

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université de Batna 2
Faculté de Technologie
Département d'Électrotechnique



THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de
DOCTORAT 3^{ème} cycle LMD en Électrotechnique

OPTION

Commande des systèmes industriels et énergies renouvelables

Par

KSENTINI Abdelhamid

Thème

Gestion et Optimisation du site idéal des éoliennes en Algérie pour une zone autonome

Soutenue devant le jury composé de :

Dr. B. AZOUI	Prof.	Université Batna 2	Président
Dr. A. BENSLEM	Prof.	Université Batna 2	Rapporteur
Dr. M.S. MIMOUN	Prof.	Université de Biskra	Examineur
Dr. LABAR Hocine	Prof.	Université Badji Mokhtar, Annaba	Examineur
Dr. E.B. AZZAG	M.C.A.	Université Badji Mokhtar, Annaba	Examineur
Dr. S. BENAGGOUNE	M.C.A.	Université Batna 2	Examineur



Remerciements

Les travaux de recherche présentés dans ce mémoire ont été réalisés dans le Laboratoire des Réseaux Électriques et Énergies Renouvelables (LREER) université de Batna.

*Je tiens tout d'abord à remercier fortement notre **DIEU** puissant qui nous a donné le courage et la force pour mener à bout ce modeste travail.*

*Je suis reconnaissant à mon Directeur de thèse, le Professeur **Ahmed BENSALÉM** D'avoir accepté d'être le rapporteur de cette thèse et la confiance qu'il a placée en moi.*

Je remercie également tous les membres du jury :

*Monsieur le président **B.AZOUI**, Professeur à Université Batna 2 pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.*

*Monsieur **M.S.MIMOUN**, Professeur à université de Biskra ,pour m'avoir fait l'honneur d'examiner cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.*

*Monsieur **LABAR Hocine** Professeur à département d'électrotechnique de l'Université d'Annaba pour m'avoir fait l'honneur d'examiner cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.*

*Monsieur Docteur **El-Bafi AZZAG**, Maître de Conférences classe A au département d'électrotechnique de l'Université d'Annaba pour m'avoir fait l'honneur d'examiner cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.*

*Monsieur **S. BENAGGOUNE** Maître de Conférences classe A au département d'électrotechnique de l'Université Batna2 pour m'avoir fait l'honneur d'examiner cette thèse. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect.*

Je n'oublie pas de remercier le personnel de l'unité de recherche en Energies Renouvelables en milieu Saharien (URERMS) à ADRAR, pour toutes les informations requises pour l'élaboration de ma thèse.

Nous remercions également tous les enseignants et les responsables du département D'électrotechnique d'université de Batna2 et l'université d'Annaba.

Je tiens à travers ce mémoire, à exprimer mes sincères remerciements à tous les doctorants, les étudiants, les amis sans exception et tous ceux qui nous ont aidés de près ou de loin à réaliser ce travail.

En fin, qu'il me soit permis d'exprimer ici mes sentiments de profonde reconnaissance à mes parents, mes frères, mes sœurs qui m'ont soutenu et encouragé pendant l'élaboration de ce travail.



Dédicace



Avant tout je tiens à remercier mon DIEU le tout puissant pour son aide et le courage qu'il m'a donné pour les difficultés durant mes années des études, Ainsi que l'endurance pour terminer cette thèse.

Je dédie ce modeste travail à ma mère et mon père symboles d'affection et d'amour, qui ont sacrifié tout leur temps pour mon bonheur et ma réussite qu'ils se trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance et ma très grande affection.

A mes frères : «Abdelhalim ,Yacine, Hamdan»

Et a mes sœurs :«Nadia,Wahida»

A toute ma famille

A tous mes camarades

A tous mes amis et mes collègues et à tous ceux que j'aime.

Abdelhamid ksentini

Titre de thèse : Gestion et optimisation du site idéal des éoliennes en Algérie pour une zone autonome

Auteur : KSENTINI Abdelhamid

Directeur de thèse : BENSALÉM Ahmed

Département : Électrotechnique

Résumé

Les conditions climatiques peuvent être affectées par une pollution élevée dus à l'accroissement énergétique des sources utilisant les combustibles fossiles. Sachant que les centrales diesels dont l'installation est de bon marché car celle-ci sont particulièrement adapté aux pays peu ou pas électrifiés et sans moyen d'acquérir d'autres technologies de production d'énergie (sud Algérien). Sachant que l'isolement du site entraîne des coûts supplémentaires tels que le transport du carburant, les coûts d'entretien et de la maintenance. Cette solution n'est pas bénéfique à long terme du point de vue économique et technique d'où l'intégration d'un système hybride qui sera utile par l'alimentation basée sur le générateur éolien (WTG) qui sera intéressante car le vent en Algérie couvre la majorité de ces sites pendant toute l'année comme la wilaya d'Adrar. Dans cette situation, la combinaison du système d'énergie hybride (Eolien-Diesel-Batterie) à base des énergies renouvelables est une stratégie permettant l'utilisation de trois sources qui seront complémentaire pour une continuité de service convenable, une réduction des coûts énergétiques, une longévité du groupe électrogène et l'élimination d'une partie des gaz à effet de serre, c'est la raison qui nous a motivé pour l'élaboration de cette étude qui traite la gestion optimale de la production d'un système électro-énergétique aux conditions météorologiques (vitesse du vent, température, relief) et l'analyse technico-économique répondant à nos besoins énergétiques afin de réduire les émissions des gaz à effet de serre.

Mots clés : Système Hybride, Gestion, Modélisation, Eolienne, Groupe Diesel, Stockage, coût, Simulation.

Thesis entitled : Management and optimization of the ideal site of the wind turbines in Algeria for an autonomous zone

Author: KSENTINI Abdelhamid

Thesis superviseur : BENSALEM Ahmed

Département : Electrical Engineering

Abstract

The climatic conditions can be affected by high pollution due to increased energy sources using fossil fuels. Knowing that diesel power stations whose installation is cheap because it is particularly suitable for countries with little or no electrified and without means to acquire other energy production technologies (southern Algeria). Knowing that the isolation of the site leads to additional costs such as transport fuel, maintenance costs and maintenance. This solution is not beneficial long-term economic and technical point of view from which the integration of a hybrid system that will be useful in the diet based on the wind generator (WTG), which will be interesting because the wind in Algeria covers the majority of these sites throughout the year as the city of Adrar. In this situation, the combination of hybrid power system (Wind-Diesel-Battery) based renewable energy is a strategy for the use of three complementary sources that will be suitable for continuity service, reducing energy costs, longevity of the generator and the elimination of part of the greenhouse gas, this is the reason that motivated us to develop this study that addresses the optimal management of the production of electronic system energetic weather (wind speed, temperature, relief) and technical as well as economic analysis to meet our energy requirements to reduce emissions of greenhouse gases.

Keywords: Hybrid System, Management, Modeling, Wind turbine, Diesel Group, Storage, Cost, Simulation.

عنوان الأطروحة:

إدارة والاستفادة المثلى من الموقع المثالي لتوربينات الرياح في الجزائر لمنطقة مستقلة

كاتب الأطروحة : قسنطيني عبد الحميد

المشرف على الأطروحة : بن سالم احمد

قسم : الالكتروتقني

ملخص

إن الظروف المناخية يمكن أن تتأثر إلى درجة عالية من التلوث بسبب زيادة مصادر الطاقة باستخدام الوقود الأحفوري. مع العلم أن محطات توليد الطاقة الديزل التي هي محطات سهلة التثبيت بسبب أنها مناسبة خاصة بالنسبة للبلدان ضئيلة أو معدومة الكهرباء ودون وسيلة لاكتساب تقنيات إنتاج الطاقات الأخرى (جنوب الجزائر). مع العلم أن عزلة موقع يؤدي إلى تكاليف إضافية مثل الوقود، النقل، تكاليف التصليح والصيانة. هذا الحل من الناحية الاقتصادية والتقنية ليس مفيدا على المدى الطويل مع العلم أن تكامل نظام هجين من شأنها أن تكون مفيدة من خلال إتباع نظام تموين كهربائي يعتمد بالأساس على مولد التوربين الرياح التي سوف تكون مثيرة للاهتمام بفضل قوة الرياح الموجودة في الجزائر التي تغطي الجزائر في غالبية هذه المواقع على مدار السنة مثل ولاية أدرار. في هذه الحالة، مزيج من أنظمة الطاقة الهجينة (الرياح، الديزل، بطارية) المعتمدة على الطاقة المتجددة هو إستراتيجية للاستخدام ثلاثة مصادر تكميلية التي من شأنها أن تكون مناسبة لاستمرارية الخدمة، خفض تكاليف الطاقة، طول عمر المولد والقضاء على جزء من غازات الاحتباس الحراري. هذا هو السبب الذي دفعنا إلى تطوير هذه الدراسة التي تدرس التسيير الأمثل لإنتاج النظام الطاقة الكهربائية لمواجهة الظروف (سرعة الرياح، درجة الحرارة، التضاريس) والتحليل الفني والاقتصادي تلبية لاحتياجاتنا من الطاقة الكهربائية للحد من انبعاث غازات المسببة للاحتباس الحراري.

كلمات البحث: نظام الهجين، التسيير، النمذجة، توربينة الرياح، مجموعة الديزل، التخزين، كلفة، المحاكاة

Résumé	III
Abstract	IV
Table des matières	VI
Liste des Figures	X
Liste des tableaux	XIV
Liste des abréviations.....	XV
Introduction Générale.....	1

❖ **Problématique des sites isolés en Algérie et solutions possibles**

Chapitre I : Vent et son influence sur le choix du site

I.1 Introduction.....	8
I.2 Origine du vent	8
I.3 Eléments de physique atmosphérique.....	8
I.3.1 Structure atmosphérique	8
I.3.1.1 Force gravitationnelle.....	9
I.3.1.2 Force de pression	9
I.3.1.3 Force de Coriolis	10
I.3.1.4 Forces de frottement.....	10
I.3.2 Couche limite atmosphérique(CLA)	10
I.3.2.1 Couche limite de surface (CLS)	11
I.3.2.2 Couche limite d'Eckerman	11
I.4.Causes principales des vents	12
I.4.1. Circulation atmosphérique générale et les systèmes de pression semi permanents.....	12
I.4.2.Vents locaux	14
I.5 Le vent et ses variations	16
I.6 Critères de choix des sites éoliens.....	20
I.6.1 Données utilisées	20
I.6.2 Localisation des zones les plus venteuses.....	21
I.6.3 Potentiel énergétique éolien récupérable (théorème de Betz)	23
I.7 Généralité sur le site de l'emplacement du système hybride	25
I.7.1 Distribution de Weibull.....	27
I.7.2 La rose des vents	29
I.8 Conclusion	30

Chapitre II : Etat de l'art sur le système d'énergie hybride

II.1 Introduction	32
II.2 Systèmes autonomes et non autonomes de production d'énergie	32
II.2.1 Systèmes non autonomes	32
II.2.2 Systèmes autonomes.....	33
II.3 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement dans réseau autonome	33
II.4 Qualité de l'énergie électrique dans les réseaux autonomes	33
II.5 Systèmes d'Energy Hybrides (SEH): définitions et missions	34
II.5.1 Différents types de topologies de systèmes hybrides.....	36
II.6 Description du SEH.....	39
II.7 Principe de fonctionnement SEH.....	40
II.8 Principaux composants des systèmes d'énergie hybrides (SEH)	41
II.8.1 Éoliennes	42
II.8.1.1 L'énergie éolienne pour quoi faire?	42
II.8.1.2 Définition de l'énergie éolienne	42
II.8.1.3 Types d'aérogénérateurs	44
II.8.1.4 Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal	46
II.8.1.5 Intérêt de la vitesse variable.....	47
II.8.1.6 Définition et principe de fonctionnement du système éolien à vitesse variable.....	48
II.8.1.7 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne	49
II.8.1.8 Les génératrices électriques	51
II.8.1.8.1 Générateur Asynchrone.....	51
Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (SCIG)	51
Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné (WRIG)	52
II.8.1.8.2 Générateur Synchrone (SG)	52
Générateur Synchrone à Rotor Bobiné (WRSG)	53
Générateur Synchrone à Aimants Permanents (PMSG)	53
II.8.2 Générateur diesel GD.....	53
II.8.3 Systèmes de stockage.....	54
II.8.4 Système de supervision	56

II.8.5 Convertisseurs	56
II.8.6 Charges.....	57
II.9 Conclusion.....	57

Chapitre III : Modélisation et commande du Système d'énergie Hybride

III.1 Introduction	59
III.2 Dimensionnement du système hybride	59
III.2.1 Modélisation du système éolien	59
III.2.1.1 Modélisation du vent	61
III.2.1.2 Conversion de l'énergie éolienne	62
III.2.1.2.a) Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique.....	62
III.2.1.2.b) Conversion en énergie mécanique	64
III.2.1.3 Modélisation de la turbine éolienne	65
Transmission.....	66
Equation dynamique de l'arbre	66
III.2.1.4 Modélisation du système d'orientation des pales.....	68
III.2.1.5 Génération de l'angle de référence (B_{ref}).....	68
III.2.1.6 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents	69
III.2.2 Générateur Diesel	72
III.2.1.1 Modèle simplifié de la machine synchrone.....	75
III.2.2.2 Embrayage	76
III.2.3 Batterie	76
III.2.4 Redresseur	78
III.2.5 Hacheur réversible en courant	80
III.2.6 Convertisseur multi-niveaux	80
III.2.6.1 Différentes topologies des onduleurs multi-niveaux.....	81
III.2.6.1.a) Onduleur de tension à diode de bouclage.....	81
III.3 Conclusion	83

Chapitre IV : Application au système Hybride Eolien- Diesel

IV.1 Introduction.....	86
IV.2 Contrôle et gestion de l'énergie du système hybride	86
Aspects techniques des technologies	88
IV.2.1 Eolienne.....	89
IV.2.2 Générateur diesel	91
IV.2.3 Batterie.....	92
IV.3 Données météorologiques de la région d'Adrar	92
IV.4 Courbe de charge du site étudié	94
IV.5 Bilan énergétique du système éolien-diesel.....	95
IV.6 Analyse écologique du système hybride.....	96
IV.7 Analyse technico-économique du système étudié.....	98
IV.8 Comparaison entre les deux systèmes : éolien et diesel.....	99
IV.8.1 Plan économique	99
IV.8.2 Plan environnemental.....	100
IV.9 Analyse énergétique.....	100
IV.9.1 Modèle de l'éolienne seule en service ($10 \leq V_m < 17$) m/s	101
IV.9.2 Modèle du générateur diesel ($V_m < 3$ m/s).....	102
IV.9.3 Modèle WTG/DG en service ($3 \geq V_m > 10$)m/s)	103
IV.10 Conclusion	106
CONCLUSION GENERALE	109
BIBLIOGRAPHIQUES.....	111
ANNEXE	118
TRAVAUX SCIENTIFIQUES DE LA THESE DE RECHERCHE.....	121

Table des figures

-Fig 1.1: Atlas mondial des moyennes annuelles de vitesses de vent	2
-Fig 1.2: Capacité éolienne installée en MW dans le monde entre 1993 et 2009	3
-Fig 1.3: Répartitions des usages de la filière ER en Algérie.....	3
-Fig 1.4: Répartition des centrales diesel dans les régions isolées en l'Algérie.....	5

Chapitre. I: Vent et son influence sur le choix du site

-Fig I.1: Vue schématique de la couche atmosphérique standard	9
-Fig I.2: Force de Coriolis.....	10
-Fig I.3: Vue schématique de la couche limite atmosphérique.....	11
-Fig I.4: Circulation atmosphérique simplifiée (Hiver dans l'hémisphère Nord)	12
-Fig I.5: Circulation du vent autour des systèmes de pression.....	14
-Fig I.6: Brises de mer/terre	15
-Fig I.7: Brise de vallée/montagne	16
-Fig I.8: Instrument de mesure de la direction et la vitesse du vent.....	16
-Fig I.9: Variations mensuelles moyennes.....	17
-Fig I.10: Variations inter annuelles	17
-Fig I.11: Variations avec l'altitude	18
-Fig I.12: Influence de la végétation sur les vents dominants.....	19
-Fig I.13: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.....	22
-Fig I.14: Densité de puissance moyenne récupérable à 10 m du sol.....	25
-Fig I.15: Carte de La région d'Adrar.....	27
-Fig I.16: Histogramme des fréquences et la courbe de Weibull pour Adrar	29
-Fig I.17: Rose de vent pour le site d'Adrar	30

Chapitre. II : Etat de l'art sur le système d'énergie hybride

-Fig II.1:Classification des perturbations du point de vue qualité d'énergie	33
-Fig II.2:Différentes sources utilisables dans un système électrique hybride	34
-Fig II.3:Schéma solaire-éolien, stockage à batteries, installation isolée.....	37
-Fig II.4: Schéma solaire-éolien, batteries de stockage et hydrogène, installation isolée	37
-Fig II.5: Schéma solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée	38
-Fig II.6:Schéma éolien, stockage à hydrogène et par super condensateurs, installation isolée.....	38
-Fig II.7: Schéma éolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée	39
-Fig II.8: Schéma du système hybride éolien-Diesel.....	40
-Fig II.9:Variation de la puissance produite par SEHD en fonction de la vitesse du vent	41
-Fig II.10: La ferme éolienne d'Adrar.....	42
-Fig II.11:Conversion de l'énergie cinétique du vent	43
-Fig II.12:Correspondance taille-puissance des éoliennes	43
-Fig II.13:Représentation des concepts d'éoliennes (a) à axe horizontal et (b) à axe vertical	44
-Fig II.14:Coefficient de puissance des différentes configurations d'éoliennes	45
-Fig II.15: Eléments constituant une éolienne	46
-Fig II.16:Puissance de la turbine en fonction de la vitesse du rotor pour différentes vitesses du vent	47
-Fig II.17:Diagramme de la vitesse angulaire sur l'arbre en fonction de la vitesse	48
-Fig II.18: Flux d'air sur une de pales profil (stall).....	50
-Fig II.19: Variation de l'angle de calage d'une pale	50
-Fig II.20: Système de conversion éolien avec SCIG à vitesse fixe	51
-Fig II.21: Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA	52
-Fig II.22: Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable	53
-Fig II.23: Configuration du générateur diesel.....	54
-Fig II.24: Classification des stockages d'énergie.....	55
-Fig II.25: Cellule électrochimique de base	55

Chapitre. III : Modélisation et commande du Système d'énergie Hybride

-Fig III.1: Schéma présentatif d'un système hybride étudié	59
-Fig III.2: Structure du système éolien.....	60
-Fig III.3: Schéma d'une éolienne.....	60
-Fig III.4: schéma de bloc du vent	61
-Fig III.5: Modèle du vent.....	62
-Fig III.6: Théorie de Betz	63
-Fig III.7: Coefficient de puissance	63
-Fig III.8: Puissance théorique disponible d'une éolienne donnée	65
-Fig III.9: Coefficient de puissance pour différentes valeur de β	66
-Fig III.10: Schéma de la turbine éolienne.....	66
-Fig III.11: Schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique	67
-Fig III.12 : Schéma de bloc d'asservissement de la vitesse de la turbine.....	67
-Fig III.13 : Application du système d'orientation des pales.....	68
-Fig III.14: Schéma bloc de du système d'orientation des pales	68
-Fig III.15 : Modélisation du système de régulation de l'angle de calage	69
-Fig III.16 : Structure de la génératrice synchrone.....	70
-Fig III.17 : Développement des enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (dq)	70
-Fig III.18 : Machine synchrone à aimant permanent.....	72
-Fig III.19 : Modèle simplifié du générateur diesel	73
-Fig III.20 : Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié	73
-Fig III.21 : Modèle équivalent d'un enroulement	75
-Fig III.22 : Evolution de la tension avec le temps, durant la charge et la décharge	77
-Fig III.23 : Schéma électrique simplifié d'une batterie	77
-Fig III.24 : Schéma de Simulation de la batterie (Ni-Cd)	78
-Fig III.25 : Pont de redresseur.....	79
-Fig III.26 : Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur	79
-Fig III.27 : Hacheur réversible en courant.....	80
-Fig III.28 : Topologies d'onduleurs NPC trois niveaux.....	81
-Fig III.29 : Structure d'un bras de l'onduleur	82

