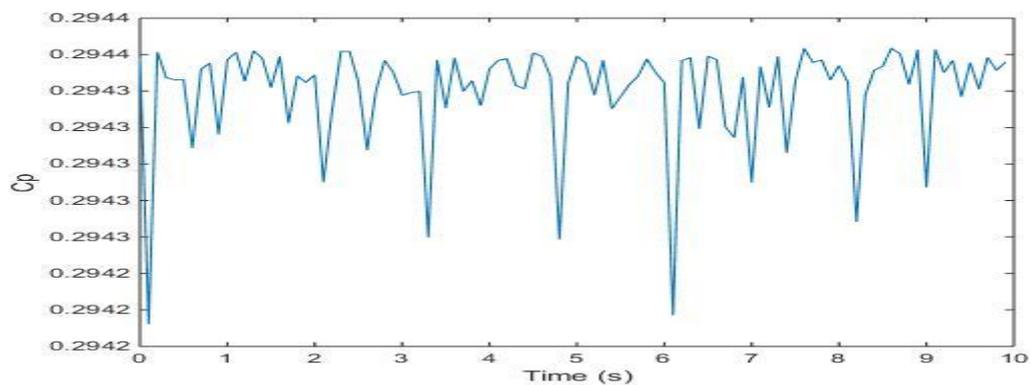


Figure 3.8 : coefficient aérodynamique en fonction de temps.

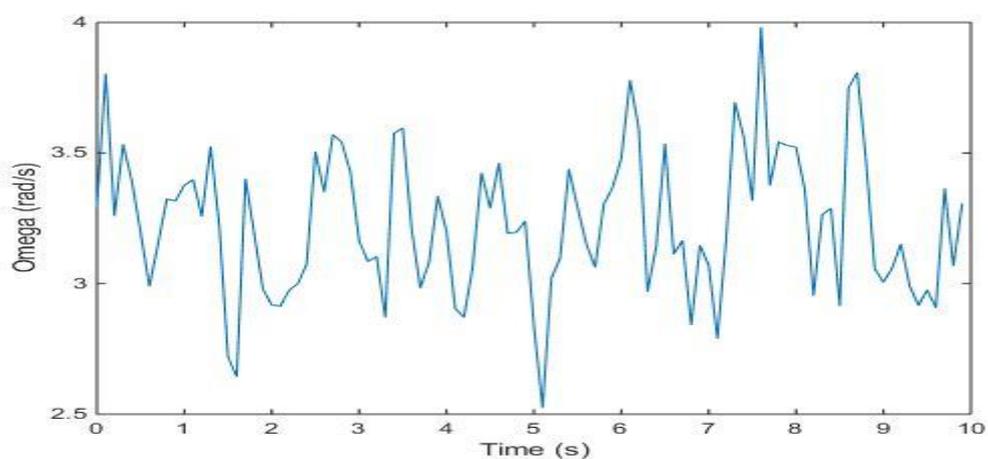


Figure.3.8 : la courbe de la vitesse de rotation en fonction de temps.

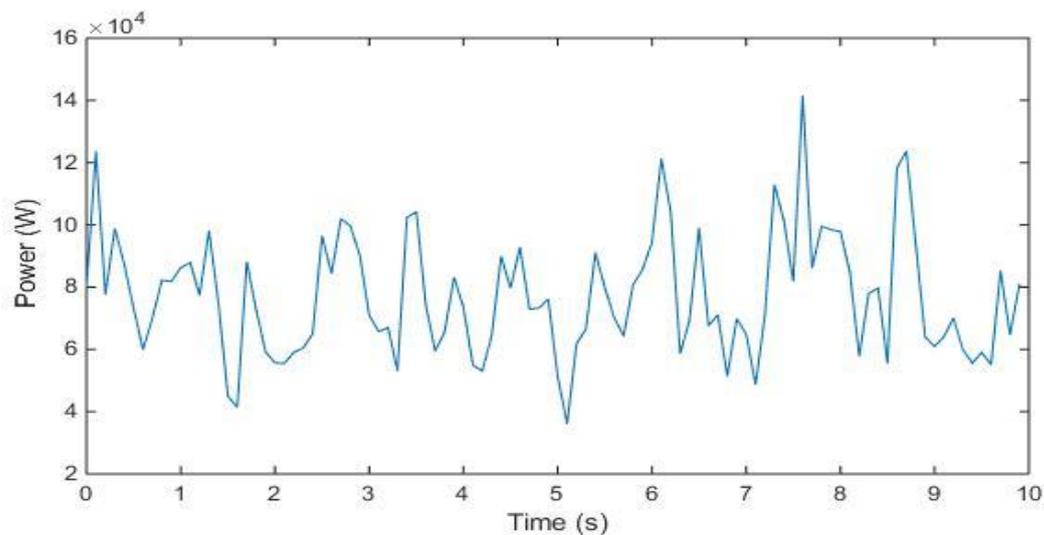


Figure.3.9 : la courbe de puissance en fonction de temps.

3.5.1.6. Interprétations des résultats

On remarque que la valeur de CP il dépend toujours de λ la longueur des pales et beta l'angle de pale elle aussi caractérisé par la vitesse de vent.

Dans notre graphe l'augmentation de CP jusqu'à a on valeur de 0.30 à cause de gisement de la zone

Le contrôle de la vitesse joue un rôle très important dans l'algorithme de maximisation de puissance, effectivement, sur la Figure on remarque que la vitesse de rotation de la turbine qui est aussi celle de la génératrice est très affectée elle est très loin de la vitesse de référence.

La puissance de la turbine transmise à la génératrice est de l'ordre de 14.6×10^4 Watts qu'égalé à la puissance maximale de notre prototype, cette différence de puissance revient toujours à la vites de vent que on a importé (la vitesse moyenne et de 6 m/s).

3.5.1.7. Contrôle en charge partielle

Dans la région de fonctionnement à charge partielle (zone II) d'une éolienne à vitesse variable, la commande a pour principaux objectifs de maximiser l'énergie capturée du vent. Comme cité précédemment, le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est une fonction non linéaire de la vitesse spécifique λ et de l'angle de calage β . Cette fonction possède un seul maximum $C_{opt}(\lambda_{opt}, \beta=0)$, le rotor peut fournir une puissance aérodynamique maximale uniquement pour le C_{opt} , comme on peut le constater sur la figure suivante :

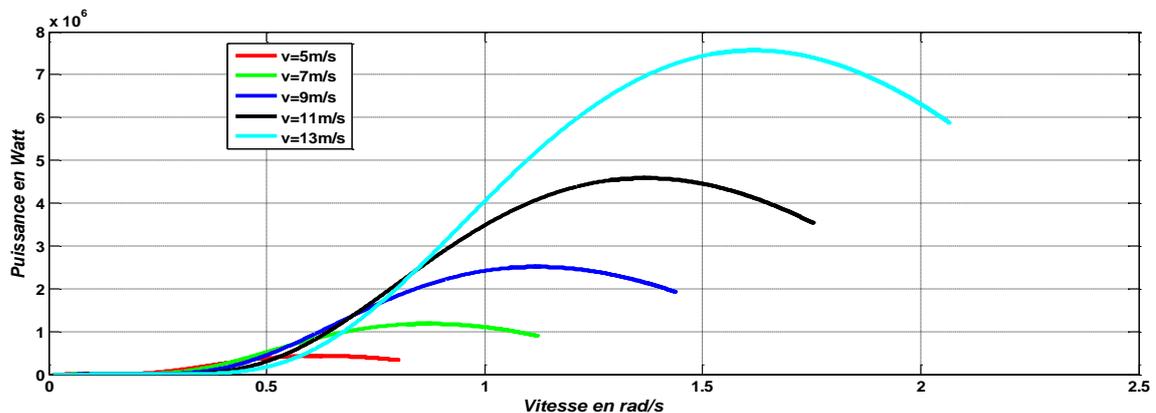


Figure 3.10 : Puissance captée par la turbine pour différentes vitesses de vent en fonction de sa Vitesse de rotation (à $\beta_{opt} = 0$).