Chapitre. IV : Application au système Hybride Eolien- Diesel

-Fig IV.1 : Organigramme de simulation du gestionnaire	87
-Fig IV.2 : Schéma global du système.....	89
-Fig IV.3 : Turbine type Wind World A/S W2080 / 120 kW.....	90
-Fig IV.4 : Courbe de puissance relative en fonction de vitesse du vent	91
-Fig IV.5 : Vitesse du vent moyenne annuelle pour le site étudié (Adrar).....	93
-Fig IV.6 : Vitesse du vent moyen journalier en Mai.....	93
-Fig IV.7 : Vitesse du vent moyen journalier en Octobre.....	94
-Fig IV.8 : Répartition journalière de la charge électrique.....	94
-Fig IV.9 : Puissance journalière produite par WDHS au mois de Mai	95
-Fig IV.10 : Puissance journalière produite par WDHS au mois d'Octobre.....	95
-Fig IV.11 : Consommation de carburant en fonction de la puissance générée par DG	96
-Fig IV.12 : Gain du carburant récupéré.....	97
-Fig IV.13 : Emission de CO ₂ en fonction de la consommation de carburant	98
-Fig IV.14 : Gain technico-économique du système étudié.....	98
-Fig IV.15 : Schéma de simulation du système du éolien avec la charge	101
-Fig IV.16 : L'évolution des tensions statoriques générées par l'éolienne	101
-Fig IV.17 : L'évolution des courants statoriques générés par l'éolienne.....	102
-Fig IV.18 : Schéma de simulation du système du générateur diesel avec la charge	102
-Fig IV.19 : L'évolution des tensions statoriques	103
-Fig IV.20 : L'évolution des courants statoriques	103
-Fig IV.21 : Courants produits par (Eolienne/Diesel).....	104
-Fig IV.22 : Aperçu de La fréquence	104
-Fig IV.23 : Tensions simples de phase «A, B, C » générées par l'onduleur.....	105
-Fig IV.24 : Allure des courants de phases avec charge	106

Liste des tableaux

-Table I.1: Paramètres de rugosité en fonction de l'environnement	19
-Table I.2: Caractéristiques des stations de mesures	21
-Table I.3: Moyennes mensuelles et annuelles de la vitesse du vent et de l'emplacement des différents sites en Algérie.....	23
-Table I.4: Les données climatiques de la wilaya d'Adrar	26
-Table I.5 : Distribution de fréquences par secteur	28
-Table I.6: Fréquences d'histogramme en fonction de centre des classes des vitesses et les fréquences de Weibull.....	28
-Table II.1 : Classification des SEH par gamme de puissance.....	35
-Table II.2 : Classification des taux de pénétration des systèmes éoliens-diesel proposée par Steve Drouilhet	36
-Table II.3 : Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et à axe vertical..	45
-Table II.4 : Comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.....	48
-Table III.1 : Excitation des interrupteurs.....	83
-Table IV.1 : Caractéristiques techniques de Wind World A/S W2080 / 120 kW	90
-Table IV.2 : Paramètres du groupe traditionnel.....	92
-Table IV.3 : Caractéristiques de la batterie	92
-Table IV.4 : Résumé des calculs journaliers des coûts économiques générés par le système étudié.....	99
-Table IV.5 : Comparaison économique entre les WTG et DG.....	100
-Table IV.6 : Coût du système DG.....	100
-Table IV.7 : L'émission de CO ₂ généré par DG.....	100

Liste des abréviations

ER : Energie Renouvelable

CLA : Couche limite atmosphérique.

CLS : Couche limite de surface.

V_h : Vitesse de vent à hauteur de mesure en [m/s].

h : Hauteur de mesure en [m].

α : Valeurs de rugosité

Ed : Energie Disponible [kWh/m²/an]

CDER : Centre de Développement de l'Energie Renouvelable.

ONM : Office National de Météorologie.

V_i : Vitesse du vent classé en [m/s].

$f(V_i)$: Fréquence d'occurrence.

n : Nombre d'observations.

ρ : Masse volumique de l'air au niveau de la mer.

P_{Betz} : Puissance maximale de betz [W/m²]

A : Section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor [m²].

V : Vitesse du vent [m/s].

$f(V)$: Distribution en fréquences des vitesses mesurées.

K : Facteur de forme sans dimension.

A : Facteur d'échelle [m/s].

σ : Ecart type [m/s]

NNE: Nord Nord Est.

ESE: Est Sud Est.

SSO : Sud Sud Ouest.

ENE: Est Nord Est .

SSE: Sud Sud Est.

NNO: Nord Nord Ouest.

OSO: Ouest Sud Ouest.

ONO: Ouest Nord Ouest.

SEH : Système d'Energie Hybride.

SHED: Système Hybride Eolien-Diesel.

TPP : Taux de Pénétration en Puissance.

TPE : Taux de Pénétration en Énergie.

TPPI : Taux de Pénétration en Puissance Instantanée.

JEDHP: Jumelage éolien-diesel à haute pénétration.

GADA: Génératrice Asynchrone Double Alimentation.

GE: Groupe Electrogène.

MPPT : Maximum Point Tracking

P_{max} : Puissance maximale

C_{pmax} : Coefficient de puissance maximale

λ: Vitesse spécifique du vent.

B : Angle de calage des pales de l'éolien, en degré

Ω_{opt} : Vitesse de rotation optimale

PMSG : Générateur Synchrone à Aimant Permanent

SCIG : Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil

WRIG: Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné

DFIG : Générateur Asynchrone doublement alimenté.

S : Glissement

P_s : Puissance de sortie

SG : Générateur Synchrone

WRSG : Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

CA : Courant Alternatif

CC : Courant Continu

q_{max} : Capacité nominale [Ah]

SOC : Etat de charge (State of charge).

V_v : Vitesse du vent [m/s]

ω : Pulsation [rad/s]

F_{rot} : Force de rotation de l'aéromoteur.

F_{rés} : Force résultante.

F_{ax} : Force axiale.

V₁ : Vitesse du vent en amont.

V₂ : Vitesse du vent en aval.

P_m : Puissance extraite

S : Surface [m^2]
 P_{mt} : Puissance théorique
 Ω_1 : Vitesse de rotation avant multiplicateur.
 Ω_2 : Vitesse de rotation après multiplicateur.
R : Rayon de l'aérogénérateur.
G : Rapport du multiplicateur de vitesse.
 ρ : Densité de l'air, environ 1,3 [kg/m^3].
S : Surface balayée par l'hélice en [m^2].
 P_m : Puissance mécanique en [W].
R : Rayon du rotor.
i : Angle d' incidence
 C_{em} : Couple électromagnétique
 C_{vis} : Le couple des frottements visqueux
 C_g : Couple issu du multiplicateur.
 \mathcal{B}_{ref} : Angle de référence
J : Moment d'inertie de la partie tournante
 J_g : Inertie de la génératrice.
 J_t : Inertie de la turbine.
f : Coefficient de frottement visqueux.
 U_{ref} : Tension de référence aux bornes de l'actionneur de l'angle d'orientation de la pale
 C_{mot} : Couple électromagnétique de l'actionneur de l'angle d'orientation de la pale.
 $C_{mot-ref}$: Couple électromagnétique de référence de l'actionneur de l'angle d'orientation de la pale
 $[U_{as}, U_{bs}, U_{cs}]$: Tensions des phases statoriques.
 $[i_{as}, i_{bs}, i_{cs}]$: Courants des phases statoriques.
 $[\varphi_{as}, \varphi_{bs}, \varphi_{cs}]$: Flux totaux à travers les bobines statoriques.
 Φ_e : Flux des aimants à travers le circuit équivalent direct.
 i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park [A].
 U_{sq}, U_{sd} : Tensions statoriques dans le repère de Park [V].
 R_s : Résistance statoriques [Ω]
 L_s : Inductance cyclique statorique [H]
p : Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.
 ω : Pulsation des tensions [rad/s].
MD : Moteur Diesel
 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.

α_{GD} et β_{GD} : Coefficients de la courbe de consommation fournies par le fabricant [l/kWh].

I_{ex} : Courant d'excitation

$P_{GD}(t)_{gen}$: Puissance générée par le GD [kW].

$P_{GD}(t)_{rat}$: Puissance nominale de GD [kW].

n_s : Vitesse de rotation [tr/min] .

V : Tension aux bornes d'un enroulement de la machine [V] .

R_g : Résistance de l'enroulement

L_g : inductance synchrone [H]

e_g : f.é.m. à vide [V]

J_{ds} : Inertie totale de l'ensemble moteur diesel générateur synchrone.

Ω_s : Vitesse de rotation.

T_d : Couple mécanique sur l'arbre.

T_{em_g} : Couple électromagnétique.

Ni-Cd : Nickel-Cadmium

E : Tension de batterie (V)

E_0 : Tension de constante de batterie (V)

V_p : Tension de polarisation (V)

Q_b : Capacité de batterie (AH)

Introduction générale

1. Généralités

L'utilisation des énergies renouvelables n'est pas nouvelle. Celles-ci sont exploitées par l'homme depuis longtemps. Sachant qu'autrefois les moulins à eau, à vent, bois de feu, bateau à voile ont largement contribué au développement de l'humanité. Elles constituaient une activité économique à part entière, notamment en milieu rural où elles étaient aussi importantes et aussi diversifiées que la production alimentaire.

Mais dans les pays industrialisés, dès le XIX^{ème} siècle, elles furent progressivement marginalisées aux profits d'autres sources d'énergie que l'on pensait plus prometteuses.

Des récentes estimations ont montré qu'actuellement près de 2.2 milliards d'individus ne sont toujours pas raccordé aux grands réseaux d'électricité [1] (ce qui représente environ 44% de la population mondiale), pour la plus part située dans les pays du tiers monde dont l'Algérie, dans la partie sud algérienne du fait des plus faibles revenus, et la présence des régions rudes et d'une faible densité de population l'électrification des sites isolés pose un grand problème.

Face à la demande en électricité, toujours croissante de nos jours, et loin de l'utilisation des énergies fossiles polluantes comme le pétrole et le gaz, plusieurs pays se sont tournés vers la nouvelle forme d'énergie dite *énergies renouvelables*. En effet, un véritable challenge mondial est pris au sérieux aujourd'hui, aussi bien sur la politique de réduction des émissions de gaz à effet de serre, en les ramenant à un niveau tolérable selon la convention de Kyoto .Ceci a été recommandé à la 3^{ème} Conférence des Parties de la Convention – Cadre des Nations Unies sur les changements climatiques qui s'est tenue à Kyoto en décembre 1997. Dans cette logique, la Commission européenne a adopté en 2008 un « paquet » de directives consistant à indexer pour moitié sur le PIB des états-membres l'objectif des « trois fois 20 » : Réduction des émissions de gaz à effet de serre de 20 % par rapport au niveau de 1990, amélioration de 20 % en matière d'efficacité énergétique et part des énergies renouvelables dans la consommation totale d'énergie augmentée à 20 % d'ici à 2020[2].

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires.

Dans ce contexte, les nouvelles énergies vertes dite « renouvelables » sont réapparues et prennent peu à peu une place indéniable dans le marché d'électricité. Parmi celles-ci, l'éolien apparaît actuellement en bonne place comme énergie d'appoint complémentaire à l'énergie fossile et nucléaire, puisque l'énergie potentielle des masses d'air en mouvement représente, au niveau mondial, un gisement considérable (Figure.1.1).

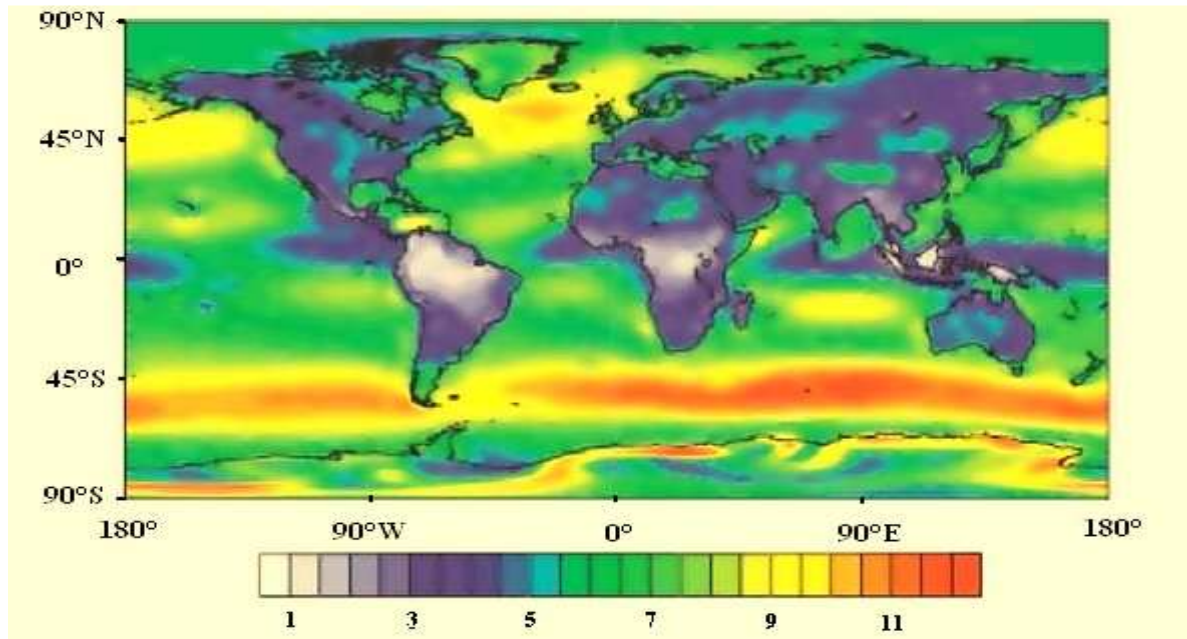


Figure. 1.1 Atlas mondial des moyennes annuelles de vitesses de vent.

Malgré la crise financière de ces dernières années et ses conséquences, le premier marché mondial de l'éolien a pu résister. En effet, selon les premières estimations, une puissance de 37 GW, soit près de 10 GW de puissance supplémentaire par rapport à l'année 2008 ont été installées. A cet égard, la Chine a doublé en 2009 sa capacité de production (+ 13 GW) devançant ainsi la progression des Etats-Unis (+ 10 GW). L'Europe, qui est traditionnellement le plus gros marché en terme d'énergie éolienne, a installé dans la même année 10,5 GW (dont 2,5 en Espagne et 1,9 en Allemagne), elle dispose désormais d'un parc éolien de 74,7 GW qui a produit 163 TWh en 2009, ce qui représente 4,8% des besoins en électricité. Selon un rapport commandé par GWEC, la capacité installée mondiale actuelle (157,9 GW) (Fig.1.2) permet de produire 340TWh d'électricité propre et d'économiser 204 millions de tonnes de CO₂ par an. L'éolien représente désormais 340 millions de MWh de production électrique par an, soit 2% de la consommation totale d'électricité dans le monde et a attiré un total d'investissements de 63 milliards de dollars.

En Europe, la France possède le deuxième meilleur potentiel éolien après la Grande-Bretagne, grâce notamment à son littoral étendu. De ce fait, une puissance éolienne de 4 492 MW répartie sur 446 fermes éoliennes était installée fin 2009. Aujourd'hui, quatre régions leaders en termes de puissance installée sont distinguées : la Picardie (630 MW), la Lorraine (490 MW), le centre (490 MW) et la Bretagne (430 MW).

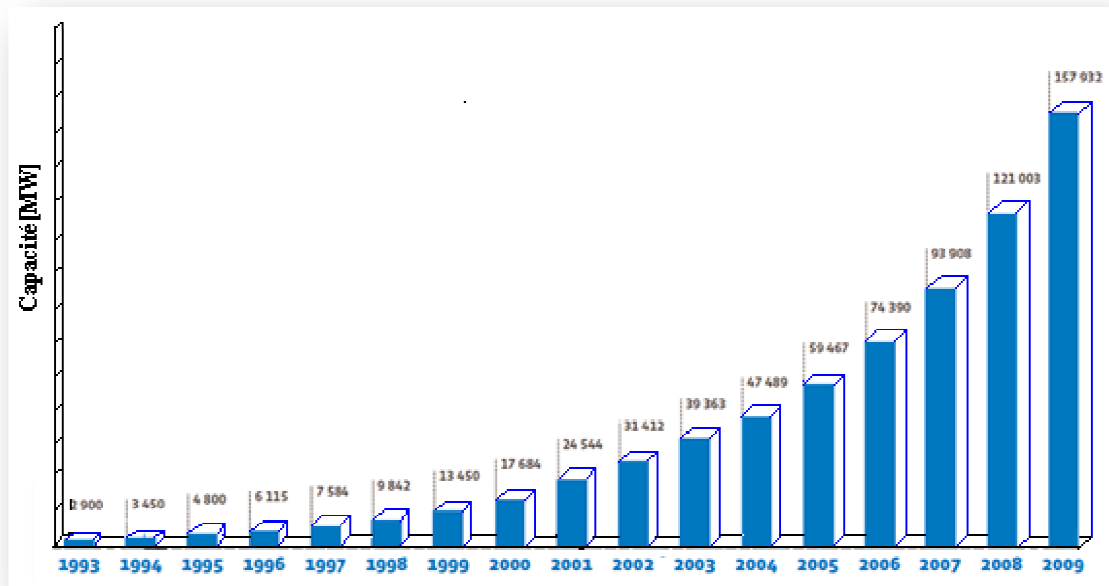


Figure. 1.2 Capacité éolienne installée en MW dans le monde entre 1993 et 2009.

En Afrique du Nord, le développement de la puissance éolienne continue en Egypte, Maroc et Tunisie avec respectivement 55 MW, 10 MW et 34 MW de nouvelles capacités installées. Au Moyen Orient, l'Iran a installé 17 MW de nouvelle capacité. Le total de la puissance éolienne installé jusqu'en 2008, était de 669 MW.

En ce qui concerne l'Algérie, les énergies renouvelables n'ont pas encore connu à l'heure actuelle le développement qui permettrait leur exploitation, malgré le gisement en énergies renouvelables dont dispose l'Algérie. Ceci constitue un atout majeur qui pourra être valorisé pour faire de l'Algérie un fournisseur en énergie électrique et la figure suivant montre la répartition des usagers de la filière ER en Algérie (Figure.1.3).

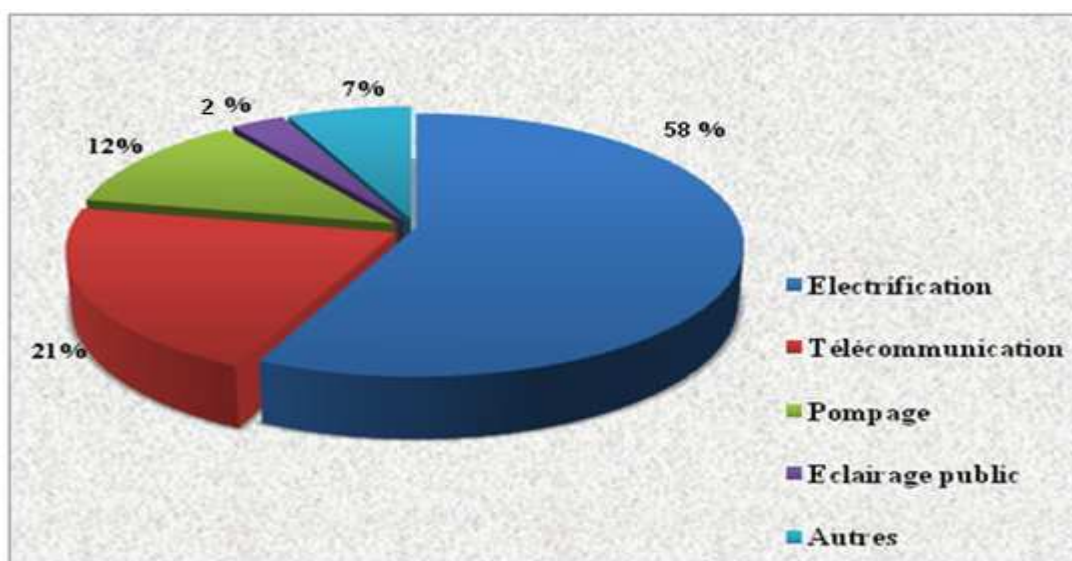


Figure. 1.3 Répartitions des usagers de la filière ER en Algérie [8].