Pour extraire cette puissance (P_{opt}), la vitesse la génératrice doit être asservie à sa valeur, optimale, cette valeur est donnée par l'équation suivante :

$$\Omega_{tr-opt} = \frac{\lambda_{opt} V_{vent}}{R} \quad (II. 10)$$

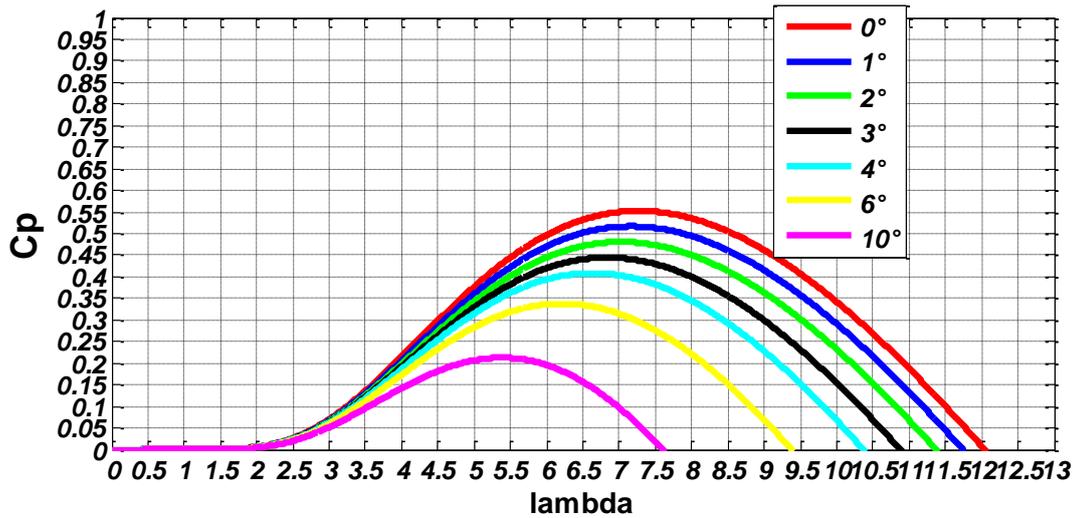


Figure 3.11 : Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique pour un angle de calage optimale (0°).

De la Figure 3.8, on déduit le coefficient de puissance optimal ainsi que la vitesse spécifique optimale

$$C_{p_{ot}} = 0.53$$

$$\lambda_{Cp_{opt}} = 7.2$$

3.5.2. Générateur Diesel

Le générateur diesel (GD) est constitué d'un moteur diesel (MD), un générateur synchrone (GS) et un embrayage a friction est représenté sur la Figure 3.12. Le MD fournit une puissance mécanique à la GS et son régulateur de vitesse (régulateur de vitesse + actionneur) contrôle la vitesse MD. Dans cette étude, la commande de vitesse MD est isochrone, de sorte que le régulateur de vitesse diesel commandera le débit de carburant nécessaire afin de faire le MD fonctionner à vitesse constante, [61].

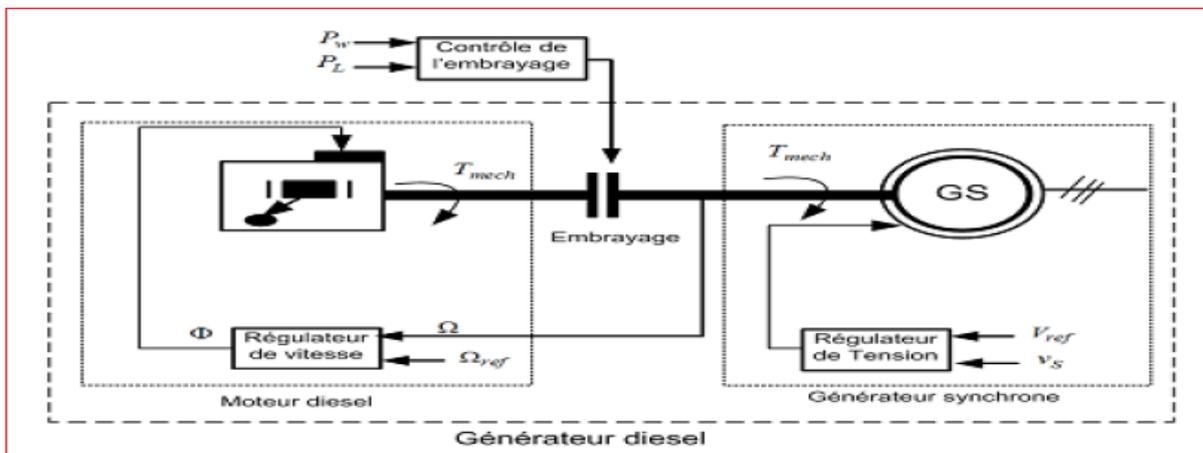


Figure 3.12 : Modèle simplifié du générateur diesel.

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de SHED

Où :

V_{ref} : Tension de référence.

V_s : Tension du réseau.

Ω_{ref} : Vitesse de rotation de référence.

Ω : Vitesse de rotation du rotor synchrone.

Φ : Débit du carburant.

T_{mech} : Couple mécanique produit par le moteur diesel.

Le modèle dynamique complet du GD suppose la modélisation du MD avec la boucle de réglage de la vitesse, un GS avec le système de réglage de tension et embrayage entre le GS et le MD.

3.5.2.1 Moteur diesel et régulateur de vitesse

La vitesse de rotation d'un tel moteur dépend de la quantité de carburant injecté et de la charge appliquée au vilebrequin du moteur. Le moteur diesel est un système non linéaire. Il présente des temps morts et des retards, ce qui rend difficile son contrôle [62]. Les moteurs diesels sont munis d'un régulateur de vitesse : mécanique, électromécanique ou électronique. Celui-ci réalise le contrôle automatique de la vitesse du moteur diesel, en réglant l'injection du carburant en fonction de la charge. Il agit sur le mécanisme d'accélération.