Heureusement, cette année une décision présidentielle sur l'orientation de l'Algérie vers les énergies renouvelables a été prise. De ce fait, un programme très ambitieux de développement de ces énergies renouvelable a été adopté récemment par le gouvernement en visant une contribution de ces énergies à hauteur de 40% de la production nationale d'électricité à l'horizon 2030. Dans ce contexte, 65 projets pour la période 2011/2020, dont 10 projets pour la seule phase pilote 2011-2013 ont été identifiés. Ces projets seront menés dans le but de produire 22 000 MW à l'horizon 2030, dont 10 000 MW pourraient être dédiés à l'exportation.

L'Algérie vise ainsi l'investissement dans le domaine de la production électrique à partir de la filière éolienne pour atteindre 3% du bilan national à l'horizon 2027. Un premier pas a été fait par le groupe Sonelgaz, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne à Adrar d'une puissance de 10 MW, au groupe français Vergnet. L'énergie produite par cette ferme, qui sera opérationnelle en 2012, sera injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar.

2. Problématique des sites isolés en Algérie et solutions possibles

Dans la plupart des régions isolées, le générateur diesel (groupe électrogène) est la source principale d'énergie électrique (Figure1.4). Pour ces régions, le carburant est généralement plus cher car il faut prévoir des coûts de transport additionnels vers ces endroits isolés, parfois difficilement accessibles. C'est pourquoi l'utilisation des groupes électrogènes diesels combinés à une source d'énergie renouvelable, et un système de stockage, formant ainsi un système hybride, est appelée à jouer un rôle essentiel permettant d'optimiser les systèmes de production d'électricité sans interruption :

- Assurant une protection de l'environnement notamment en termes de la réduction des émissions de CO₂.
- Réduisant la consommation du carburant par les groupes électrogènes diesels.
- Améliorant le rendement.
- Diversifiant la sécurité d'approvisionnement, sachant que la source éolienne est gratuite et inépuisable.

Les variations de la puissance produite par l'éolienne peuvent être absorbées par le groupe électrogène, ou par les systèmes de stockage (volant d'inertie, batterie, etc. ...).

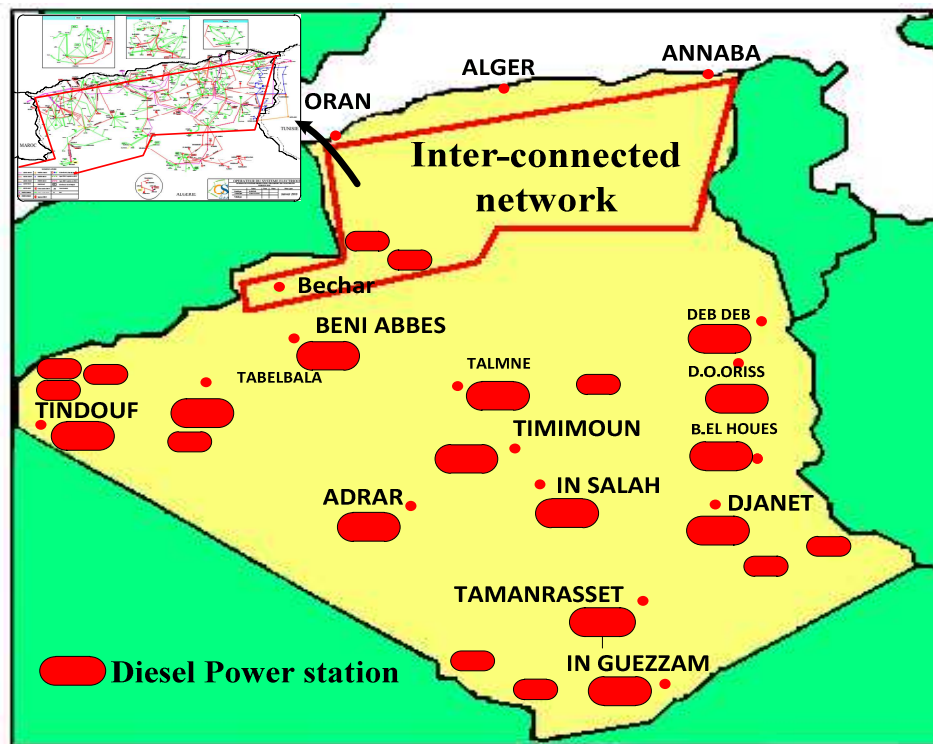


Figure .1.4 Répartition des centrales diesel dans les régions isolées en l'Algérie [19].

3. Objectifs

Le gisement éolien en Algérie est très diversifié. Il varie d'une zone à une autre selon la cartographie et le climat de cette dernière. C'est dans cet objectif que vient s'insérer ma thèse qui porte sur l'une de ces énergies renouvelables qui est l'énergie éolienne et la problématique de gestion énergétique multi sources avec charge, dans un système hybride de production d'énergie, (éolien/diesel), associé avec un système de stockage c.à.d. trouver une stratégie de gestion et optimisation des échanges de puissances entre les différents éléments du système hybride pour alimenter un site isolé.

4. Structure de la thèse

Notre thèse est répartie en quatre chapitres dont chacun dispose d'un but bien déterminé.

-Le premier chapitre consiste à donner une aide générale sur le vent et choix du site venté pour implanter le système hybride éolien/diesel.

-Le deuxième chapitre consiste à donner une aide générale sur les systèmes hybrides et définir des différents composants du système, un aperçu sur les différents composants constituant : l'aérogénérateur, les différents types (à axe horizontal, à axe verticale), leurs classifications, les modes de régulation de la vitesse de rotation ainsi que l'architecture de chaînes de conversion d'énergie sont citées en association avec les différents types de génératrices et leur domaines applications .

-Le troisième chapitre a pour objectif la modélisation énergétique de chaque composant du Système d'Energie Hybride(SEH).La turbine éolienne de type tripale à axe horizontal est modalisée à partir d'un modèle mathématique bien contrôlé avec asservissement de vitesse. La modélisation la chaine de conversion éolienne basée une génératrice synchrone à aimants permanents parce qu'elle est très intéressante dans les applications éoliennes dans un site isolé et autonome. Ensuite, la modélisation les deux sources ; générateur Diesel avec différentes éléments ainsi le système de stockage.

-Le quatrième chapitre sera consacré à l'analyse et l'interprétation des résultats énergétiques et technico-économiques de notre système proposé.

Chapitre I : Vent et son influence sur le choix du site

I.1 Introduction

Le vent est une force de la nature expérimentée par l'homme depuis les temps anciens, bien avant que ce dernier n'ait vraiment compris sa source physique et ses lois fondamentales. Les bateaux à voiles, les cerfs-volants, les girouettes, les moulins à grains n'ont pas attendu les équations de Navier-Stokes ou les ordinateurs.

Le vent est une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre. Il doit ses caractéristiques à sa nature même : le vent naît des processus cycliques (rotation terrestre, convection chaud/froid, etc.) appliqués à l'atmosphère puis à l'air dans un contexte topographique défini.

La première partie du chapitre sera consacrée à l'introduction d'éléments de physique atmosphérique en définissant les couches ainsi que les forces qui régissent le mouvement des masses d'air et les causes principales des vents. En seconde partie sont présentés les critères de choix des sites éoliens et le choix du site pour l'implantation du Système Hybride (Eolien-Diesel) SHED pour alimenter une zone autonome.

I.2 Origine du vent

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à l'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre [4-36]. Ces déplacements sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud. On pourrait aisément prévoir la direction des vents dominants si elles n'étaient pas perturbées par les orages, les obstacles naturels ou les dépressions cycloniques.

I.3 Eléments de physique atmosphérique

I.3.1 Structure atmosphérique

L'atmosphère standard se compose de deux parties essentielles, (voir Figure I.1), à savoir [37] :

- La troposphère dont l'épaisseur représente 80% de la structure atmosphérique, et dont la limite inférieure est le sol et la limite supérieure la tropopause, son épaisseur est de l'ordre de 10 km.
- La stratosphère qui représente les 20% au-dessus de la tropopause et dont la limite supérieure est l'ionosphère.

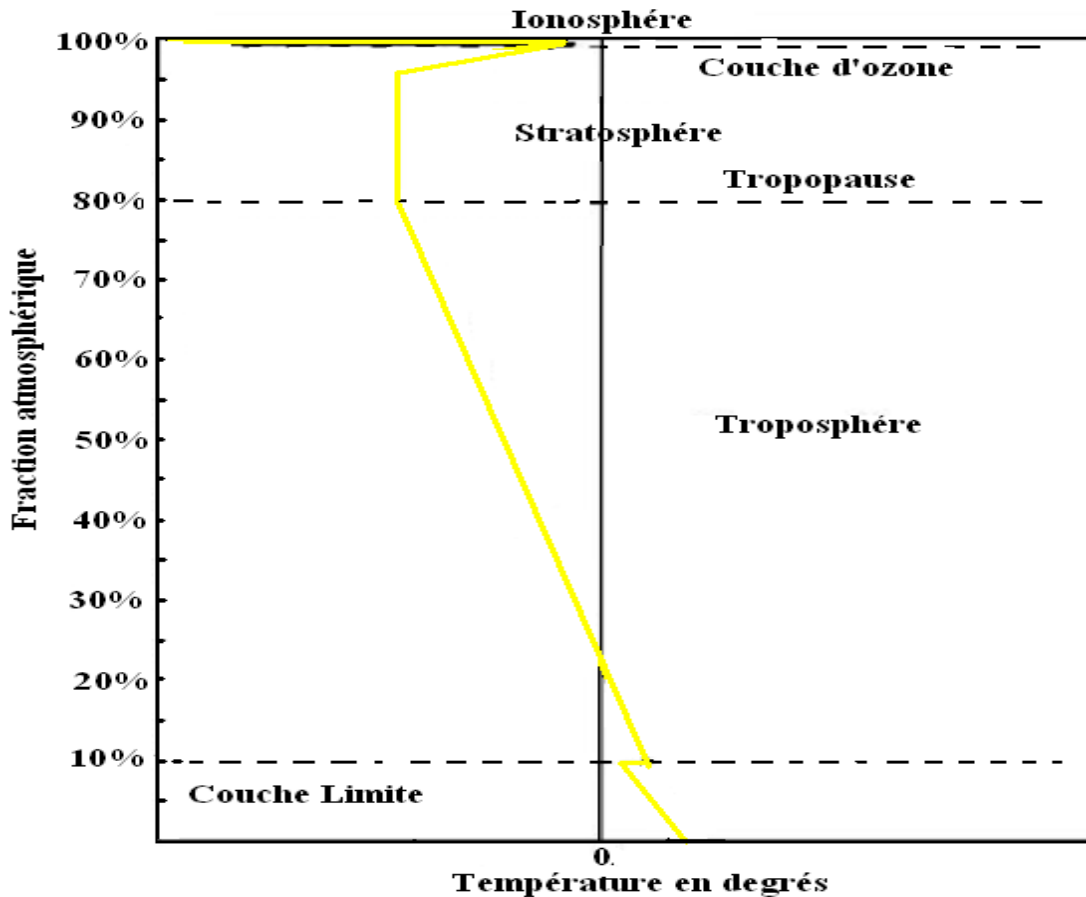


Figure I.1 Vue schématique de la couche atmosphérique standard.

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

1. La force gravitationnelle.
2. La force due au gradient de pression.
3. La force de Coriolis.
4. Les forces de frottement.

➤ I.3.1.1 Force gravitationnelle

Conséquence de l'attraction mutuelle des corps, cette force intervient à cause de la grande masse de la terre, elle est dirigée vers le centre de la terre.

➤ I.3.1.2 Force de pression

La force de pression dirigée des hautes pressions vers les basses pressions, ces forces sont dues au gradient de pression résultant de l'échauffement inégal de l'air suivant les latitudes, la nature des sols et la répartition des océans et des continents. Les forces de pressions sont à l'origine du déplacement des masses d'air.

➤ I.3.1.3 Force de Coriolis

Cette force est le résultat de la rotation de la terre autour de son axe et est perpendiculaire à la vitesse du vent (Figure I.2). Elle intervient dans les déplacements atmosphériques en raison de la faiblesse des forces contribuant à mettre l'air en mouvement.

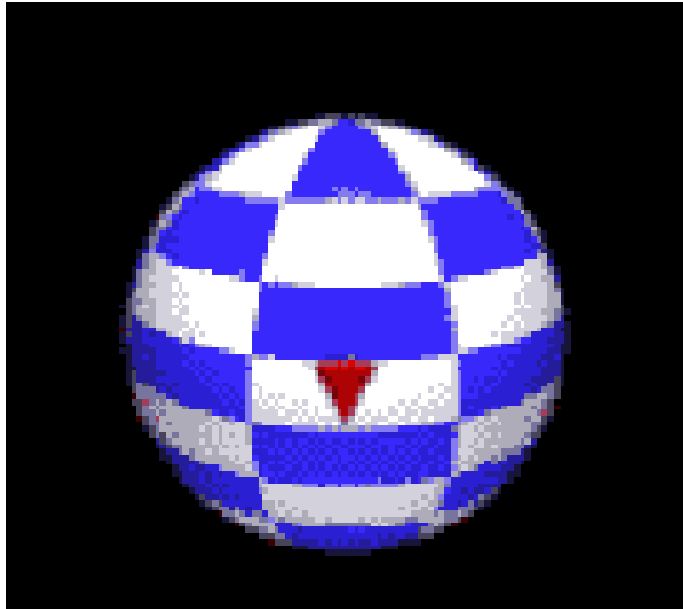


Figure I.2 Force de Coriolis.

➤ I.3.1.4 Forces de frottement

Ces forces traduisent la friction turbulente de l'air avec le sol. Elles interviennent dans la couche limite atmosphérique. La force gravitationnelle et la force du gradient de pression sont les deux forces qui peuvent initier un mouvement d'air. Leurs actions se feront ressentir près du sol dans une zone appelée couche limite atmosphérique.

I.3.2 Couche limite atmosphérique (CLA)

La couche limite atmosphérique [38], dont l'épaisseur est d'environ 1000m, est la couche qui contient 10% du recouvrement de la masse d'air totale et où le déplacement d'air est régi par le gradient de pression. Elle est contrôlée et modifiée partiellement par le frottement aérodynamique de la surface et par l'importance de la stratification de la densité d'air qui résulte des différences de températures entre la surface du sol et l'air ambiant. Elle est fonction de plusieurs paramètres, tel que :

- La vitesse du vent.
- La rugosité des sols
- L'ensoleillement variable suivant les lieux et l'heure de la journée.

Près de la surface terrestre, la présence du sol perturbe l'écoulement de l'air et crée une forte turbulence (vent) alors que dans l'atmosphère libre l'air sous l'action des forces de pression et de Coriolis est uniforme, horizontal et sa vitesse est constante (vent géostrophique). La couche limite atmosphérique, peut être divisée en deux sous couches, la couche limite de surface et la couche limite d'Eckerman (voir Figure I.3).

I.3.2.1 Couche limite de surface (CLS) :

Cette couche dont l'épaisseur varie entre 50 et 100m, est la partie basse de la CLA. Elle est en contact direct avec la surface terrestre. Dans cette région, les effets de la force de Coriolis sont négligeables devant les effets dynamiques engendrés par les frottements au sol ainsi que par la stratification thermique de l'air.

I.3.2.2 Couche limite d'Eckerman :

La couche limite d'Eckerman est la partie supérieure de la couche limite atmosphérique. Le vent est alors influencé par le frottement au sol, la stratification thermique de l'air et la force de Coriolis. Avec l'altitude, les forces de frottement deviennent négligeables devant l'effet de la force de Coriolis, jusqu'à atteindre le vent géostrophique.

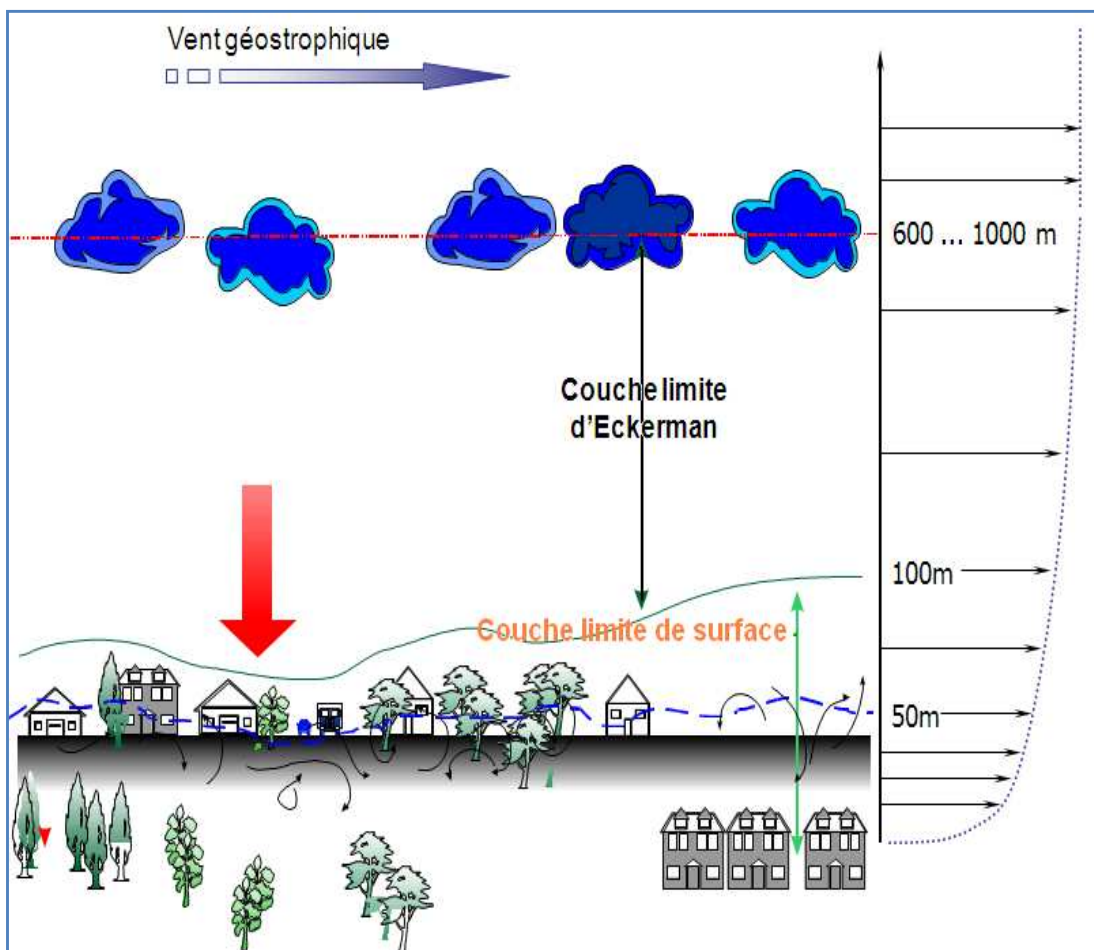


Figure I.3 Vue schématique de la couche limite atmosphérique.

I.4 Les causes principales des vents

I.4.1 La circulation atmosphérique générale et les systèmes de pression semi – permanents

L'atmosphère consiste en une mince couche de gaz qui entoure la terre et qui se trouve réchauffée par le rayonnement solaire. Ce dernier n'étant pas uniforme à la surface de la terre, l'échauffement est donc différent selon les régions. L'air chauffé se dilate et l'air refroidi se contracte ; ce processus crée tout autour du globe des zones de pression relatives hautes ou basses. Par exemple, près de l'équateur l'air chauffé se dilate et s'élève et une fois en altitude s'éloigne de l'équateur en direction du nord et du sud. La diminution de pression à cet endroit se traduit par la présence d'une zone de basse pression atmosphérique. L'air froid près des pôles se contracte, s'accumule à la surface du sol, créant une pression atmosphérique plus élevée. Le vent est fondamentalement de l'air en mouvement, créé par ces différences de pression.

Nous avons à l'échelle terrestre un schéma relativement régulier de systèmes de pression à grande échelle qui produisent des vents importants ; appelés les vents dominants. Ce schéma de base, connu sous le nom de circulation générale, est illustré sous une forme simplifiée par la figure I.4.

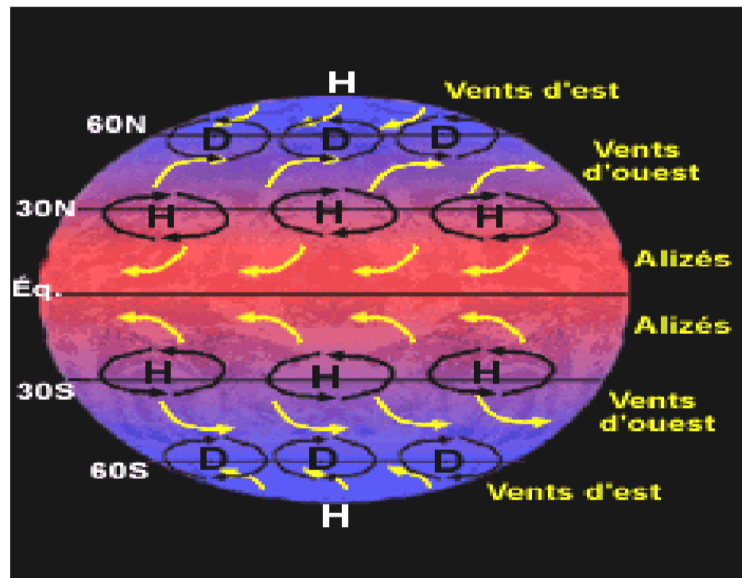


Figure I.4 Circulation atmosphérique simplifiée (Hiver dans l'hémisphère Nord).

Près de l'équateur et au voisinage des latitudes de 60 degrés nous avons des zones de basse pression. Près des latitudes de 30 degrés et au voisinage des pôles nous avons des zones de pression relativement élevées, l'air tend à circuler entre les zones de pression formant de grandes cellules de circulation. L'air circule le long de la surface, depuis les zones de hautes pressions jusqu'aux zones de basses pressions. Il s'élève alors et à partir d'une certaine altitude, retourne vers les zones de hautes pressions, complétant la boucle. Il existe ainsi dans chaque hémisphère trois cellules de circulation. L'air circule le long de la surface, depuis les zones de

hautes pressions jusqu'aux zones de basses pression. Il s'élève alors et à partir d'une certaine altitude, retourne vers les zones et ainsi dans chaque hémisphère trois cellules de hautes pressions, complétant la boucle. Il existe ainsi dans chaque hémisphère trois cellules de circulation, les vents de surface dans ces cellules sont les vents dominants que nous connaissons. Toutefois ces principaux courants de vent ne se déplacent pas exactement vers le nord ou vers le sud. Ils sont déviés par des forces dues à la rotation de la terre, appelées forces de Coriolis. Dans l'hémisphère Nord, la déviation se fait vers le droit, et dans l'hémisphère sud, vers la gauche. Une série de ceintures de vents sont ainsi créées. Entre l'équateur et 30 degrés de latitude N, nous avons des vents de Nord-Est, appelés les Alizés du Nord-Est. De 30 à 60 degrés de latitude N, nous observons des vents d'Ouest dominants, appelés vent d'Ouest des latitudes moyennes ; dont la direction est de 60 degré au pôle Nord où soufflent les vents d'Est polaires. Les vents en altitude sont des vents d'Ouest dans toutes les cellules. On observe les vents correspondants dans l'hémisphère Sud.

Une série de ceintures calmes sont aussi créées les régions voisines des trentième parallèles ou les alizés et les vents d'Ouest des latitudes moyennes divergent sont des zones de vents relativement calmes. De la même façon, la région équatoriale où les deux alizés convergent, est une zone de vents faible. Ces deux zones calmes correspondant à de l'air qui s'élève ou qui s'affaisse.

La description ci-dessus est très simplifiée, les masses continentales, les montagnes, la surface des océans et les principaux courants océaniques modifient ses caractéristiques de circulation générale obligeant les hautes et basses pressions à rester constamment dans certaines régions et en éviter d'autres. Au lieu de simples bandes de hautes et basses pressions d'air entourant la terre, nous avons d'énormes systèmes de pression circulaires connus sous le nom de systèmes de pression semi-permanents. Les systèmes de basse pression semi-permanents « également appelés dépressions cycloniques » sont de vastes zones d'air qui s'élèvent et circulent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre « dans l'hémisphère Nord ». Les systèmes de haute pression semi-permanents « anticyclones » sont de vastes zones d'air descendant, la circulation se faisant dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord (figure I.5).

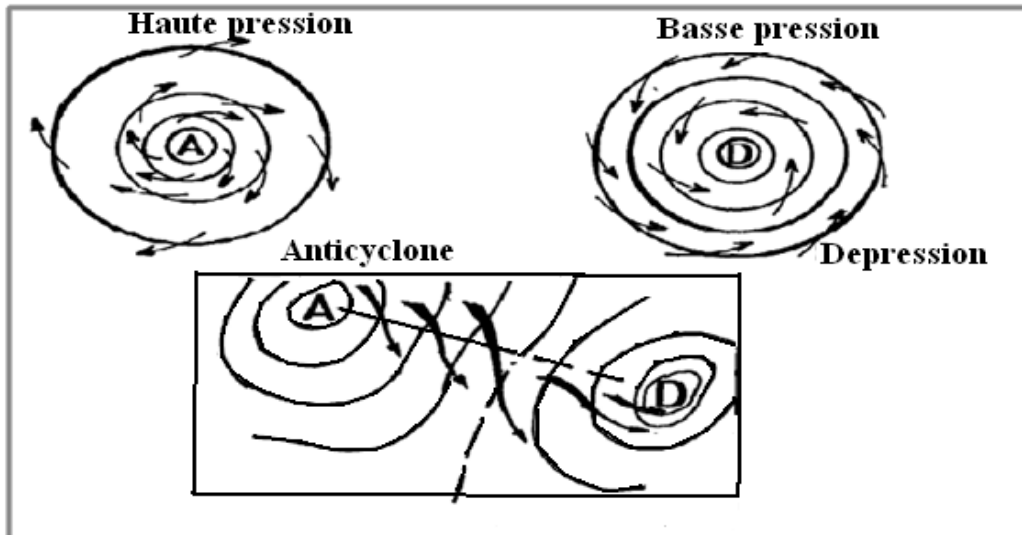


Figure I.5 Circulation du vent autour des systèmes de pression.

Au lieu d'aller directement des hautes pressions vers les basses pressions, les vents ont une trajectoire circulaire autour et entre ces systèmes de pression. En raison de forces centrifuges, les forces de Coriolis et de forces de frottement, les vents ont tendances à se déplacer presque parallèlement aux lignes d'égale pression « isobares ».

I.4.2 Vents locaux

La circulation thermique est une autre cause importante du vent, à un niveau toutefois plus localisé. La surface de la terre est chauffée différemment selon le lieu et la forme des zones relativement chaudes et froides. L'air plus chaud a tendance à monter parce qu'il est moins dense, et l'air plus froid à circuler le long de la surface de terre pour le remplacer, il en résulte un schéma de circulation thermique simple.

La force de la circulation thermique localisée dépend de nombreux facteurs tels que la nature de la surface de la terre à l'endroit considéré, la température et la teneur en humidité de l'air au voisinage de la surface de la terre, et la vitesse de variation de la température de l'atmosphère en fonction de la hauteur au-dessus du sol. En générale, la température de l'atmosphère diminue avec l'altitude, mais la vitesse de refroidissement varie beaucoup selon les conditions locales. Lorsqu'un volume d'air chauffé s'élève, il se dilate, tout en se refroidissant avec l'altitude, mais pas nécessairement à la même vitesse que l'air environnant. Le volume d'air continuera à monter tant qu'il sera plus chaud et moins dense que l'air environnant. Selon les effets combinés de ces facteurs, la montée sera soit retardée, on parle alors de conditions stables, soit accélérée et l'on parle dans ce cas de conditions instables. Dans les endroits ensoleillés arides et chauds, les conditions sont généralement très instables pendant le jour mais tout fait stable la nuit.

Ce schéma fondamental de la circulation thermique peut conduire à la formation de vents localisés. Lorsque la terre se réchauffe au cours de la journée, on observe de façon caractéristique une reprise des vents, due à l'augmentation de la circulation thermique. Dans les régions ensoleillées et arides, la circulation thermique peut donner lieu à des vents forts. Il existe quelques cas particuliers de circulation thermique qui peuvent donner naissance à des vents locaux particuliers, tels que les vents énumérés ci-après.

-La brise de mer/terre est une circulation localisée particulièrement caractéristique des régions côtières (Figure. I.6). Lorsque le soleil brille, la terre se réchauffe plus vite que la mer. Il en résulte que l'air au-dessus de la terre s'élève, entraînant la formation d'une brise venant du large. Pendant la nuit, l'air au-dessus de la terre se refroidit plus que l'air au-dessus de la mer et la circulation est inversée. La brise de mer pendant le jour est de façon générale plus forte que la brise de terre pendant la nuit, en raison des différences de température plus élevées. La brise de mer commence à souffler entre le milieu et la fin de la matinée et prend de la force au cours de la journée, puis disparaît après le coucher du soleil.

Plus tard dans la nuit, la brise de terre plus douce commence à souffler entre le milieu et la fin de la matinée et prend de la force au cours de la journée, puis disparaît après le coucher du soleil. Plus tard dans la nuit, la brise de terre plus douce commence à souffler et se maintient jusqu'au lever du jour. La brise de mer pénètre jusqu'à 20Km à l'intérieur des terres et dans certaines régions elle peut aller jusqu'à 50- 100Km.

Au fur et à mesure que la circulation devient plus forte au cours de la journée, la brise pénètre plus loin à l'intérieur des terres.

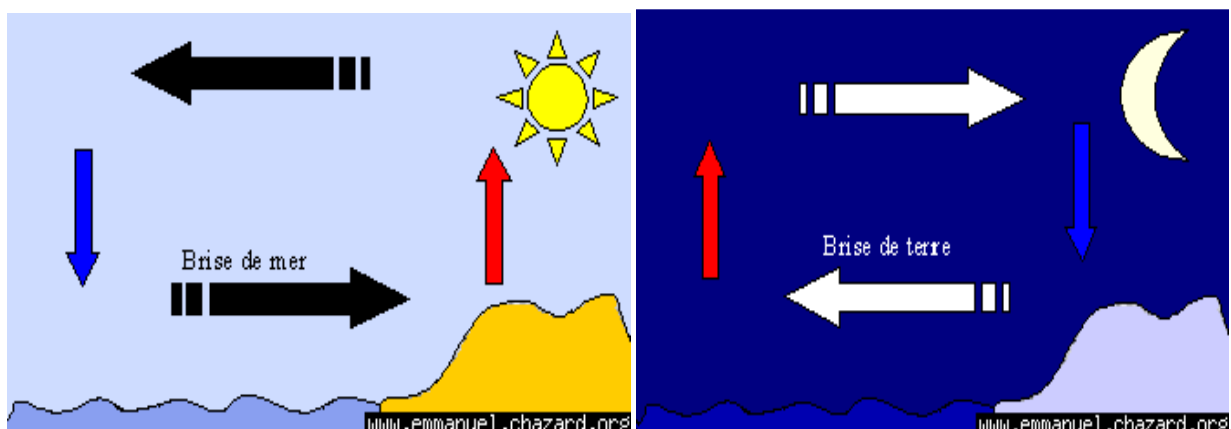


Figure I.6 Brises de mer/terre.

-Les brises des vallées /montagnes sont une autre forme fondamentale de circulation thermique locale, mais on ne les observe toutefois que dans certaines régions montagneuses (figure I.7). Avec l'élévation de la température pendant le jour, l'air dans la vallée se réchauffe et s'élève le long des versants de la montagne. La nuit, l'air se trouvant en altitude sur les versants

se refroidit et retombe le long des pentes de la vallée. Cette circulation est généralement plus faible que la brise de mer/terre ; toutefois, des caractéristiques topographiques particulières à certains endroits peuvent canaliser la circulation, créant ainsi des vents forts.

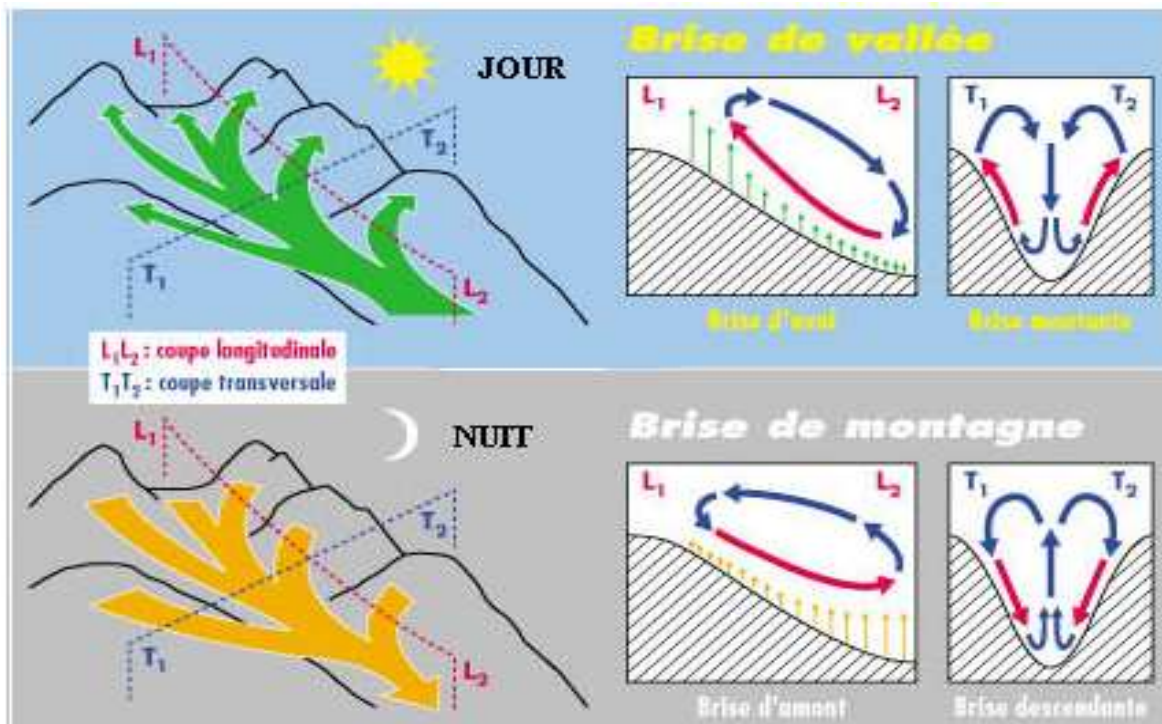
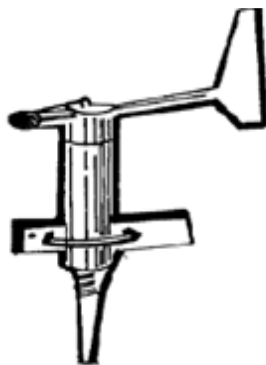


Figure I.7 Brise de vallée/montagne.

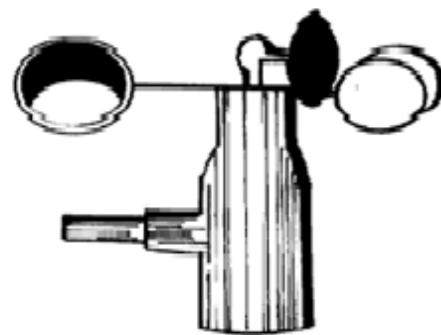
I.5 Le vent et ses variations

Le vent se caractérise par deux grandeurs variables : *la vitesse et la direction*.

A partir des relevés enregistrés par un instrument de mesure, anémomètre on peut calculer la vitesse moyenne mensuelle ou annuelle qui donne un ordre de grandeur de l'importance du vent à l'endroit considéré. A chaque enregistrement de cette vitesse on relève également la direction de l'écoulement donné par une girouette (voir Figure I.8).



GIROUETTE



ANEMOMETRE

Figure I.8 Instrument de mesure de la direction et la vitesse du vent.

Ces deux éléments nous renseignent sur le vent mais il ne faut pas omettre de tenir compte de certaines variations instantanées, saisonnières ou en cours causées par le relief et qui peuvent porter préjudice à une installation ou au succès du projet, en particulier nous citerons :

➤ **Les rafales**

Possédant un caractère instantané, un vent de rafales impose des contraintes au moteur éolien et à son support dont il faudra tenir compte lors du dimensionnement ou de la rédaction du cahier des charges.

➤ **Les variations mensuelles**

La moyenne arithmétique des enregistrements effectués au cours de chaque mois permettra au décideur de choisir le système le mieux adapté aux variations des besoins au cours de l'année (Figure I.9).

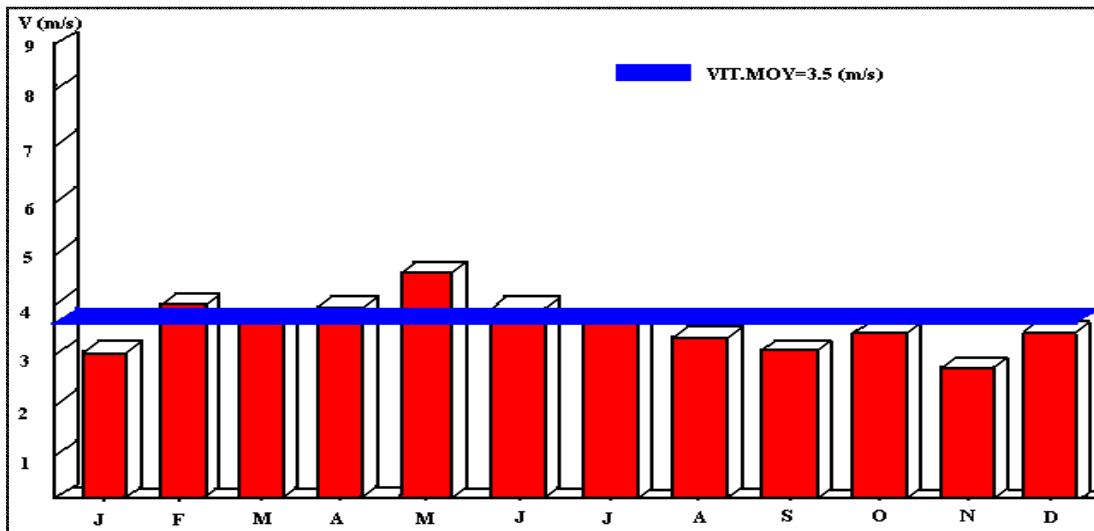


Figure I.9 Variations mensuelles moyennes (exemple).

➤ **Les variations annuelles**

Elles sont répétitives avec une bonne précision d'évaluation, selon les relevés d'une année permettant l'estimation de l'énergie éolienne récupérable sur un site (Figure I.10).

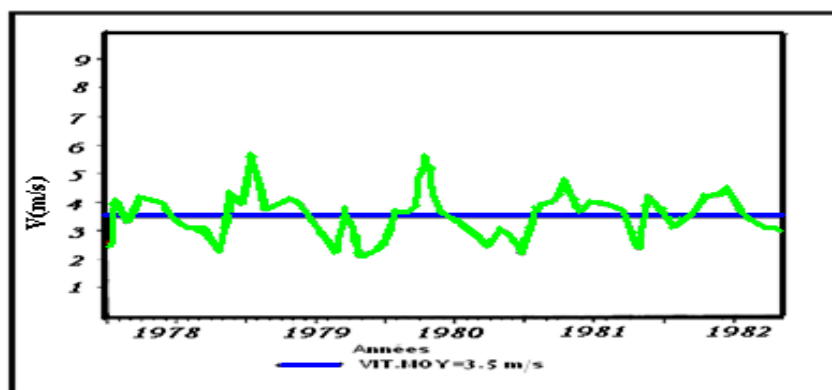


Figure I.10 Variations inter annuelles.

➤ Les variations avec l'altitude

Elles dépendent essentiellement de la nature du sol au dessus duquel se propagent les masses d'air (Figure I.11).