3.5.2.2. Modèle de moteur diesel

Dans notre cas on a utilisé le moteur de type **FG WILSON P150-1**

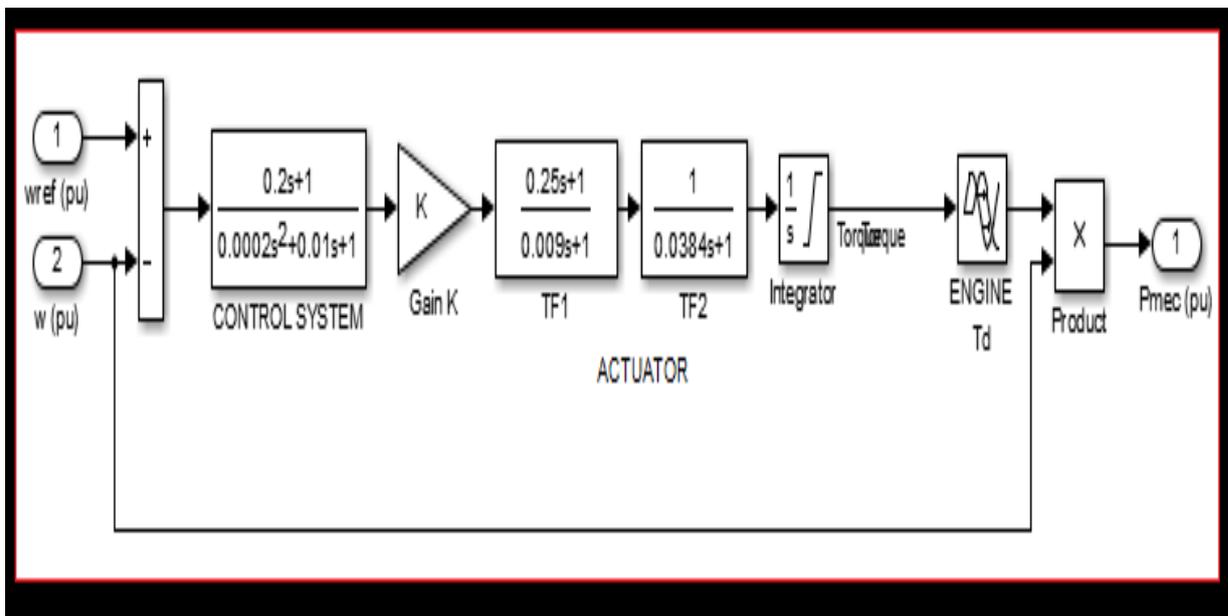


Figure 3.13 : Schéma bloc d'un moteur diesel.

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de SHED

Les données intégrées de moteur diesel dans notre système :

Diesel Engine Governor (mask)

This block implements a diesel engine and governor system:
1st and 2nd inputs: Desired and actual speed (pu)
Output: Diesel engine mechanical power. Motor inertia should be combined with generator.
Controller transfer function:
 $H_c = K \cdot (1 + T_3 \cdot s) / (1 + T_1 \cdot s + T_1 \cdot T_2 \cdot s^2)$
Actuator transfer function :
 $H_a = (1 + T_4 \cdot s) / [s(1 + T_5 \cdot s)(1 + T_6 \cdot s)]$
Motor :
Time delay Td

(See reference in Tutorial Session 5)

Parameters

Regulator gain K:

Regulator time constants [T1 T2 T3] (s) :

Actuator time constants [T4 T5 T6] (s) :

Torque limits [Tmin Tmax] (pu) :

Engine time delay Td (s) :

Initial value of mechanical power Pm0 (pu) :

Figure 3.14 : Les paramètres de base d'un moteur diesel FG WILSON P150-1.

3.5.2.3. les résultats de la simulation

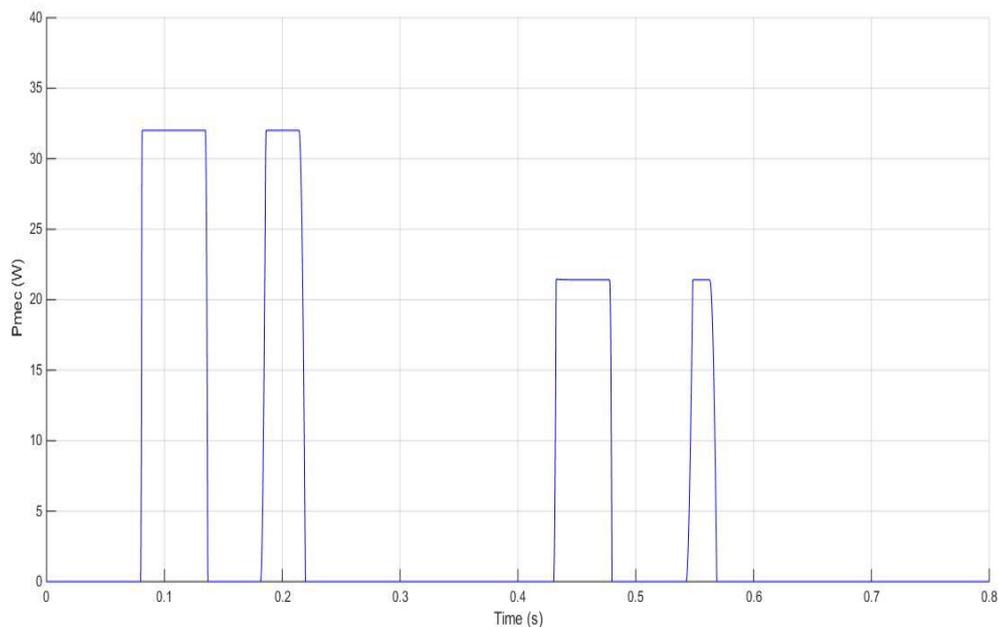


Figure.3.15 : la courbe de puissance en fonction de temps.

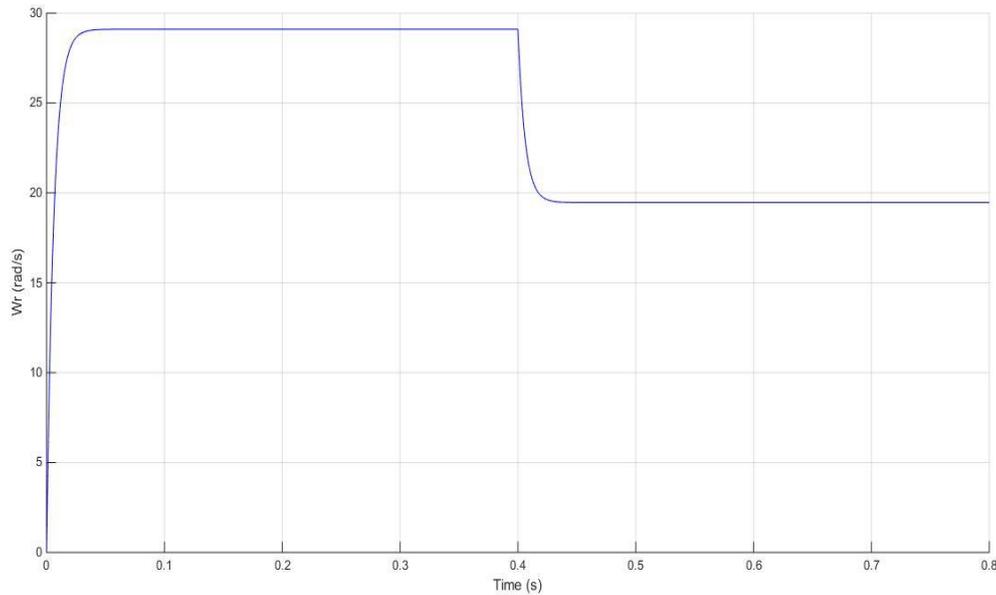


Figure.3.16 : la courbe de vitesse de rotation en fonction de temps.