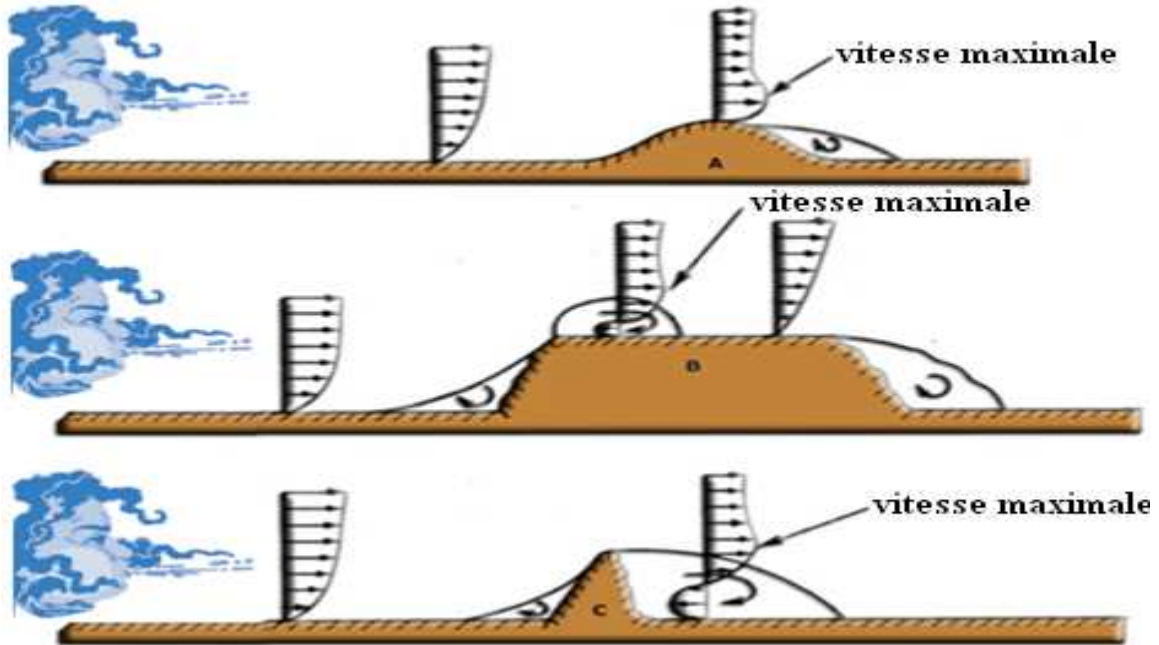


Figure I.11 Variations avec l'altitude.

La vitesse du vent augmente avec l'altitude par rapport au sol [10]. Les données météorologiques en fonction de l'altitude sont fournies pour une altitude de 10m alors que l'altitude des éoliennes est supérieure de 10m. Il est donc nécessaire de disposer de méthodes de Justus en 1978 pour transposer les vitesses du vent à 10 m en vitesses du vent à l'altitude envisagée pour l'éolienne:

$$V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10} \right)^\alpha \quad (\text{I.1})$$

V_h : Vitesse de vent à hauteur de mesure en [m/s].

V_{10} : Vitesse de vent à $h=10\text{m}$ du sol en [m/s].

h : Hauteur de mesure en [m].

Le Tableau (I.1) représente les valeurs de rugosité α en fonction du caractère des obstacles où l'environnement est souvent considéré comme étant égal à 0,15[5].

Table I.1 Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement [34].

Nature du sol	Paramètre de rugosité
-Surface d'un plan d'eau	0.002
-Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0.0024
-Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0.003
-Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0.055
-Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.	0.1
-Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0.2
-Grandes villes avec bâtiments hauts	0.8
-Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1.6

➤ **Les variations de direction**

La turbulence caractéristique des sites perturbés par des obstacles modifie l'écoulement régulier des masses d'air. Ces variations brusques doivent être prises en compte car elles imposent des contraintes sévères à l'installation. La végétation sur le terrain est aussi un bon révélateur du régime de vents dominants

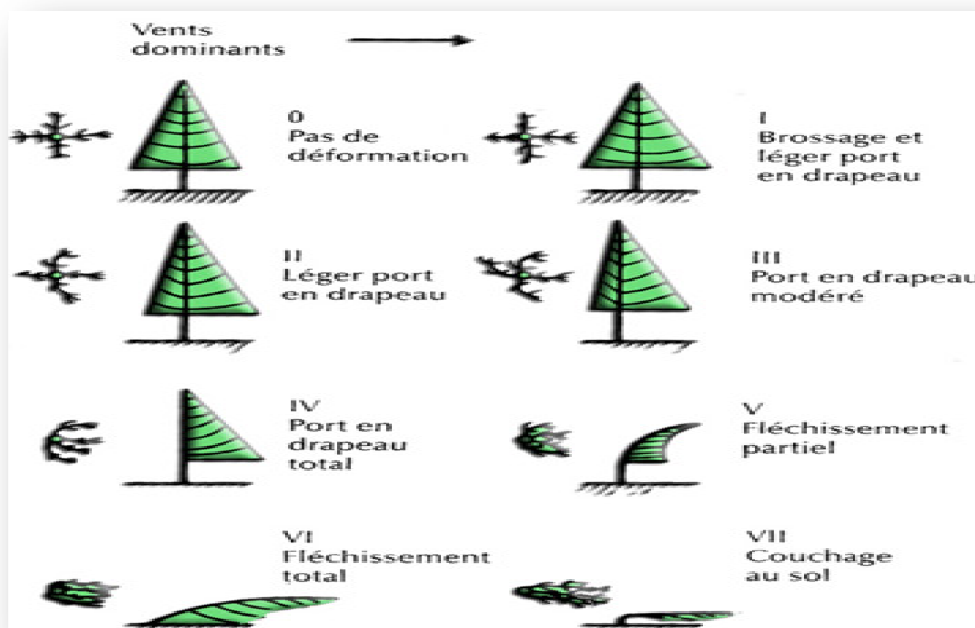


Figure I.12 Influence de la végétation sur les vents dominants

L'indice de déformation de Griggs-Putman donnant les forces du vent suivant la déformation de la végétation est le suivant:

0: vents < 3 m/s

II: vents = 4-5 m/s

IV: vents = 6-7 m/s

VI : vents = 8-9 m/s

I: vents = 3-4 m/s

III: vents = 5-6 m/s

V: vents = 7-8 m/s

VII : vents > 10 m/s

I.6 Critères de choix des sites éoliens

L'évaluation de l'énergie éolienne disponible sur un emplacement donné est probablement l'étape la plus importante du point de vue de l'établissement d'un système de conversion d'énergie éolienne. L'étude de la répartition géographique des ressources de vent disponibles est très complexe parce qu'elle dépend, du climat et de plusieurs paramètres tels que la topographie et l'environnement urbain ; sachant que les cartes annuelles de la vitesse de vent sont importantes. Cependant, les cartes mensuelles de la vitesse de vent permettront à l'utilisateur d'avoir la meilleure information sur l'évolution de cette source d'énergie pour une région donnée. En effet, il est essentiel en installant des systèmes pour que l'énergie éolienne de conversion pour les périodes où ces systèmes sont plus ou moins productifs [11].

Pour révéler les bons lieux d'implantation des éoliens en Algérie, il est nécessaire d'évaluer les caractéristiques du vent (**vitesse moyenne [Vm], densité de puissance [P] et énergie disponible [Ed]**) [20], dans plusieurs sites météorologiques répartis sur tout le territoire Algérien. L'analyse du vent est effectuée à l'aide des données satellitaires du Laboratoire «**d'Énergie Eolienne**» du **CDER** (Centre de **D**éveloppement de l'**E**nergie **R**enouvelable) et **ONM** (Office National de **M**étéorologie).

I.6.1 Données utilisées

Pour l'établissement de l'atlas de la vitesse moyenne annuelle, les vitesses moyennes de 48 stations de l'ONM ont été utilisées. Les mesures prélevées toutes les trois heures et pendant au moins 10 années sans interruption des 21 stations de mesures représentant presque toutes les zones topographiques du pays et sont traitées statistiquement suivant (tableau I.2) [39]. Les vitesses moyennes annuelles du vent des 27 stations établies par Hammouche [7] et publiées par l'Office National de la Météorologiques ont été incluses.

Par ailleurs les vitesses moyennes annuelles du vent des 16 stations situées dans les pays voisins ont été rajoutées pour affiner le tracé de la carte aux frontières [40].

Table I.2 Caractéristiques des stations de mesure.

Sites	Longitude [deg.]	Latitude [deg.]	Hauteur [m]	Rugosité [m]	Période [années]	Altitude [m]	Situation topographique
Skikda	06°54'E	36°53'N	10	0.01	10	1	Côte
Alger	03°15'E	36°43'N	10	0.01	10	24	Côte
Oran	00°37W	35°38'N	10	0.01	10	90	Côte
Tebessa	08°07'E	35°25'N	10	0.03	10	820	Atlas tellien
Constantine	06°37'E	36°07'N	10	0.01	10	694	Atlas tellien
Miliana	02°14'E	36°18'N	10	0.50	10	715	Atlas tellien
Chlef	01°20'E	36°12'N	12	0.01	05	143	Atlas tellien
Mascara	00°09'E	35°13'N	12	0.05	07	511	Atlas tellien
Tlemcen	01°17W	34°57'N	10	0.01	10	592	Atlas tellien
Setif	05°15'E	36°11'N	10	0.01	10	1033	Hauts plateaux
B.B.Arriredj	04°40'E	36°04'N	10	0.01	10	928	Hauts plateaux
Djelfa	03°15'E	34°40'N	10	0.08	09	1144	Hauts plateaux
In Oussera	02°31'E	35°33'N	10	0.08	10	649	Hauts plateaux
KsarChellala	02°19'E	35°10'N	10	0.08	10	800	Hauts plateaux
Tiaret	01°28'E	35°21'N	12	0.02	06	977	Hauts plateaux
El Bayadh	01°00'E	33°40'N	10	0.01	10	1341	Hauts plateaux
In Amenas	09°38'E	28°03'N	10	0.00	10	561	Sahara
El Oued	06°47'E	33°30'N	11	0.01	10	62	Sahara
El Golea	02°52'E	30°34'N	10	0.01	10	398	Sahara
In Salah	2°28'E	27°12'N	10	0.02	10	268	Sahara
Tindouf	08°06W	27°40'N	10	0.00	10	401	Sahara

I.6.2 Localisation des zones les plus venteuses

La carte des vents de l'Algérie estimée à 10 m du sol est présentée en Figure I.13. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de (2 à 6.5) m/s.

Le maximum est obtenu pour la région où on a constaté qu'il y a un potentiel important de vent (5.8-6.5m/s), l'aspect général des cartes obtenues sont semblable avec la carte obtenue en étude (Figure I.13).L'Algérie est généralement est une zone tout à fait venteuse dont 78% de sa surface est caractérisée par des vitesses excédant 3m/s avec environ 40% de ces vitesses est au-dessus des cartes du vent 5m/s ; ce qui prouve que les vitesses les plus ventés sont distribuées dans le sud, tandis que le nord est généralement moins venteux ; sachant qu'on remarqué que la région du sud-ouest a un grand potentiel avec des vitesses environ 5,1(m/s) ; pour l'emplacement tel que In Salah 5,7 (m/s) et Tindouf de 5,7(m/s) et pour l'emplacement d'Adrar 6.3 (m/s). Sachant que la région du sud-ouest du pays a un potentiel significatif de vent pouvant être attribué à deux facteurs :

-Le premier est situé dans un domaine de la différence de pression (vent dans les latitudes près de 30°N).

-Le second est du à des perturbations de temps atteignant la région où l'intensité élevée.

La vitesse moyenne V_m du vent est définie par la relation (2) [20]:

$$V_m = \sum_{j=1}^n V_i \cdot f(V_i) \quad (\text{m/s}) \quad (\text{I.2})$$

Avec

V_i : Vitesse du vent classé.

$f(V_i)$: Fréquence d'occurrence.

n : Nombre d'observations.

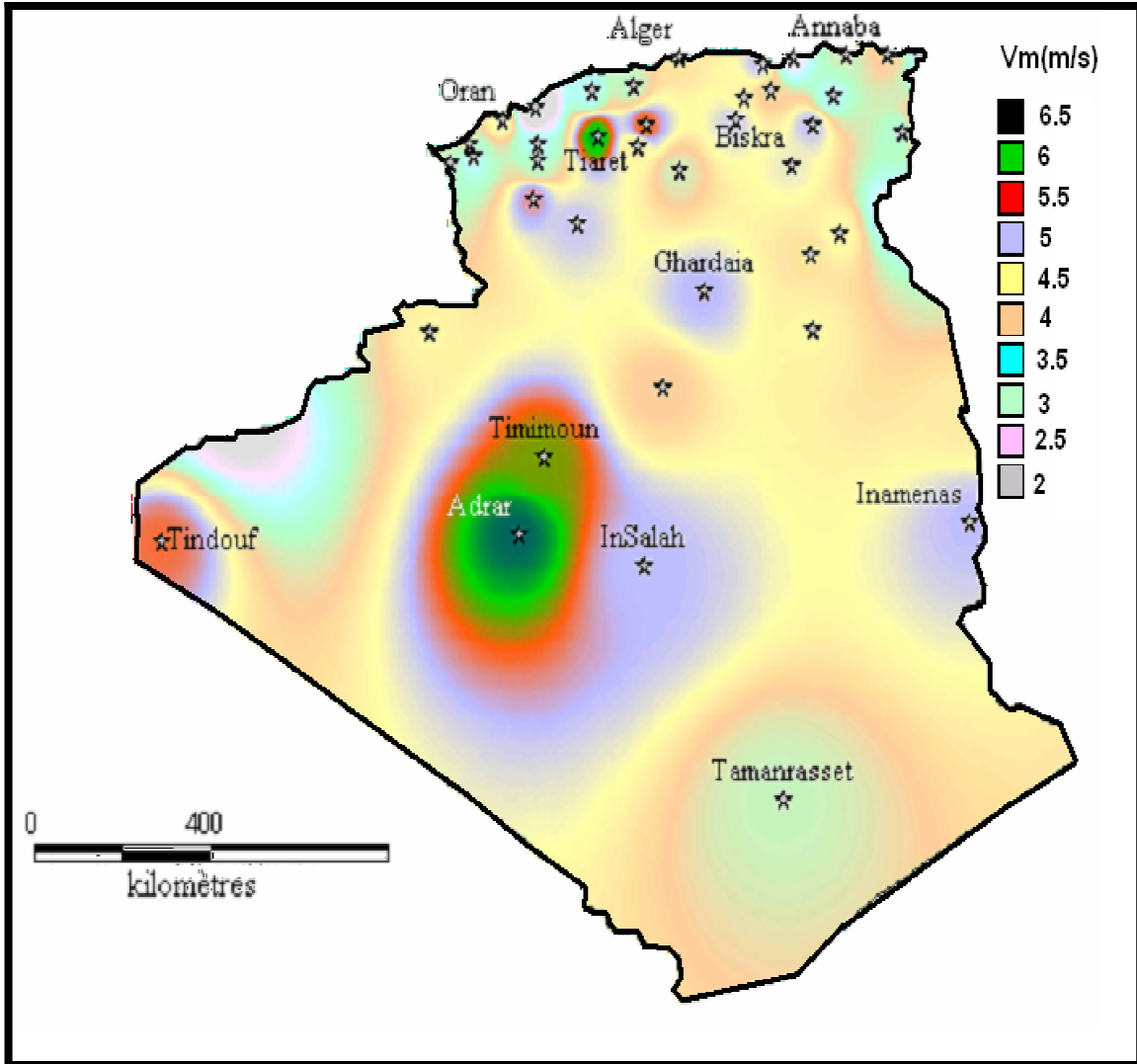


Figure I.13 Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol [41].

La carte de vent mensuelles et annuelles moyennes de l'Algérie sont résumé par les calculs numériques dans le tableau I.3 qui inclut également les coordonnées et l'altitude géographique au-dessus du niveau de la mer pour chaque emplacement. Cette table nous permettra d'avoir une idée sur l'évolution de la vitesse de vent selon les mois de l'année [11].

Table I.3 Moyennes mensuelles et annuelles de la vitesse du vent et de l'emplacement des différents sites en Algérie.

	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Yearly (V_m)
-Adrar	6.2	6.4	6.5	6.5	6.9	6.1	6.7	6.2	6	5.8	5.9	5.8	6.3
-Ain sefra	4.6	5.1	5.1	5.4	5.2	4.9	4.3	4.2	4.1	4	4.2	4.9	4.7
-Algiers	2.2	2.2	2.2	2.1	1.9	1.8	1.6	1.5	1.6	1.4	1.9	2.4	1.9
-Annaba	2.5	2.4	2.5	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	1.8	2.4	2.5	2.3
-Batna	2.9	3.1	3.6	3.2	2.7	3	3	3.1	3	2.7	2.6	3.3	3
-Bechar	3.2	3.2	4.1	4.6	5	4	4.1	4	3.7	2.8	2.9	3.1	3.7
-Bejaia	3.7	3.4	2.9	2.8	2.5	2.4	2.4	2.3	2.7	3.2	3.6	4.1	3
-Biskra	3.9	4.3	4.9	5.3	5.1	4.3	3.8	3.7	3.9	3.3	4	4.1	4.2
-Bou-saada	5.5	5.1	6.3	5.1	4.3	3.2	2.5	2.6	2.8	3.1	4.7	5.5	4.2
-Chelf	3.1	3.5	3.3	2.6	3	2.7	2.1	2.4	2.7	2.9	3	3.1	2.9
-Constantine	4	3.3	3.5	2.7	2.5	2.1	1.8	2	2	2.1	2.8	3.4	2.7
-Djanet	3	2.9	3.5	4.1	4	4.2	4.1	4.2	3.5	3.2	2.4	2.4	3.5
-El-Golea	2.8	3.8	4.3	4.2	4.7	3.9	3.3	3.3	3.7	3.5	2.6	3	3.6
-Eloued	2.6	2.7	3.6	4	3.9	3.8	3.5	3.5	3	2.6	2.3	2.6	3.2
-Chardaia	3.5	3.2	4.4	4.5	3.9	3.5	2.9	2.7	3	2.8	2.8	3.5	3.4
-Chelma	2.4	2.3	2.5	2.2	2.1	2.2	2.4	2.3	2.3	1.8	2.4	2.5	2.3
-Griss	2.7	2.3	2.3	2	2.1	1.7	1.5	2	1.9	1.9	2.6	2.7	2.1
-H Messaoud	3.2	3.3	4.1	4.2	4.8	4.1	3.4	3.7	3.9	3.5	2.8	3.1	3.7
-HR'mel	5.7	6.3	7.6	8.1	7.8	6.6	5.3	5.4	5.4	4.8	4.5	5.7	6.1
-Illizi	3.7	3.7	4.1	4.1	4.5	4.9	4.6	4.6	4.3	3.9	3.7	3.4	4.1
-Inamenass	3.9	4.5	5	5.2	6	5.7	4.6	4.8	4.7	4.4	3.9	3.8	4.7
-InSalah	5.3	4.9	5.5	5.1	5.6	5.3	5.6	5.3	4.9	4.6	4.7	4.3	5.1
-Jijel	2.6	2.9	3.3	2.8	2.1	2.1	2.1	2	2.1	2.2	2.5	3.1	2.5
-Laghouat	3.4	3.4	3.9	4.3	3.8	3.6	3	2.9	2.8	2.6	2.7	3.3	3.3
-Oran	2.7	2.8	3.2	3	3	2.9	2.6	2.3	2.3	2.1	2.4	2.7	2.7
-Ouragla	3.1	3.3	4.3	4.2	4.9	4.7	4	4.1	4.3	3.5	2.8	2.8	3.8
-Setif	3.4	3.8	3.8	3.7	3.3	3.4	3.2	3.3	3.4	3	3.2	3.1	3.4
Tamanrasset	3.4	2.9	2.9	2.9	3.1	3.2	3.3	3.2	3	2.9	2.5	2.6	3
-Tebessa	3.2	3.2	3.5	3.1	2.9	2.5	2	2.1	2.3	2.4	2.9	3.3	2.8
-Tiaret	3	4.1	3.8	3.2	3.5	3	2.6	2.8	2.9	2.9	3.6	4	3.3
-Timimoun	5	5.6	5.3	5.9	6.1	4.8	4.9	4.9	4.5	4.1	4.4	4	5
-Tindouf	5.4	5.3	7	7.3	7.3	5.6	6.2	6.7	6.7	4.7	4.3	4	5.7
-Tlemecen	3.7	3.2	3.3	2.3	2.1	1.8	1.5	1.6	1.4	2.4	3.1	3.9	2.5
-Touggourt	2.9	3.1	3.9	4.1	4.2	3.7	3.4	3.7	3.2	2.9	2.5	2.9	3.4
-Djelfa	3.2	5	5.2	5.6	4.7	5.1	4	4.2	4	3.9	3.6	3.5	4.3

I.6.3 Potentiel énergétique éolien récupérable (théorème de Betz)

La densité de puissance varie considérablement selon les lieux et les jours. Elle dépend de la vitesse et de la fréquence du vent. La puissance récupérable du vent par unité de surface balayée par les pâles de l'éolienne, est donnée par l'expression suivante :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \tag{I.3}$$

Avec:

ρ : Masse volumique de l'air au niveau de la mer (1,25 kg/m³ aux conditions T=20°C et P=1atm).

A : Section du tuyau ou l'aire balayée par le rotor (m²)

V: Vitesse du vent (m/s)

D'après la limite de Betz, la densité de puissance du vent devient égale à 59% de la puissance récupérable :

$$P_{Betz} = \frac{16}{27} \cdot P \quad (\text{W /m}^2) \quad (\text{I.4})$$

De même, le potentiel éolien disponible E_d dans le site étudié par unité de surface et pendant un an est exprimé à la limite de Betz par :

$$E_d = 8.76 \cdot P_{Betz} \quad (\text{kWh /m}^2/\text{an}) \quad (\text{I.5})$$

La cartographie de la densité de puissance moyenne annuelle récupérable à 10 mètres du sol est représentée en Figure I.14. Ce résultat est obtenu par le traitement de 10 années de mesures relatives à 48 stations de l'ONM réparties sur tout le territoire. Le maximum est enregistré dans la région sud ouest du Sahara. Il est situé dans la région d'In Salah où la densité de puissance moyenne récupérable sur une année atteint les 2.1 MWh/m² an.

En effet, la majorité du sud ouest du Sahara est caractérisée par un potentiel annuel moyen récupérable variant de 1 à 2 MWh/m². Toutefois, des microclimats à l'ouest, dans les hauts plateaux possèdent des potentiels allant jusqu'à 1.4 MWh/m². Enfin, les valeurs estimées pour les régions de Batna, Biskra, El Bayadh, El Kheiter, Msila, El Oued et Ghardaïa ne doivent pas être négligées puisque leur potentiel respectif avoisine le 1MWh/m².

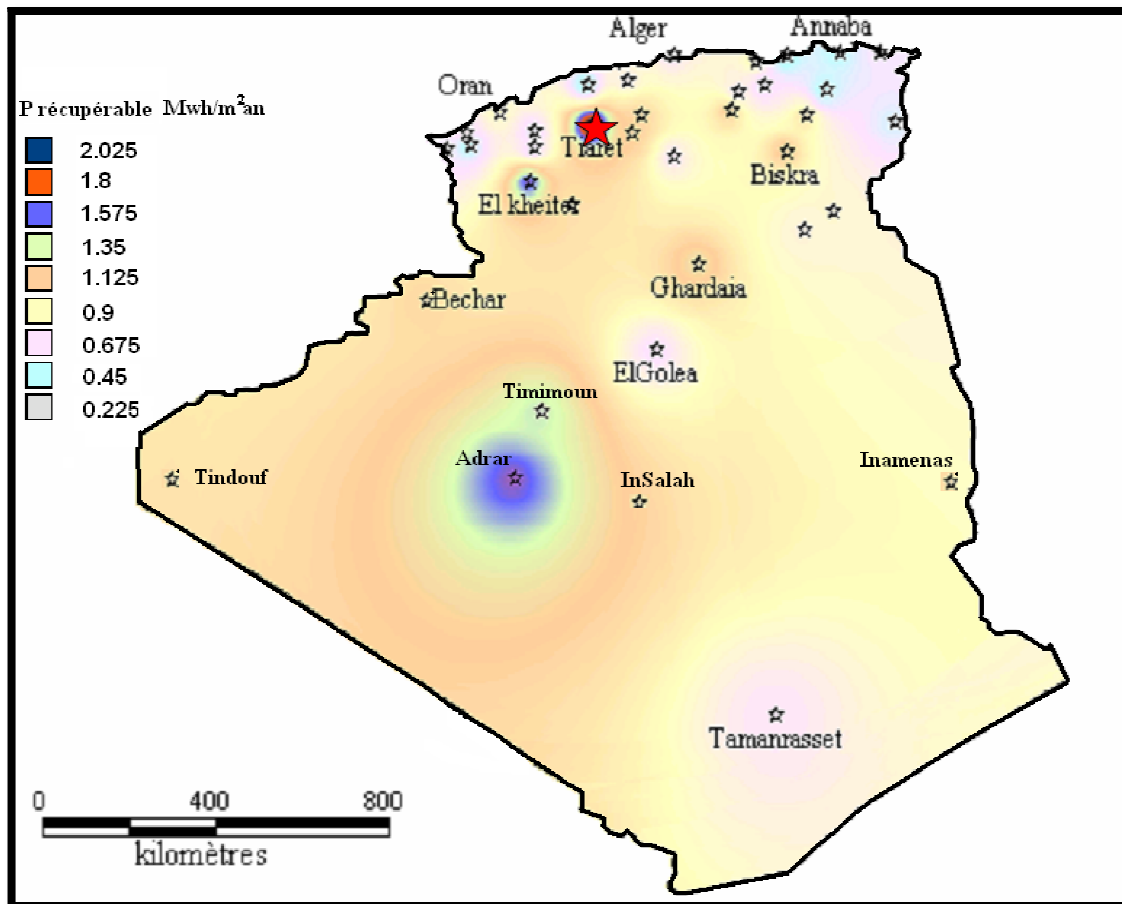


Figure I.14 Densité de puissance moyenne récupérable à 10 m du sol [41].

I.7 Généralité sur le site de l'emplacement du système hybride

Il existe une multitude de sites favorables pour la production d'énergie décentralisée sur le territoire national de l'Algérie et plus spécifiquement aux régions isolées se trouvant en majorité dans le sud algérien. Le choix de ces sites a été basé sur la disponibilité des données météorologiques [24].

La région étudiée couvre toute la wilaya d'ADRAR. Cette dernière occupe une superficie de 427.968 Km² soit 17,98 % du territoire National pour une population estimée à 406.318 habitants au 31.12.2008. La densité est de 0,94 habitant /km². La Wilaya est caractérisée par les coordonnées géographiques suivantes: Longitude (deg) 0.28; Latitude (deg) 27.82; Rugosité (m) 0.01; V (m/s) =5.9.

Elle est limitée par :

-Au Nord	-La Wilaya d'El-Bayadh
-Au Nord Ouest	-La Wilaya de Bechar
-Al' Ouest	-La Wilaya de Tindouf
-Au Sud	-Le Mali

-Au Sud Ouest	-La Mauritanie
-Au Sud Est	-La Wilaya de Tamanrasset
-Au Nord Est	-La Wilaya de Ghardaïa

A. Milieu physique

La wilaya d'Adrar se caractérise par un relief d'aspect désertique se subdivisant en 03 grands ensembles géomorphologiques qui sont [14]:

- *Les Plateaux*
- *Les Ergs*
- *Les Sebkhass*

B. Climatologie

Le climat de la wilaya d'Adrar est composé de 02 zones climatiques distinctes :

- Une zone semi désertique qui part de Timimoune vers Béchar.
- Une zone désertique partant de Timimoune vers Timioaouine.

Le climat d'Adrar est caractérisé par un régime 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 de étés très chaud (voir tableau I.4 ci-dessous)

Table I.4 Les données climatiques de la wilaya d'Adrar.

	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Temp.max (C°)	20.5	23.2	27.7	33.2	37.2	43.2	46	44.3	40.5	33.2	25.5	15.5
Temp.min (C°)	3.8	6.6	10.5	15.5	25.5	27.7	26.6	23.8	17.1	10.5	5.5	5.5
Humidité (%)	46	40	32	25	23	20	23	29	39	48	50	50
Vents (m/s)	6.2	6.4	6.5	6.5	6.9	6.1	6.7	6.2	6	5.8	5.9	5.8

- La wilaya d'Adrar se compose de régions suivantes [12] :

- GOURARA : région de Timimoune A = 65.203 Km² (NORD)
- TOUAT : région d'Adrar A = 205.650 Km² (Centre)
- TIDIKELT : région d'Aoulèf A = 24.536 Km² (Sud-Est).
- TANEZROUFT : région de Bordj Badji- Mokhtar A =132.579 Km² (Sud-ouest)

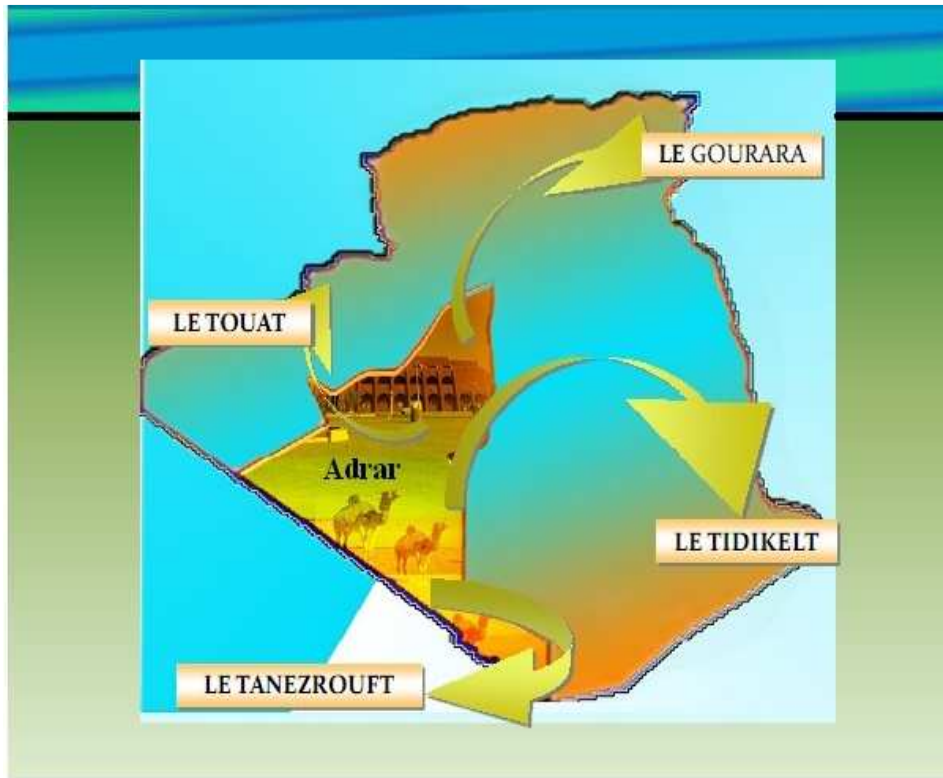


Figure I.15 Carte de La région d'Adrar.

I.7.1 Distribution de Weibull

La distribution de Weibull a été utilisée pour l'étude statistique des données mesurées au sol. La densité de probabilité et la fréquence cumulée de cette distribution [16] est donnée par:

$$f(V) = \left(\frac{k}{A}\right) \left(\frac{V}{A}\right)^{k-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{A}\right)^k\right) \quad (\text{I.6})$$

Avec :

$f(V)$: Distribution en fréquences des vitesses mesurées.

K : Facteur de forme sans dimension ($k > 0$) qui caractérise la forme de la distribution de fréquence.

A : Facteur d'échelle (m/s) et $A > 0$.

Nous allons choisir la méthode de l'écart type pour la détermination des facteurs K et A , basée sur le calcul de l'écart type des fréquences de vent et de la vitesse moyenne.

Le facteur d'échelle est très proche de la vitesse moyenne de la vitesse du vent :

$$k = \left(\frac{\sigma_v}{V_m}\right)^{-1.090} \quad A = \frac{2V_m}{\sqrt{\Pi}} \quad (\text{I.7})$$

V_m : Vitesse moyenne (m/s)

σ : Ecart type (m/s)

La distribution de Weibull représente bien le fait que sur un site donné, les vents de faible intensité seront plus courants que ceux de forte intensité. Cette courbe est très intéressante pour

les concepteurs du parc éolien comme pour les investisseurs car elle est significative du potentiel éolien du site.

Les résultats obtenus dans le tableau I.5 présente la distribution de fréquences par secteur :

Table I.5 Distribution de fréquences par secteur

Secteur	Paramètre de Weibull pour le site d'Adrar			
	Méthode d'écart type et vitesse moyenne			
	A (m/s)	k	f(%)	V(m/s)
Nord	6.8	2.47	6	6.1
NNE	7.3	2.89	9	6.5
NE	7.5	3.13	9	6.7
ENE	8.5	2.99	14	7.6
Est	8.5	2.94	15	7.6
ESE	8,0	2.76	7	7.1
SE	8,0	2.84	3	7.1
SSE	8.2	2.62	4	7.2
Sud	7.5	2.72	5	6.6
SSO	7.6	2.61	5	6.7
SO	7.7	2.57	3	6.9
OSO	7.9	2.33	5	7
Ouest	8.1	2.29	7	7.2
ONO	6.7	0.23	2	5.9
NO	6.3	2.51	2	5.6
NNO	6.3	2.86	3	5.6
Moyenne	7.8	2.68	100	6.9

Le Tableau I.6 représente les fréquences d'histogramme en fonction de centre des classes des vitesses et les fréquences de Weibull.

Table I.6 Fréquences d'histogramme en fonction de centre des classes des vitesses et les fréquences de Weibull.

Centre des classes	Fréquences d'histogramme	Fréquences Weibull(%)
0.5	0.02	1.7
1.5	0.08	5.20
2.5	3.50	8.20
3.5	8.92	10.58
4.5	11.33	11.85
5.5	19.35	12.07
6.6	16.58	11.39
7.5	12.42	10.05
8.5	8.57	8.34
9.5	5.64	6.54
10.5	3.80	4.86
11.5	3.14	3.42
12.5	2.52	2.29
13.5	1.80	1.46
14.5	1.03	0.88
15.5	0.59	0.51
16.5	0.23	0.28

17.5	0.09	0.15
18.5	0.13	0.07
19.5	0.09	0.03
20.5	0.06	0.02
21.5	0.03	0.01
22.5	0.06	0.00

On remarque que la courbe de Weibull du site d'Adrar atteint un maximum pour la classe des vitesses, 5 et 6, puis décroît au fur et à mesure jusqu'à ce qu'elle s'annule (Figure I.16).

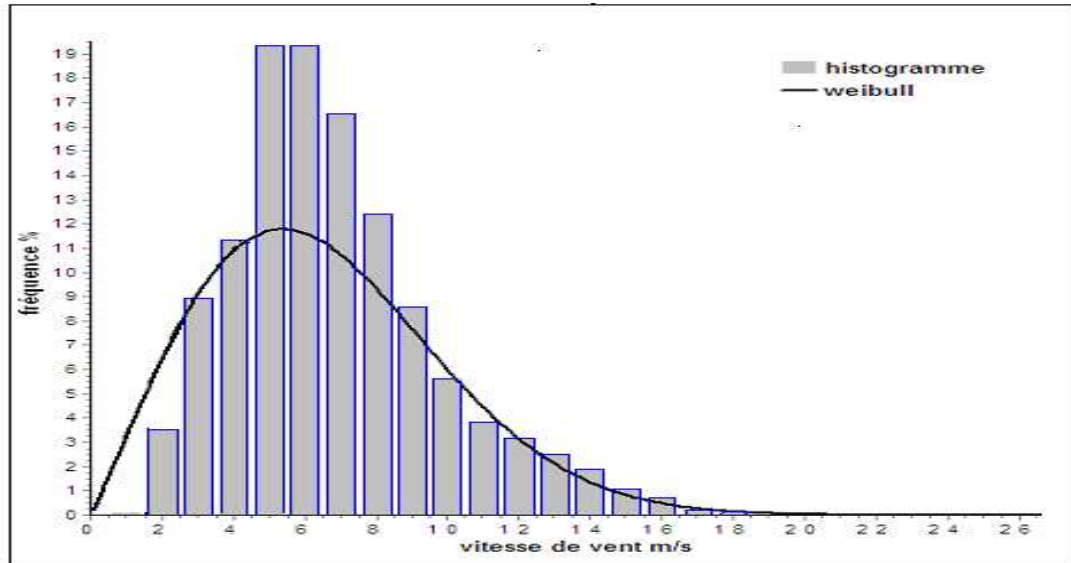


Figure I.16 Histogramme des fréquences et la courbe de Weibull pour Adrar.

A partir des données mesurées, dans la station météorologique d'Adrar, pour chaque heure pendant cinq ans de 2005 à 2010 et les résultats de l'ajustement par la distribution de Weibull, les valeurs des paramètres de Weibull ont été calculées ($k = 2,68$ et $A = 7,8 \text{ m/s}$) à 10 m du sol avec une vitesse moyenne du vent $V_m = 6,9 \text{ m/s}$.

I.7.2 La rose des vents

Une rose des vents est un peu comme un compas de navigation qui divise l'horizon en secteurs angulaires pour chaque secteur sont présentés [17-18] :

- La fréquence du vent, c'est à dire le pourcentage du temps durant lequel où le vent souffle.
- La vitesse moyenne du vent multiplié par sa fréquence.
- La puissance disponible dans le vent.

La rose des vents joue un rôle très important dans la localisation de sites appropriés à l'installation d'éoliennes. Si une grande partie de l'énergie contenue dans le vent provient d'une direction particulière, il faut chercher à avoir aussi peu d'obstacles et un terrain aussi peu perturbé que possible dans cette direction (Figure I.17).

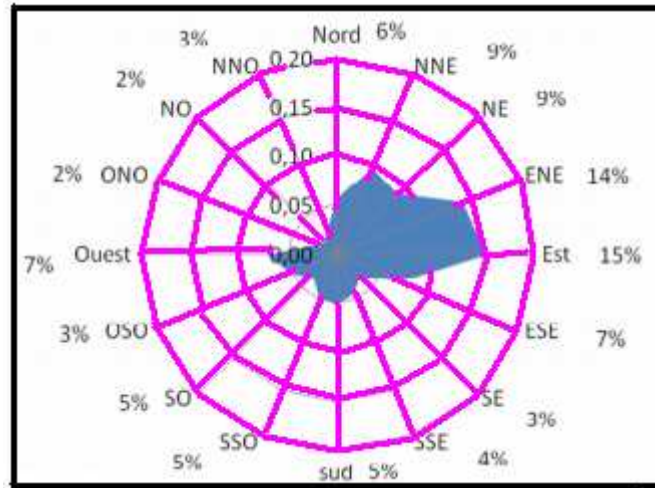


Figure I.17 Rose de vent pour le site d'Adrar

Les secteurs prédominants sont (voir la Figure I.16) :

-Le secteur Nord Nord Est (NNE) et Nord Est avec un pourcentage de 9% pour chaque direction.

-Le secteur Ouest et Est Sud Est (ESE) compte 7% pour chaque secteur et 6% pour le secteur Nord.

- Le secteur Sud, Sud Ouest et Sud Sud Ouest (SSO) avec 5% des observations.

Le secteur dominant est :

-Le secteur Est qui représente et secteur Est Nord Est (ENE) compte respectivement 15% et 14%.

Les faibles secteurs Si ont :

- Le Sud Sud Est (SSE) repasant 4% de vent et Sud Est, Ouest Sud Ouest (OSO) et Nord Nord Ouest (NNO) avec un pourcentage de 3% pour chaque direction.

- Enfin on a 2% pour les directions Nord Ouest et Ouest Nord Ouest (ONO).

I.8 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons donné des informations sur l'évolution mensuelle et annuelle de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie. Celles-ci sont nécessaires pour le choix des sites d'implantation de systèmes éoliens sachant que les besoins énergétiques varient tout au long de l'année. On peut conclure que le gisement éolien est plus important au Sud qu'au Nord particulièrement dans le Sud-ouest. De plus, certaines régions sont caractérisées par des vitesses élevées tout au long de l'année en particulier toute la région du Sud-ouest limitée par Adrar, In Salah, H R'mel et Tindouf avec des vitesses supérieures à 5 m/s pour Adrar. Tout cela nous pousse à penser aux systèmes hybrides pour alimenter une zone dans cette région car la majorité des sites situés à la wilaya d'Adrar pourraient être considérés comme des sites isolés.