3.5.2.4. Interprétations des résultats

Lors du démarrage, la vitesse w atteint la valeur de 28 rad/sec et continue sur sa lancée, jusqu'à l'application du couple résistant qui engendre la diminution de la vitesse à 19 rad/sec.

3.5.3. Modélisation de la génératrice synchrone

L'une des pièces maîtresses d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne est la génératrice [58]. A l'heure actuelle, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevés, les machines à aimants sont de plus en plus utilisées. Lorsque leur nombre de pôles est élevé, leurs puissances peuvent atteindre quelques centaines de kilowatts. Toutefois, elles sont surtout utilisées pour les petites et moyennes puissances de l'ordre de quelques dizaines de kilowatts. Dans ce cas, l'aimant permanent permet d'obtenir, à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que pour les machines à rotor bobiné. Par ailleurs, l'emploi d'aimants permanents annule les pertes par effet joule au rotor et augmente le rendement.

3.5.3.1. Modèle de génératrice synchrone

Le model de simulation sur matlab/Simulink

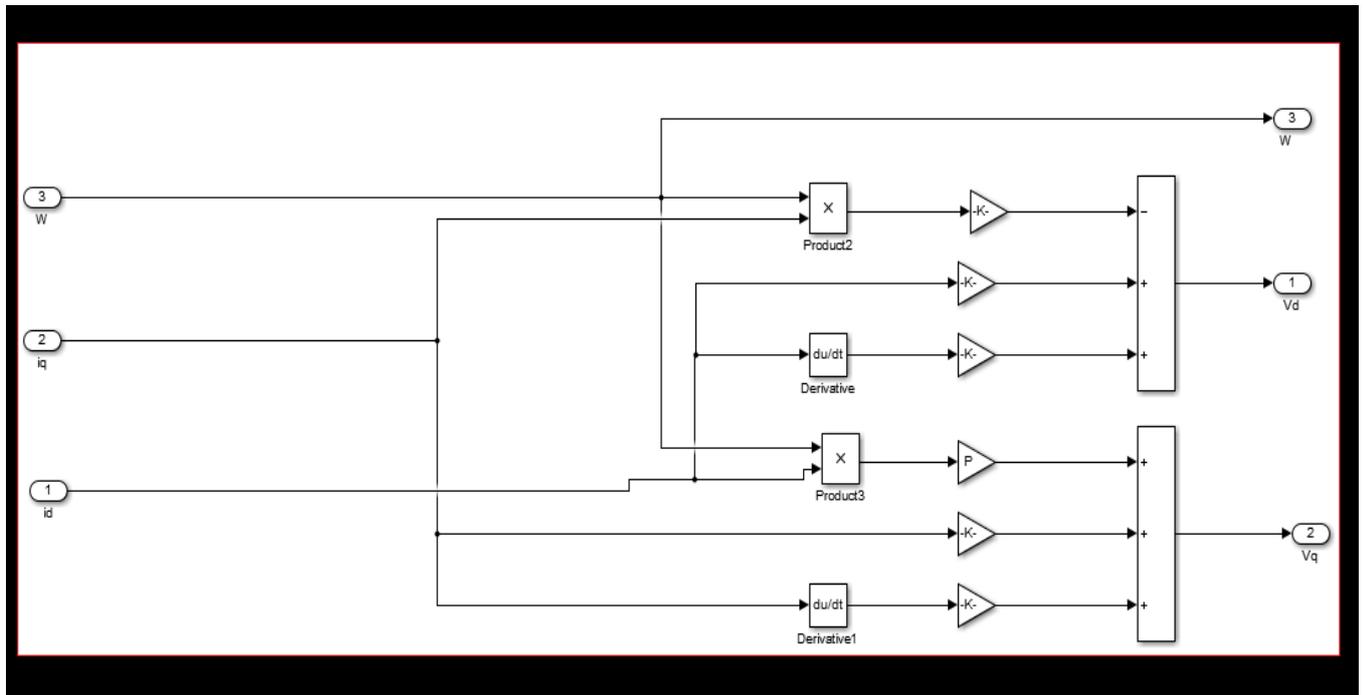


Figure 3.17. Schéma de bloc de la GSAP.

3.5.4. Modélisation du convertisseur

La chaîne de conversion électronique est composée de deux onduleurs couplés sur un bus continu commun. De manière générale, l'onduleur permet la conversion de courants triphasés alternatifs en courant continu et vice versa. L'onduleur étudié est bidirectionnel en courant et classiquement composé de trois cellules de commutation. Chacune est composée de deux transistors IGBT qui sont connectés à deux diodes en antiparallèle. Il est contrôlé par

modulation de largeur d'impulsion. (Figure 3.18.a) Les semi-conducteurs sont considérés idéaux : pas de pertes et les commutations sont instantanées. L'hypothèse de la conduction continue permet de considérer le convertisseur équivalent à des interrupteurs idéaux (Figure. 3.19.b) [59,60] Ces interrupteurs peuvent être commandées en ouverture '1' et en fermeture '0', et la tension d'entrée V_i est fonction des états de ces interrupteurs [60]. Il y a 8 états de commutations possibles.

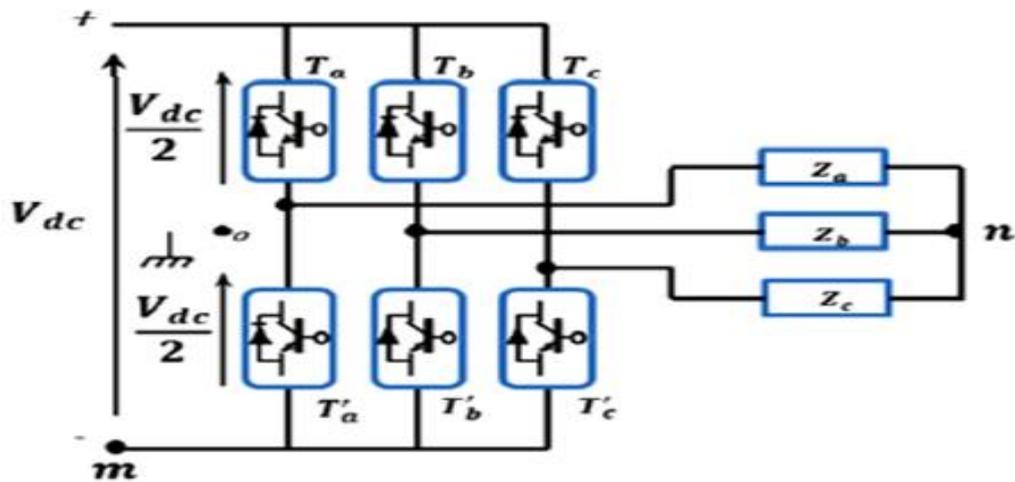


Figure 3.18. Modèle de convertisseur a.

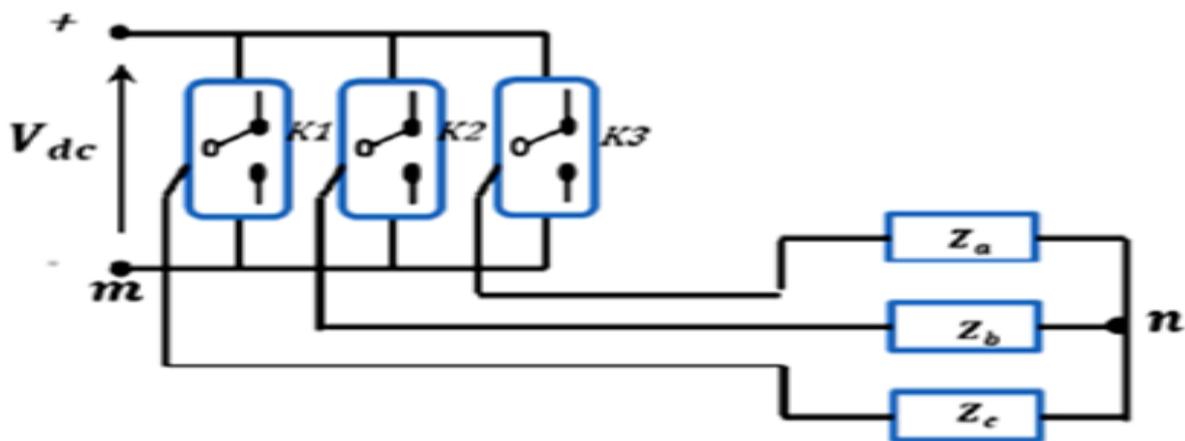


Figure 3.19. Modèle de convertisseur b. [39]

Le modèle de l'onduleur en fonction de la tension d'entrée et des interrupteurs est :

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{am} \\ V_{bm} \\ V_{cm} \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix}$$

Alors le schéma de la modélisation des composant (le groupe électrogène + l'onduleur) et montré dans la figure suivant :

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de SHED

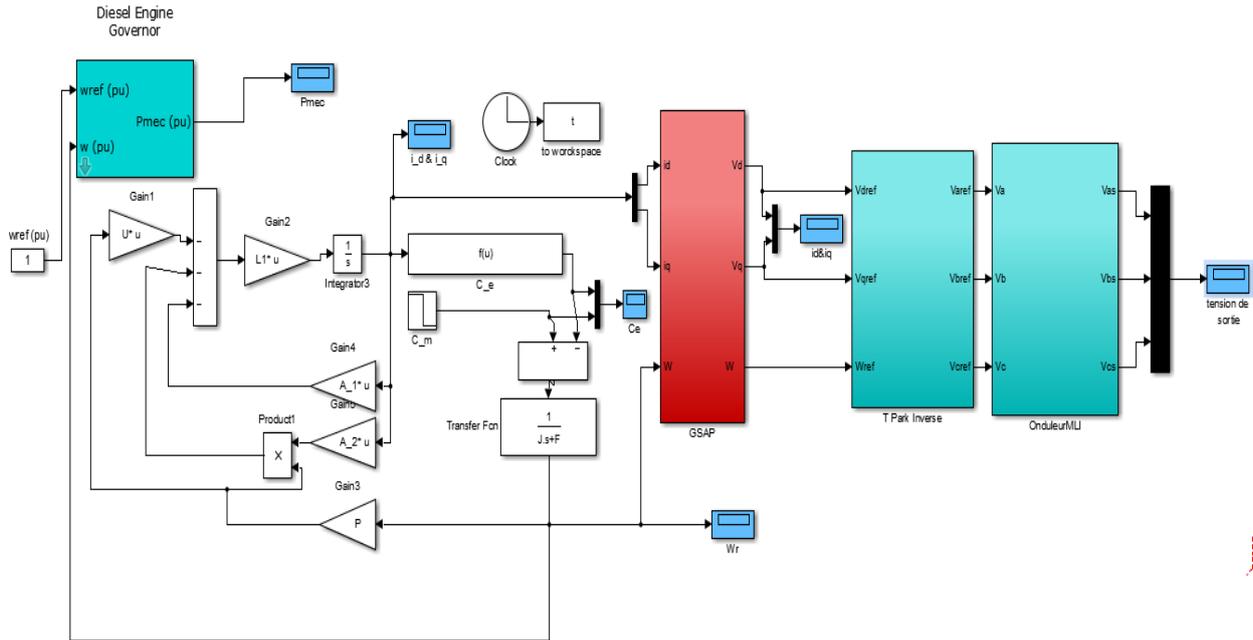


Figure.3.20 : le schéma globale d'un générateur diesel avec génératrice + onduleur.

3.5.4.1.les résultats de la simulation

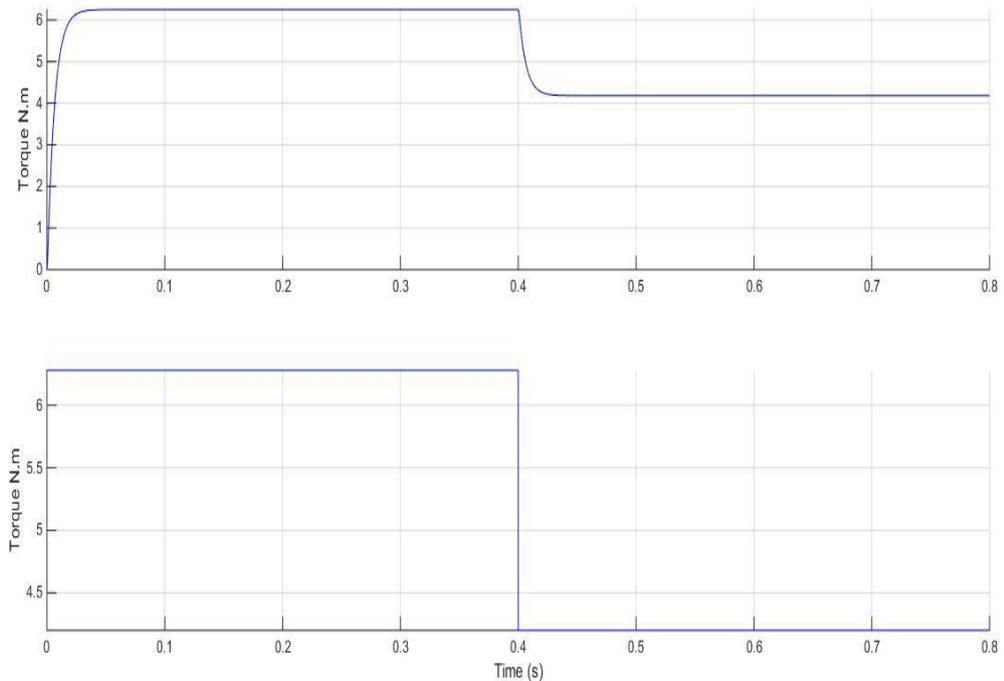


Figure.3.21 : la courbe du couple générateur synchrone.