Chapitre II :Etat de l'art sur le système d'énergie hybride

II.1 Introduction

Le terme « Système d'Énergie Hybride » fait allusion aux systèmes de génération d'énergie électrique utilisant plusieurs types de sources. La combinaison des sources d'énergie renouvelable comme l'éolienne, le photovoltaïque ou les petites centrales hydroélectriques peut constituer un complément ou une alternative aux groupes électrogènes diesels. Les systèmes d'énergie hybrides sont généralement autonomes par rapport aux grands réseaux interconnectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées mais la présence du générateur diesel dans ce type de système hybride autonome suscite certaines discussions quant aux notions de propreté et de durabilité [25]. L'ajout du groupe électrogène à un système de production d'énergie renouvelable peut d'une part augmenter la fiabilité du système, alimenter des charges plus énergétivores et d'autre part diminuer de manière importante le coût de l'électricité produit par une diminution importante de la taille du générateur éolien. Nous allons envisager dans notre étude d'alimenter un site isolé composé d'une dizaine de foyers situé dans une zone climatique algérienne ou de manière plus exacte d'apporter un certain service énergétique. En fait, ce n'est pas l'énergie en soi que réclame une population mais un service énergétique, à nous de le lui apporter au moindre coût et avec une efficacité énergétique [24].

II.2 Systèmes autonomes et non autonomes de production d'énergie

On peut distinguer deux familles de systèmes de génération d'énergie. Les systèmes non autonomes (qui ont besoin d'être raccordés à un réseau pour être opérationnels), ou autonomes (qui n'ont pas besoin d'être raccordés à un réseau pour être opérationnels) [15].

II.2.1 Système non autonome

L'interface entre le système de production éolien et le réseau peut être constitué par le générateur électrique (de type asynchrone ou synchrone) directement raccordé au réseau ou par un convertisseur électronique de puissance (onduleur). Dans ce dernier cas, les générateurs électriques débitent sur un redresseur à diodes ou un convertisseur commandé, l'onduleur convertit ensuite ce courant continu en courant alternatif de fréquence synchrone à la fréquence du réseau. Dans cette configuration le lien CA/CC/CA découple la fréquence de la génératrice de celle du réseau et permet d'opérer l'éolienne à vitesse variable, ce qui permet d'accroître le rendement du système éolien. La chaîne de conversion éolienne devient une source de puissance puisque la tension est imposée par le réseau [42].

II.2.2 Système autonome

C'est un système électrique complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé [43], sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau.

II.3 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement dans un réseau autonome

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affectés le fonctionnement d'un système autonome sont [23]:

- Les variations de la charge à court et à long terme.
- Les ressources d'énergies renouvelables: les ressources, comme le vent et le soleil, sont stochastiques par leur nature, ils sont très difficiles à prédire.
- Les perturbations du réseau: les défauts, tels que les courts-circuits, peuvent non seulement arrêter le système mais aussi détruire certains composants.

II.4 Qualité de l'énergie électrique dans les réseaux autonomes

Le terme «qualité de l'énergie électrique» fait référence à la stabilité de la tension, à la stabilité de la fréquence du réseau et à l'absence de différents phénomènes électriques comme par exemple le flicker ou des distorsions harmoniques apparaissent [44]. La Figure II.1, montre une classification de ces perturbations en fonction de leurs caractéristiques.

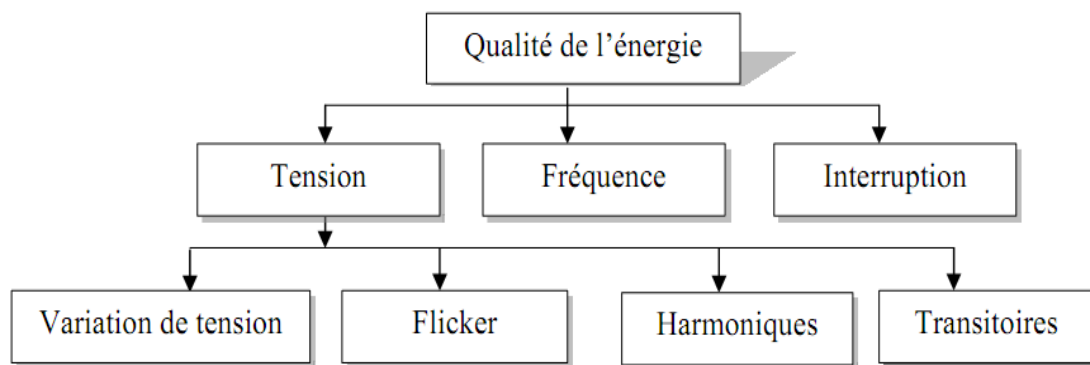


Figure II.1 Classification des perturbations du point de vue qualité d'énergie.

Plusieurs études ont été réalisées sur la qualité d'énergie électrique des systèmes isolés comportant des sources d'énergies renouvelables la résolution des problèmes des distorsions d'harmoniques dans un réseau autonome causé par le branchement des charges non linéaires est nécessaire.

II.5 Systèmes d'Énergie Hybrides (SEH): définitions et missions

Un système hybride de production d'énergie dans sa vue la plus générale est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles interconnectées entre elles pour fournir l'alimentation électrique(Figure II.2). Il existe plusieurs combinaisons de systèmes hybrides, à savoir : éolien-diesel, photovoltaïque-diesel, éolien-photovoltaïque-diesel,...etc. Ces mêmes sources d'énergie peuvent être combinées avec d'autres sources de stockage d'énergie, tel que des batteries électrochimiques, le stockage utilisant l'hydrogène, des volants d'inertie et des super-condensateurs [15].

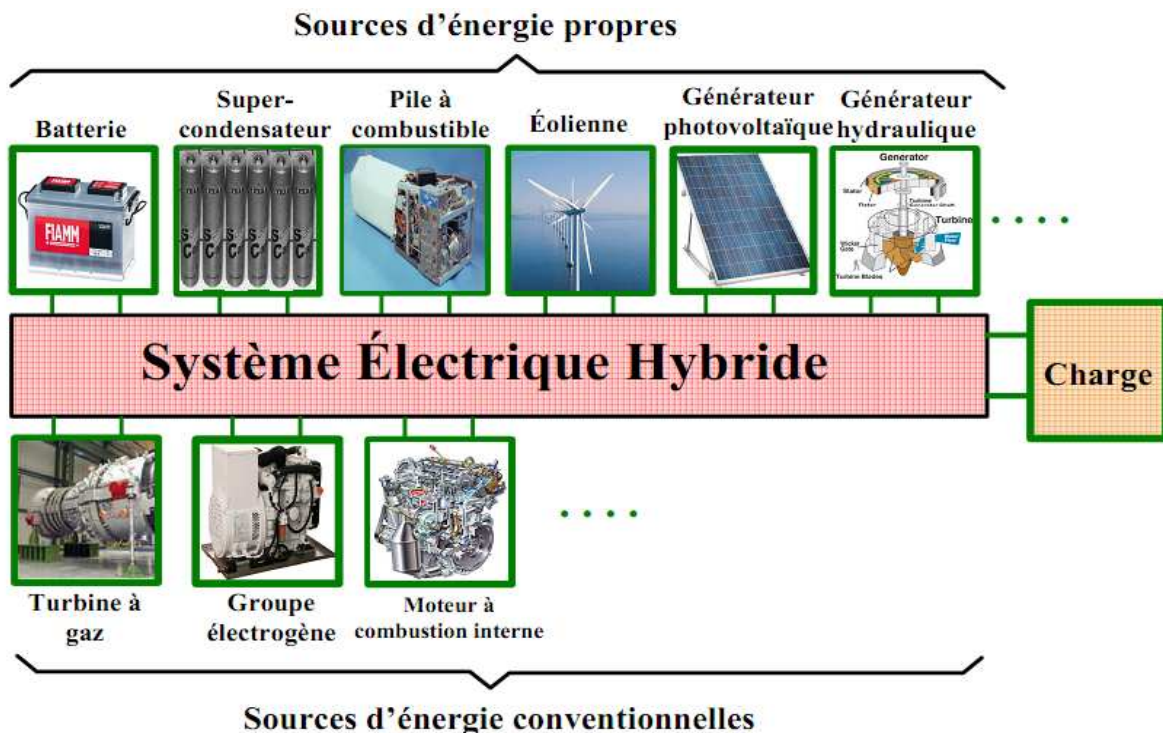


Figure II.2 Différentes sources utilisables dans un système électrique hybride. [26]

La combinaison de l'énergie renouvelable avec des éléments de stockage et des groupes électrogènes permet d'optimiser les systèmes de production d'électricité aussi bien du point de vue technique qu'économique, de manière à profiter pleinement de l'énergie éolienne et réduire au minimum la consommation du carburant . Les groupes électrogènes et les éléments de stockage d'énergie ont pour rôle la compensation des fluctuations de puissance produite par l'éolienne à court et à long terme.

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 suivant le tableau II.1.

Table II.1 Classification des SEH par gamme de puissance

Puissance du SEH	Application
Faible : inférieur à 5kW	-Système autonome : station de télécommunication, pompage de l'eau...
Moyenne : entre 10 à 250 kW	-Alimentation d'un village isolé, d'un hameau, des zones rurales...
Grande supérieure à 500 kW	-Grands réseaux isolés comme par exemple réseaux insulaires.

Les grandes installations de SEH en site isolé peuvent être classifiées en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable [22] défini par la proportion de la puissance de l'énergie produite par les sources d'énergie renouvelable et la puissance demandée par la charge.

Le Taux de pénétration en puissance (TPP) est défini comme le rapport entre la puissance éolienne installée et la puissance maximum de la charge [45]. 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 dite à haute pénétration si le $TPP > 1$.

$$TPP = \frac{\text{puissance éolienne installée}[kW]}{\text{puissance maximale consommée par la charge}[kW]}$$

$$TPE = \frac{\text{Energie éolienne produite par année}[kWh]}{\text{Energie consommée par la charge en une année}[kWh]}$$

$$TPPI = \frac{\text{puissance éolienne produite}[kW]}{\text{puissance consommée par la charge}[kW]}$$

Où

TPP : Taux de Pénétration en Puissance.

TPE : Taux de Pénétration en Énergie.

TPPI : Taux de Pénétration en Puissance Instantanée.

Afin de maximiser la contribution de l'énergie éolienne dans ce type de génération hybride et donc augmenter le TPE, le système doit posséder deux caractéristiques importantes. La première est de disposer d'un dispositif de stockage d'énergie. La deuxième est d'avoir un $TPP > 1$. Une classification des taux de pénétration des systèmes éoliens-diesels est proposée au Tableau II.2.

Table II.2 Classification des taux de pénétration des systèmes éoliens-diesel proposée par Steve Drouilhet, National Renewable Energy Laboratory (NREL).

Classe des taux de pénétration	Caractéristiques d'opération	pénétration	
		TPPI	TPE
BAS	<ul style="list-style-type: none"> - Diesel toujours en opération - Puissance éolienne réduit la charge nette sur le diesel -L'ensemble de l'énergie éolienne alimente la charge primaire -Pas de système superviseur de contrôle. 	<0.5	<0.2
MOYEN	<ul style="list-style-type: none"> - Diesel toujours en fonction -à puissance éolienne produite élevée, possibilité d'alimenter une charge secondaire afin maximiser le rendement du diesel -Besoin d'un système de contrôle simple. 	0.5-1	0.2-0.5
HAUT	<ul style="list-style-type: none"> -Diesel en arrêt lorsque la puissance éolienne est suffisante. -Besoin d'un système de contrôle de la tension et de la fréquence auxiliaire pour l'éolienne -Besoin d'un système de contrôle complexe. 	1-4.0	0.5-1.0

La présente étude s'intéresse uniquement aux systèmes de jumelage éolien-diesel à haute pénétration (JEDHP). Lorsqu'on parle de haut taux de pénétration on doit admettre que la configuration d'un tel système doit permettre la régulation de la tension et de la fréquence sur le réseau et ce même si la puissance éolienne fournit une grande partie ou la totalité de la puissance à la charge. Ceci est un défi majeur des éoliennes installées en réseau autonome dans les systèmes à haute pénétration.

II.5.1 Différents types topologies de systèmes hybrides

Nous présentons ici une rapide synthèse des études de quelques topologies possibles pour un système hybride, qui ont été réalisées et qui nous ont conduits à l'étude de ces systèmes.

Quelques exemples, habituellement utilisés à l'échelle industrielle, d'architectures de chaînes de conversion d'énergie sont donnés en association avec différents types de génératrices. Dans les limites de nos travaux, nous nous sommes intéressés à des systèmes hybrides éolien-diesel pour alimenter un site isolé.

✚ *Solaire-éolien, batteries de stockage, installation isolée*

Fréquemment rencontrée dans les pays développés : alternative au réseau et dans les pays en voie de développement : électrification rurale

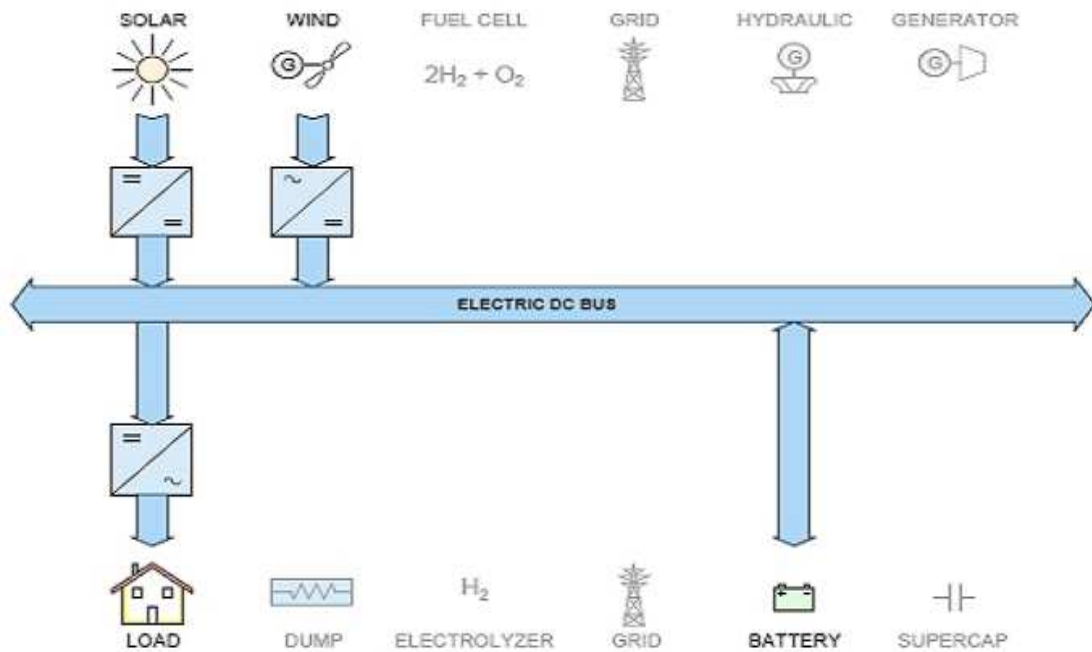


Figure II.3 Solaire-éolien, stockage à batteries, installation isolée [46].

✚ *Solaire-éolien, batteries de stockage et hydrogène, installation isolée*

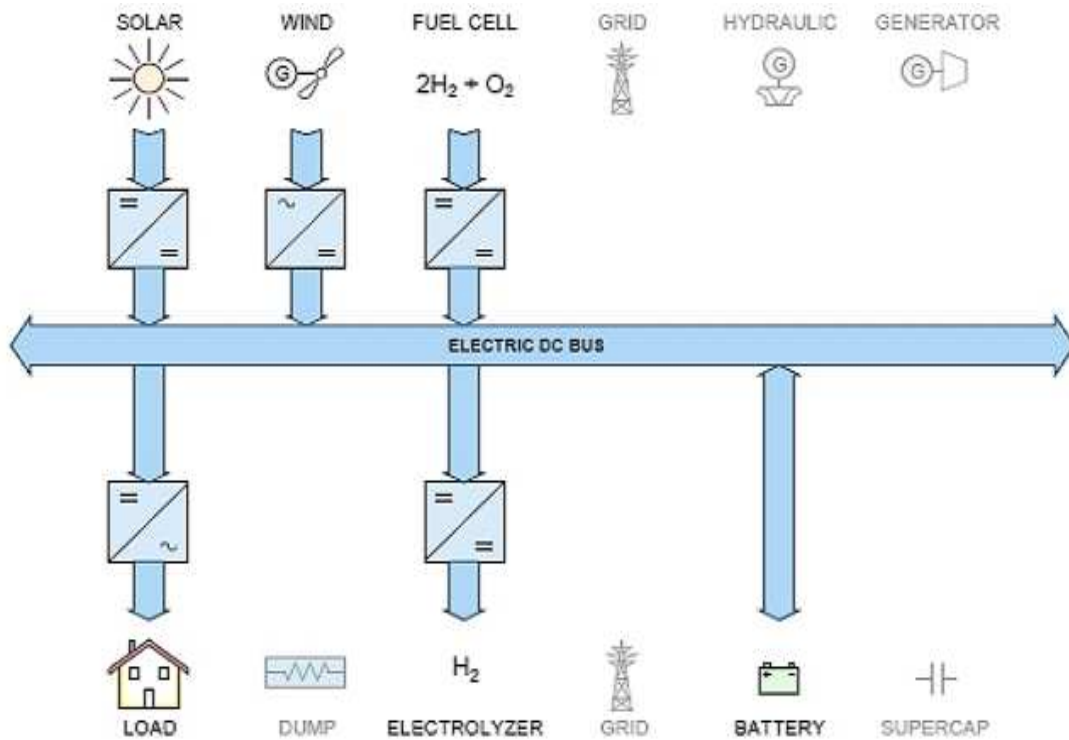


Figure II.4 Solaire-éolien, batteries de stockage et hydrogène, installation isolée [47].