Chapitre 3 : Modélisation et simulation de SHED

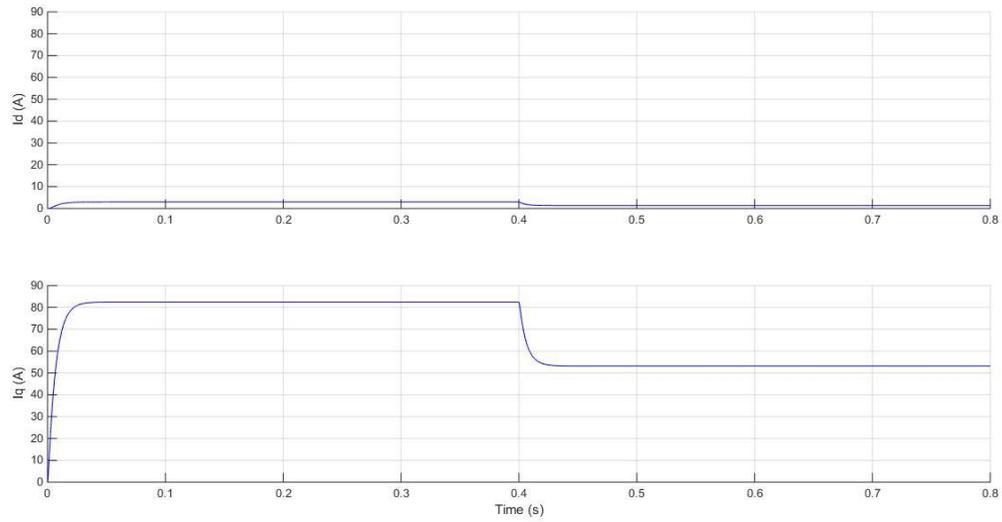


Figure.3.22 :la charge et l'intensité de courant en fonction de temps.

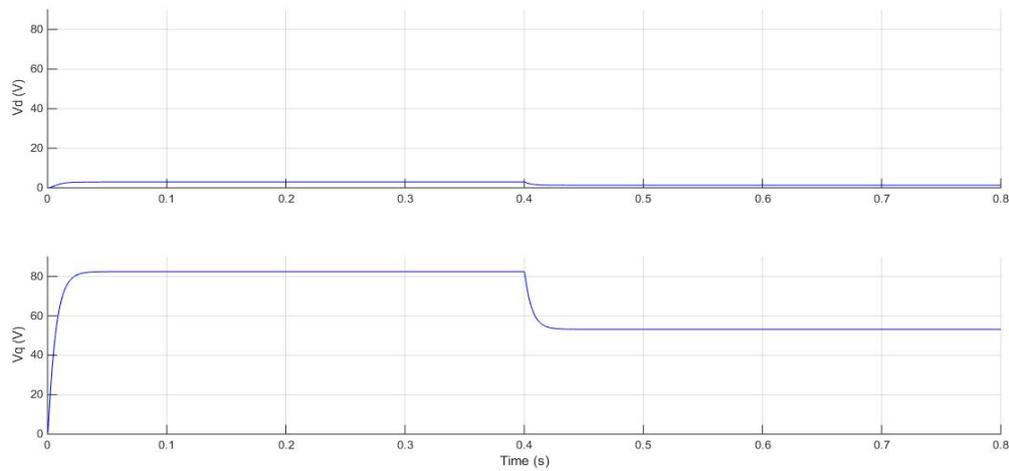


Figure.3.23 :la tension de la sortie de génératrice en fonction de temps.

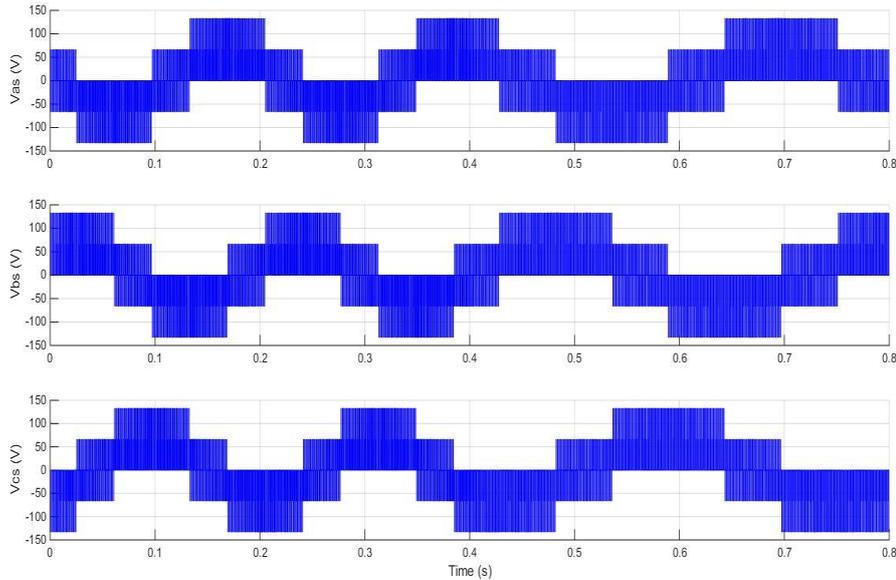


Figure.3.24 : la tension de sortie d'onduleur en fonction de temps.

3.5.4.2. Interprétations des résultats

Dans cette partie Le graph du couple électromagnétique démontre que celui-ci atteint la valeur de 6.4 N.m, et suite à l'application d'un couple résistant à l'instant $t=0.4\text{sec}$, on remarque une diminution du C_{em} atteignant une valeur approximative de 4.2 N.m.

L'analyse précédente est également compatible pour les courant i_d et i_q , qui eux, atteignent respectivement les valeurs de 5A et 81A.

Pour les tension V_d et V_q , celles-ci présentent une dynamique quasi-similaire. Toutefois leurs valeurs maximales sont très éloignées à savoir :

La tension V_d est minime et ne dépasse pas les 5 volts, contrairement à la tension V_q , qui elle, dépasse de peu la valeur de 80V.

Il est à remarquer une diminution de ces valeurs lors de l'application de la coupe résistant.

On constate que les tensions V_a , V_b et V_c sont décalées de $2\pi/3$ dans le temps. Leurs formes particulières sont dues à l'association d'un onduleur à notre système qui joue le rôle d'un redresseur.

3.6. Conclusion

Dans ce chapitre, on a passé en revue la machine Synchrones à aimants permanents en fonctionnement génératrice et la modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion, tels que la turbine, le vent, la machine synchrone et le convertisseur statique (onduleur) et la commande MLI.

Ensuite des simulations utilisant le logiciel Simulink/Matlab des différentes parties de la chaîne de conversion et de la chaîne globale. Elles ont été menées et des résultats présentés et commentés.

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale et perspectives

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

De nos jours, une grande partie de production mondiale d'énergie est assurée à partir de sources fossiles. La consommation de ces sources donne lieu à des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le danger supplémentaire est qu'une consommation excessive du stock de ressources naturelles réduit les réserves de ce type d'énergie de façon dangereuse pour les futures générations [48].

Par l'énergie renouvelable, on entend des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les énergies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée.

Il existe de nombreux sites isolés dans le monde, alimentés par des systèmes autonomes de génération d'électricité. Ces générateurs utilisent les sources renouvelables locales. On y trouve des panneaux photovoltaïques, des éoliennes et des micro turbines.

Le problème major d'énergie renouvelable c'est qu'elle est dépendante des conditions climatiques, cette dernière est variable tout le temps. On a deux solutions pour cette problématique, soit de coupler les générateurs par un système de stockage pour assurer la continuité d'alimentation en énergie, ou bien d'installer un groupe électrogène fonctionne d'une façon complémentaire avec le générateur qui utilise les sources renouvelables, et c'est le cas de notre travail.

Donc notre système c'est une turbine éolienne alimenté avec un générateur diesel à vitesse variable, la variation de vitesse est inversement proportionnelle à la vitesse de la turbine pour assurer la continuité d'alimentation d'énergie en terme présence et valeur.

Comme nous avons dit au troisième chapitre et d'après les analyses des résultats de simulation obtenu on constate que on a atteint les objectifs fixés qui sont principalement deux :

- Etudie le comportement de système hybride pour obtenir une efficacité optimale
- Pour alimenter l'électricité au réseau isolé consommation maximal 145 kW

Perspectives

Pour résoudre définitivement les problèmes d'alimentation des sites isolés du point de vue (technique, économique et écologique), L'Algérie s'oriente vers la nouvelle forme d'énergie dite « énergies renouvelables » en lançant un programme ambitieux de ces énergies et dont l'efficacité énergétique aura un rôle stratégique.

Le programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable d'une puissance immense pour couvrir la demande nationale en électricité.

Ainsi que minimisé la consommation de carburant diesel afin de réduire l'émission de CO₂ qui entrainera une réduction des coûts de fonctionnement du système.

REFERENCES
bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] Amna Omri, Analyse de la transition vers les énergies renouvelables en Tunisie : Risques, enjeux et stratégies à adopter, Thèse de doctorat en Sciences économiques, Université De Sfax Ecole doctorale des sciences économiques, gestion et informatique Unité de recherche en économie de développement, 5 septembre 2016 ,357p.
- [2]. O. DERUELLE, Thèse de Doctorat en sciences, Université de Paris XI ; pp.9-12, 2002.
- [3] Melle. SAIB Samia, Contribution à l'optimisation d'un système hybride (PV/éolien) avec stockage d'énergie connecté au réseau électrique, Thèse de doctorat en Electrotechnique, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIFI FACULTE de TECHNOLOGIE, 25/10/2018,178p.
- [4] Hristiyan KANCHEV, Gestion des flux énergétiques dans un système hybride de sources d'énergie renouvelable : Optimisation de la planification opérationnelle et ajustement d'un micro réseau électrique urbain, thèse de doctorat en Génie Electrique, ECOLE CENTRALE DE LILLE, L'UNIVERSITE TECHNIQUE DE SOFIA DANS LE CADRE D'UNE COTUTELLE INTERNATIONALE, 24 janvier 2014,208p.
- [5] Lakhdar Belhadji, Optimisation du contrôle Commande d'un système hydraulique réversible à vitesse variable, thèse doctorat en génie, UNIVERSITÉ DE GRENOBLE, 08/07/2013,198p.
- [6] Melle MEKKI MOUNIRA, Récupération des déperditions d'énergie dans les complexes industriels et leur conversion en énergie électrique exploitable, thèse de doctorat en électrotechnique, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA,2014
- [7] DRIS-MIDA, Contribution à la modélisation d'un système de production d'énergie électrique hybride <<Eolien-photovoltaïque >>, *thèse* de doctorat en réseaux électriques. Université Mohamed Khider – Biskra,10/04/2019,202p.
- [8] MOHAMED MLADJAO Mohamed Al anfaf, contribution à la modélisation et à l'optimisation de systèmes énergétiques multi-sources et multi-charges, thèse de doctorat en Energétique et génie des procédés, UNIVERSITÉ DE LORRAINE,173p
- [9] ABDELHAMID LILIA, Contribution à l'Amélioration des Performances des Générateurs Eoliens - Evaluation de l'Impact des Energies Renouvelables sur l'Environnement, THESE DOCTORAT EN SCIENCES En Electrotechnique, Université Hadj Lakhdar de Batna, 26/04/2012,161p.

Références bibliographiques

- [10] BERNARD THONON ET PHILIPPE MALBRANCHE, l'énergie solaire , Journée de formation, Séminaire « Questions de Sciences », Etablissement public à caractère industriel et commercial | RCS Paris, 6 juin 2012
- [11] David Funk, Essai présenté au Centre Universitaire de Formation en Environnement en vue de l'obtention du grade de maître en environnement (M.Env.), CENTRE UNIVERSITAIRE DE FORMATION EN ENVIRONNEMENT UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, janvier 2010.
- [12] Jean-François HOFFMANN, Stockage thermique pour centrale solaire
Thermodynamique à concentration mettant en œuvre des matériaux naturels ou recyclés, thèse doctorat en Energétique et Génie des Procédés, UNIVERSITE DE PERPIGNAN VIA DOMITIA, 3 décembre 2015.
- [13] Mekemeche Abdelkader, Modélisation à deux dimensions des propriétés physiques de cellules solaires au silicium à base de substrat de type n. Étude de quelques cas particuliers de cellules innovantes, Thèse de Doctorat En Physique. L'Université Abdel Hamid Ibn Badis de Mostaganem, 04/07/2017,182p.
- [14] A. S. Eddine, Dimensionnement d'un échangeur air/sol enterré destiné au rafraîchissement de l'air, Université de Biskra, 2014.
- [15] Ademe, La valorisation de la biomasse, Guide d'information à l'attention des administrations et des établissements publics. 2007; 1-39.
- [16] M. Van Loon et al., Evaluation of long-term ozone simulations from seven regional air quality models and their ensemble, Atmos. Environ., vol. 41, no. 10, pp. 2083–2097, 2007.
- [17] Allali Khaireddine , Modélisation et analyse de l'intégration d'un jumelage Éolien-Diesel dans un réseau électrique autonome ,thèse doctorat en électrotechnique , UNIVERSITE BADJI MOKHTARANNABA, 2015.
- [18] J. G. McGowan, J.F. Manwell, «Hybrid/PV/Diesel system experiences », Renewable Energy, 16 (1999) pp. 928-933.
- [19] D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff, «Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools: status and needs», PV Horizon: Workshop on photovoltaic hybrid systems, Montreal, 2001.
- [20] Hussein Ibrahim, «Etude et conception d'un générateur hybride d'électricité de ' type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé », Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, juin 2010.

Références bibliographiques

- [21] T. Ackermann, L. Söder, «An overview of wind energy-status », Renewable and Sustainable Energy Reviews 6 (2002) pp. 67-128.
- [22] «La ferme éolienne d'Adrar mise en service », Extrait du portail Algérien des énergies renouvelables disponible en ligne sur :
<http://portail.cder.dz/spip.php?article4098..>
- [23] H. Ibrahim, R. Younés, T. Basbous, A. Ilinca, M. Dimitrova, «Optimization of diesel engine performances for a hybrid wind-diesel system with compressed air energy storage», Energy, 36 (2011) pp. 3079-91.
- [24] Y. Jean, A. Nouaili, P. Viarouge, B. Saulnier, R. Reid, «Développement d'un 107 système JEDHPSS représentatif d'un village typique des réseaux non reliés », Rapport IREQ-94 -169-C, 1994.
- [25] R. Gagnon, A. Nouaili, Y. Jean, P. Viarouge, « Mise à jour des outils de modélisation et de simulation du Jumelage Eolien-Diesel à Haute Pénétration Sans Stockage et rédaction du devis de fabrication de la charge de lissage », Rapport IREQ-97-124-C, 1997.
- [26] M. ZIANE Khaled, Analyse, Évaluation et Réduction des Risques d'un Parc Éolien, thèse de doctorat, Institut de Maintenance et de Sécurité Industrielle, 02 Juillet 2017.
- [27] Abdelkarim CHEMIDI, Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme, thèse de doctorat En Electrotechnique, Université Abou Bekr Belkaid-Tlemcen, 2014-2015.
- [28] CHEIKH RIDHA, Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents et d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation. Thèse doctorat en ELECTROTECHNIQUE, 04/07/2018.
- [29] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechnye, « éoliennes ». Technique de l'ingénieur, vol. BM4640, janvier 2011.
- [30] Chikha Said, Contribution à l'optimisation de la commande prédictive des convertisseurs statiques intégrés dans les chaînes de conversion d'énergie éolienne, Thèse doctorat en génie électrique, Université Larbi Ben M'hidi-Oum El Bouagh, 03/07/2017.
- [31] A.Abdelli, Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive, thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, France, 2007.
- [32] O.Gergaud, B.Multon, H.Benahmed, Modélisation d'une chaîne de conversion éolienne de petite puissance, Electrotechnique du futur 2010, Nancy, France.

Références bibliographiques

[33] N.Laverdure, L'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires , thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de Grenoble,France ,2005.

[34] Zerzouri Nora, etude de l'effet de defaut sur le comportement dynamique de la machine asynchrone, Thèse doctorat de Commande Electrique. UNIVERSITE BADJI MOKHTARANNABA,2015/2016.

[35] N. La verdure « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires » ; thèse doctorat de l'NPG ; Spécialisé : Génie électrique ; 09 décembre 2005.

[36] J.L. Gary, « Wind Energy Systems », Chapter 4-Wind Turbine Power, Nov. 2001.

[37] Nachida KASBADJI MERZOUK, évaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie, thèse de doctorat en physique, universite abou bekr belkaid de tlemcen, 02 mai 2006.

[38] F. Baghdadi, “ Modélisation et Simulation des Performances d'une Installation Hybride de conversion d'Energies Renouvelables ”, Mémoire de Magister, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou, 2011.

[39] G.Thierry et D.fedullo « Le Grand Livre de L'électricité », troisième Edition 2014.

[40] M. Chadel « dimensionnement d'un système de pompage d'eau potable pour les sites de Tlemcen et Adrar » université de Tlemcen, 2012.

[41] L.ZAROOUR «Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Thèse de doctorat en électrotechnique, université de Constantine, 2010.

[42] M. Lopez «contribution à l'optimisation d'un system de conversion éolien pour une unité de production isolée» Thèse de doctorat« sciences et technologies de l'information des télécommunications et des systèmes » université paris-sud11, 2005.

[43] L. Meziane, S. Oublaïd «Etude d'un system de pompage alimenté par une source hybride (éolienne-photovoltaïque)», Mémoire de Master de l'université de Bejaia, 2014.

[44] H. Nordin, “ System Reliability, Dimensioning and Environmental Impact of Diesel Engine Generator Sets used in Telecom Applications ”, Lindemark, Ericsson Components, Sweden.

[45] F. Boudy, “ Etude du Systeme d'Injection d'un Moteur Diesel a Rampe d'Injection Commune ”, Mémoire présenté à l'École de Technologie Supérieur, Montréal 208.

Références bibliographiques

- [46] F.Chellali , A.Khellaf ,A. Belouchrani, and A.Recioui, "A contribution in the actualization of wind map of Algeria," *Renew.Sustain.Energy Rev.*, vol. 15, no.2, pp.993-1002, 2011
- [47] Z.Laid "Etude Technique d'un Système d' Energie Hybride Photovoltaïque-Eolien Hors Réseau "Thèse de Doctorat, Université Mentouri de Constantine, 2010
- [48] Station météorologique de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) à Adrar, Alegria. <http://www.urerms.dz/>.
- [49] A. Meflah, « Modélisation et commande d'une chaine de pompage photovoltaïque », Mémoire de Magistère, Université de Tlemcen, Algérie, 2011.
- [50] Angel Cid Pastor, Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques, thèse de doctorat de l'institut National des Sciences Appliquées de Toulouse, Septembre 2006
- [51] V. Courtecuisse, " Supervision d'une centrale multisource à base d'éoliennes et de stockage d'énergie connectée au réseau électrique ", Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, Lille, Novembre 2008.
- [52] Dakyo, Djamel. Ikni, " Conversion de l'énergie électrique d'origine renouvelable : impacts sur un réseau électrique interconnecté ou ilote", Colloque International Francophone CIFEM 2012 2-3-4 Mai 2012 Ouagadougou, Burkina Faso.
- [53] Abdenour ABDELLI, " Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive ", Thèse doctorat, Institut national polytechnique de Toulouse, Octobre 2007.
- [54] Guy Cuntty, " Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne ", Edissud, Aix-en-Provence, 2001, www.edisud.com.
- [55] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, " Éoliennes ", Techniques de l'Ingénieur, BM 4 640.
- [56] Nicolas LAVERDURE, " Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ", Thèse de Doctorat d'institut national polytechnique de Grenoble, Décembre 2005. France
- [57] R. Gagnon, A. Nouaili, Y. Jean, P. Viarouge, « Mise à jour des outils de modélisation et de simulation du Jumelage Eolien-Diesel à Haute Pénétration Sans Stockage et rédaction du devis de fabrication de la charge de lissage », Rapport IREQ-97-124-C, 1997.
- [58] Adam MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », THÈSE de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, N° d'ordre : 2213/2005.

Références bibliographiques

[59] Mayouf Mesaoud, Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent, thèse de magister de l'université de Batna, 13-02-2008.

[60] LING PENG « reconfiguration du dispositif de commande d'une éolienne en cas de creux de tension » thèse de doctorat délivré par l'école centrale de Lille, 2010

[61] R. Sebastian, «Modelling and simulation of a high penetration wind diesel system with battery energy storage », Electrical Power and Energy Systems, 33 (2011) pp. 767-774.

[62] Bo, Kuang, Wang Youyi et Tan Yoke Lin, «An H controller design for diesel engine systems», In. Vol. 1, pp. 61-6. Coll. «Power Con 2000. International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409) ». Piscataway, NJ, USA : IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ICPST.2000.900032>