✚ Solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée

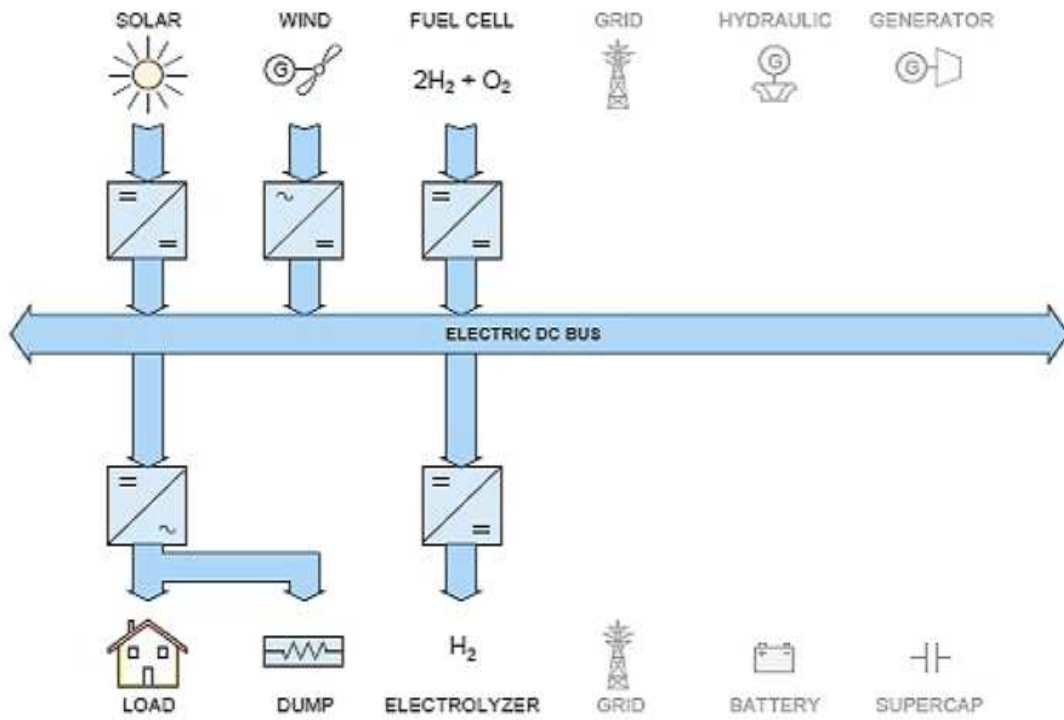


Figure II.5 Solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée [48]

✚ Éolien, stockage à hydrogène et par super condensateurs, installation isolée

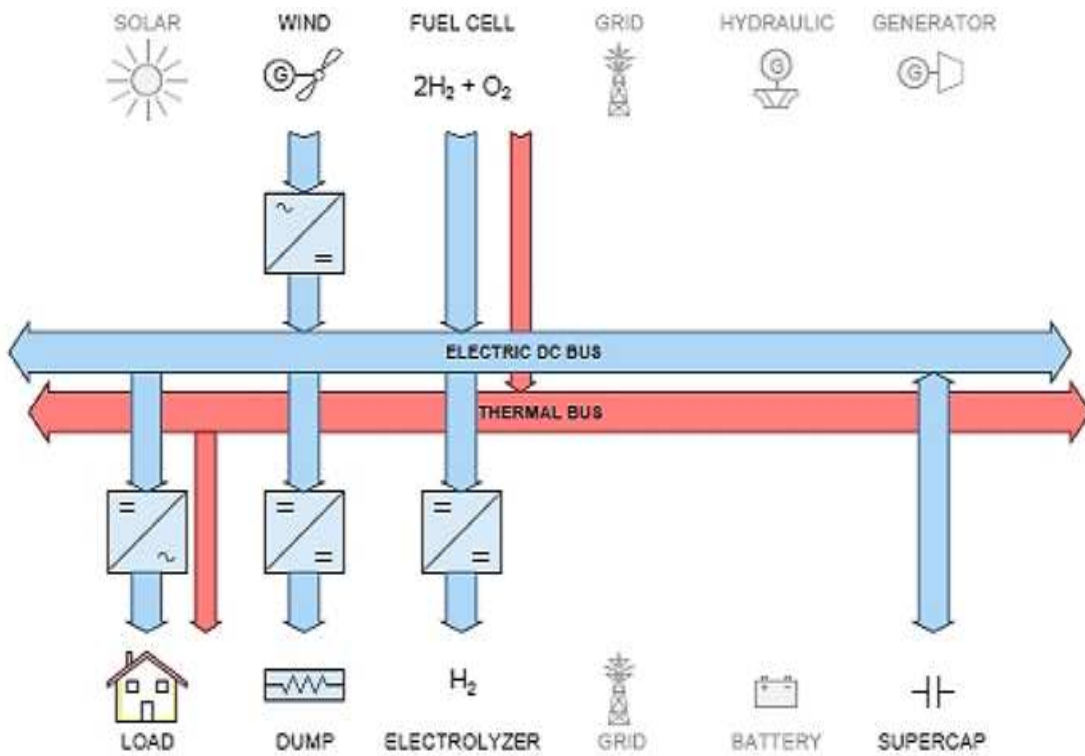


Figure II.6 Eolien, stockage à hydrogène et par super condensateurs, installation isolée [49].

✚ Eolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée

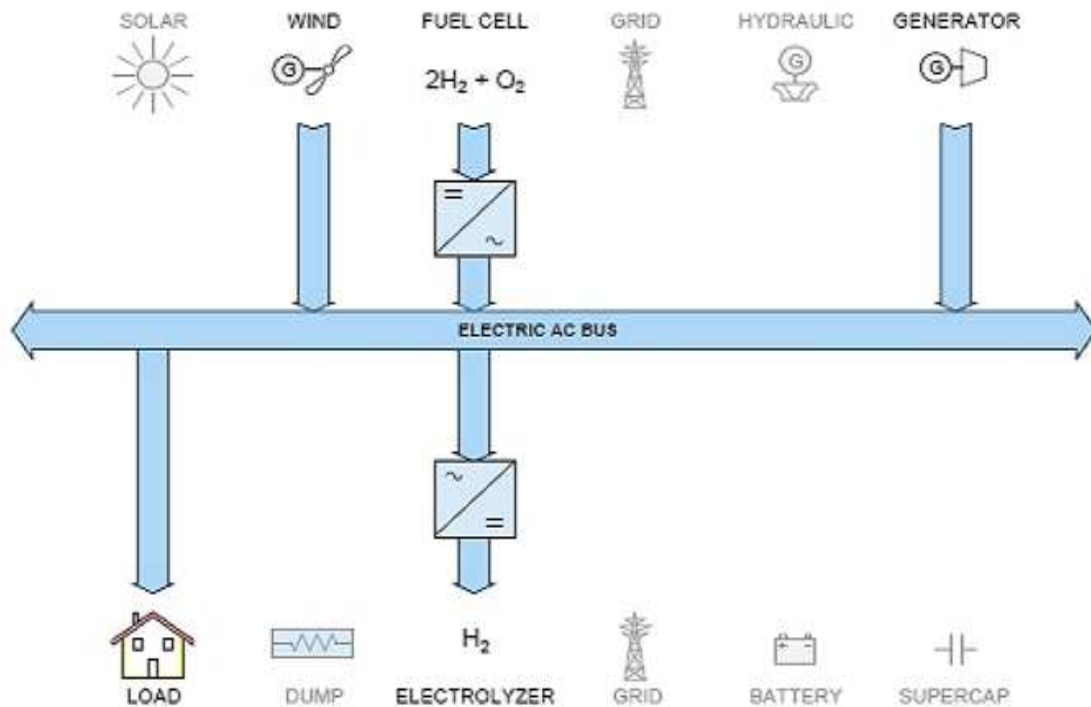


Figure II.7 Eolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée [50].

Les configurations ci-jointes présentent des systèmes caractérisés par [28]:

- plusieurs sources différentes.
- plusieurs charges différentes.
- plusieurs éléments de stockage différents.
- plusieurs formes d'énergie (électrique, thermique).

Mais, en effet, le vent et le rayonnement solaire sont les sources se prêtant le mieux à une production d'électricité décentralisée.

II.6 Description du SEH

En générale, la conception préliminaire du SEH 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 SEH peut aussi incorporer des convertisseurs statiques et dynamiques, un système de stockage, des charges principales et délestages et un système de surveillance, etc[13]. Toutes ces composantes peuvent être connectées selon différentes architectures, l'architecture de notre travail est présentée dans la Figure II.8. Les avantages et les désavantages d'un tel système sont présentés ci-après.

✓ **Avantages :**

- La connexion de toutes les sources sur un bus à CC simplifie le système de commande.
- Le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale, c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75-85 %.

✓ **Inconvénients :**

- Le rendement de l'ensemble du système est faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.
- Les générateurs diesels ne peuvent pas alimenter directement la charge, l'onduleur doit donc être dimensionné pour assurer le pic de charge.

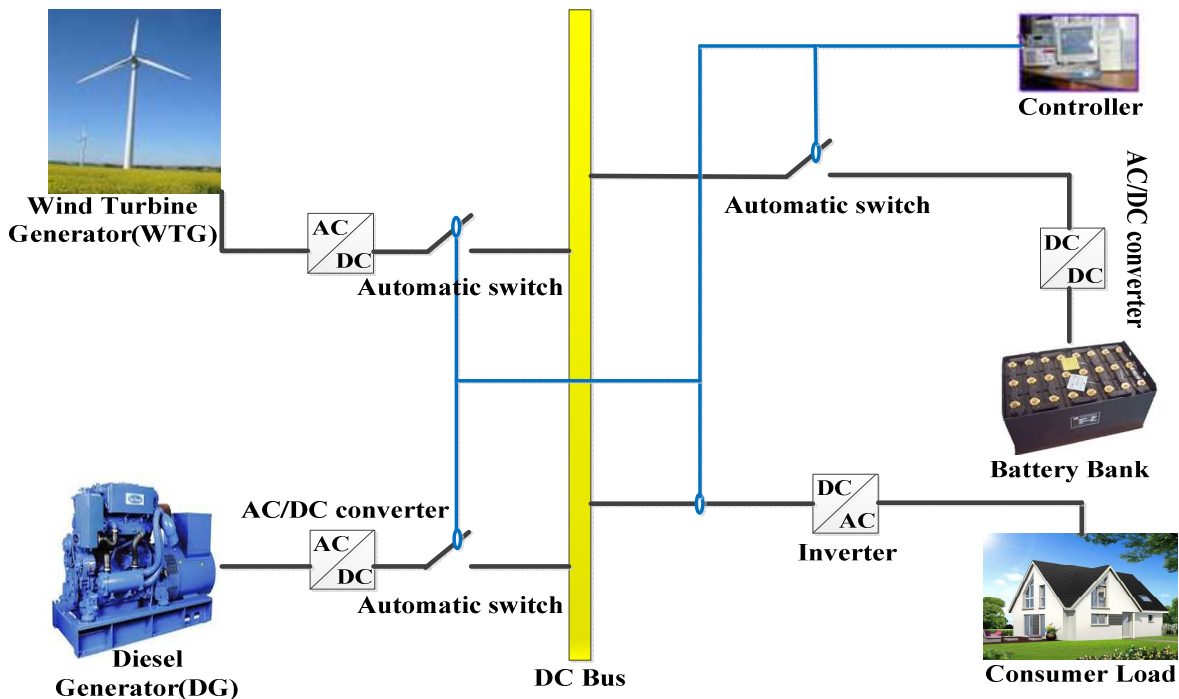


Figure II.8 Schéma du système hybride éolien-Diesel

II.7 Principe de fonctionnement SEH

Ce système est constitué d'une éolienne avec génératrice synchrone à Aimants Permanents (GSAP), Le groupe électrogène (GE) et une batterie comme système de stockage. Ce type de système comporte trois principaux régimes de fonctionnement(Figure II.9).

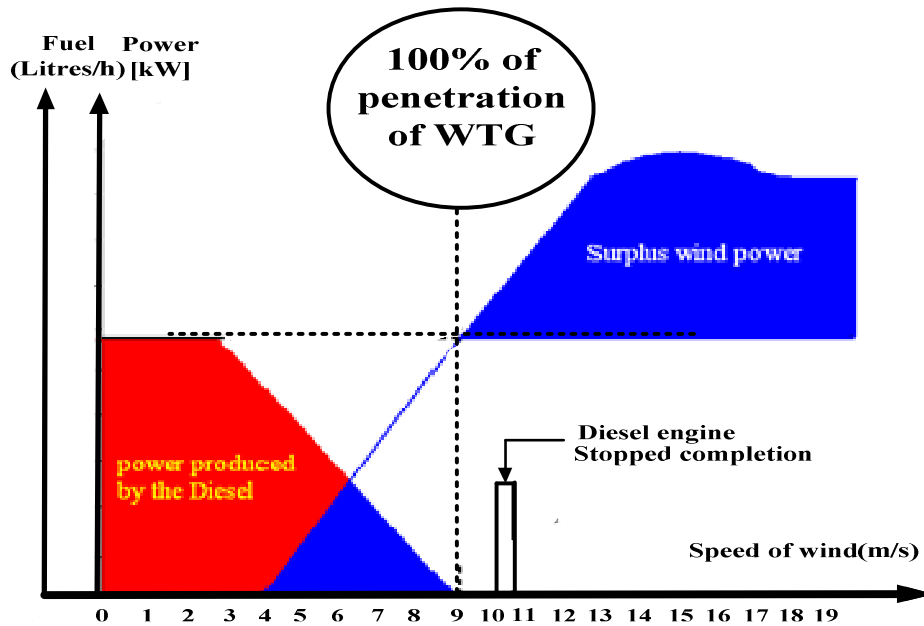


Figure II.9 Variation de la puissance produite par SEHD en fonction de la vitesse du vent [9].

- **Vents Faible ($V_m \leq 3\text{m/s}$) : diesels seuls (Diesel Only DO) :** Ce mode de fonctionnement est caractérisé par des vents trop faibles pour le fonctionnement du groupe éolien. Ce mode est désigné par le terme «tout- Diesel ». Dans ce cas, le groupe diesel fournit la totalité de la charge et assure la qualité de l'onde sur le réseau électrique.
- **Vents moyens ($3\text{ m/s} \leq V_m \leq 10\text{m/s}$) : diesels et éoliennes en service (Wind-Diesel WD) :** Dans le second mode de fonctionnement le vent est caractérisé par une production d'énergie éolienne inférieure à la quantité d'énergie consommée par la charge où le groupe éolien est donc couplé au groupe diesel afin de produire suffisamment d'énergie pour la charge. Ce mode est désigné par le terme « éolien-Diesel » et c'est principalement le groupe diesel qui assure la qualité de l'onde du réseau.
- **Vents forts ($V_m > 10\text{ m/s}$) : éolienne seules (Wind Only WO) :** Ce mode est caractérisé par une production d'énergie éolienne supérieure à la charge. Dans ce cas, le groupe diesel est arrêté tandis que l'éolienne fournit la totalité de l'énergie consommée par la charge ; c'est le mode « tout-éolien ». Dans ce mode la qualité de l'onde électrique est assurée en totalité par l'éolienne ou par des dispositifs connexes.

Dont le cas où le groupe électrogène tombe en panne et le vent est insuffisant (faible) pour le fonctionnement de l'éolienne la charge est alimenté par la batterie de stockage.

II.8 Principaux composants des systèmes d'énergies hybrides (SEH)

Les systèmes d'énergie hybride sont en général constitués de sources d'énergie classique (Groupe électrogène), de sources d'énergie renouvelable (Eolienne, solaire). Ils peuvent aussi

inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydroélectrique, marémotrice, géothermique etc.), des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène...), des charges principales et un système de surveillance.

II.8.1 Éoliennes

II.8.1.1 L'énergie éolienne pour quoi faire?

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 100 ans elle est utilisée pour produire de l'électricité qui est une source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel [29].

Les éoliennes fiables et rentables représentent 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, par fois bipale et à rotor face au vent. Ces éoliennes peuvent fonctionner à vitesse fixe ou variable [24]. Les deux types de machines électriques les plus utilisées sont des machines asynchrones et synchrones sous leurs diverses variantes. La Figure II.10 c'est exemple de la ferme éolienne tripale d'Adrar qui dispose désormais d'une capacité de 10 MW [27].



Figure II.10 La ferme éolienne d'Adrar

II.8.1.2 Définition de l'énergie éolienne

Pour convertir l'énergie disponible dans le vent en énergie électrique, les turbines éoliennes doivent être composées d'une partie mécanique et d'une partie électrique. La partie

mécanique sert à capter l'énergie cinétique disponible dans le vent et à la transformer en énergie mécanique rotative[52]. Cette dernière est transmise via un système d'entraînement, habituellement composé d'une boîte de vitesse à une génératrice électrique. La conversion d'énergie mécanique en énergie électrique est effectuée via la génératrice électrique (Figure II.11).

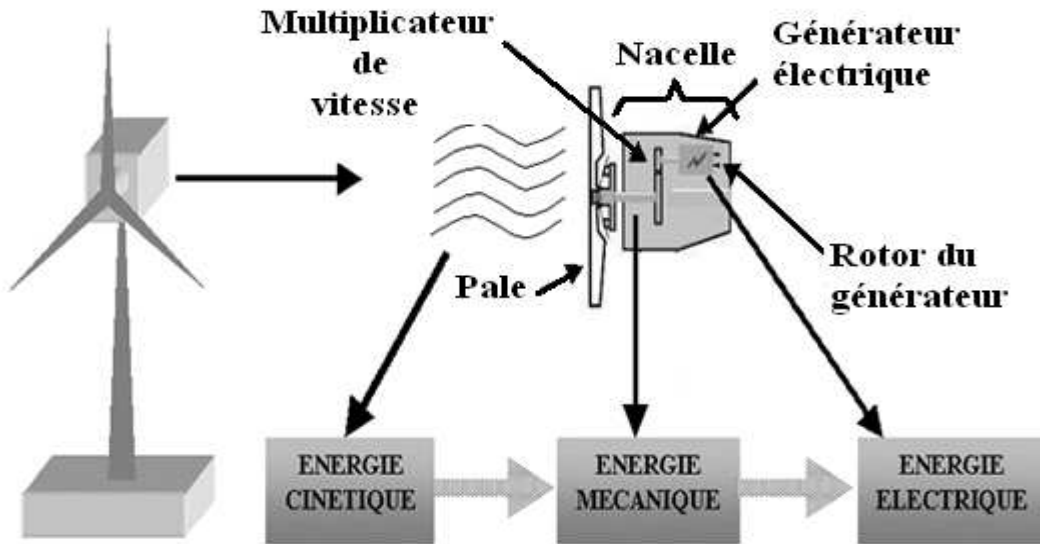


Figure II.11 Conversion de l'énergie cinétique du vent [30].

- Selon leur puissance nominale [53], les éoliennes sont divisées en trois catégories :

- ✓ Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW
- ✓ Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- ✓ Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

La figure II.12 illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes [3].

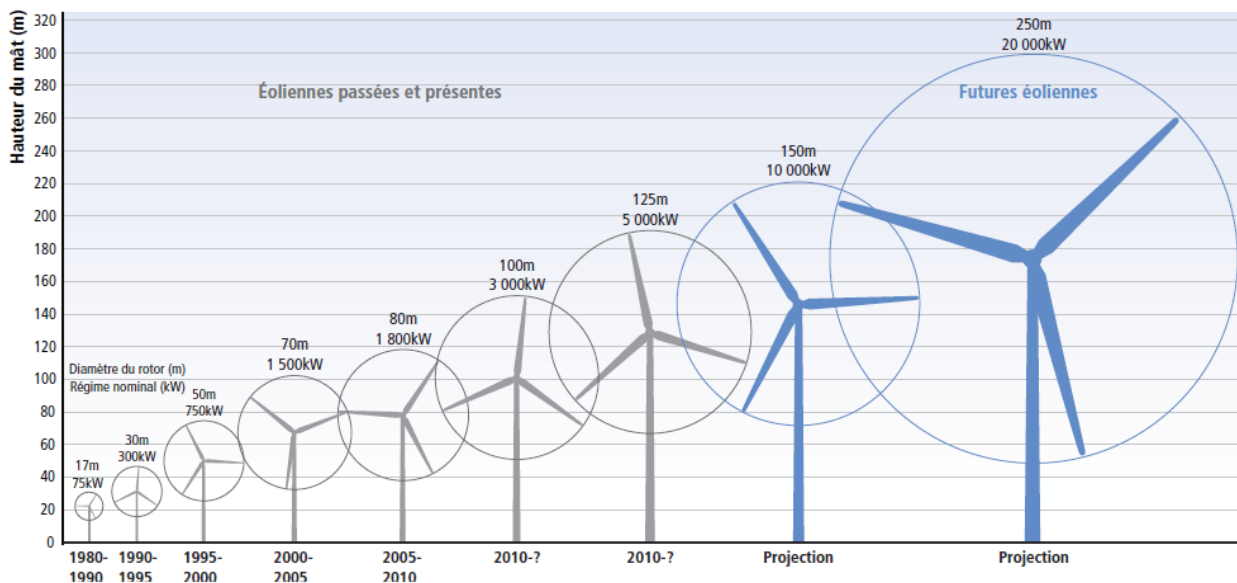


Figure II.12 Correspondance taille-puissance des éoliennes.

II.8.1.3 Types d'aérogénérateurs

Deux grandes classes de turbines éoliennes sont présentes dans l'industrie, soit les éoliennes à axe horizontal soit les éoliennes à axe vertical (Figure II.13). Les éoliennes à axe horizontal sont composées principalement d'une tour au sommet de laquelle une nacelle est installée. Cette nacelle supporte le rotor de la turbine - moyeu et pales - et comporte le système d'entraînement ainsi que la génératrice. L'axe de rotation du rotor de la turbine est donc horizontal. Pour ce qui est des éoliennes à axe vertical, l'axe de rotation du rotor est perpendiculaire au sol ; ceci permet de placer le système d'entraînement ainsi que la génératrice au niveau du sol.



(a) turbine à axe horizontal

(b) turbine à axe vertical

Figure II.13 Représentation des concepts d'éoliennes (a) à axe horizontal et (b) à axe vertical.

La Figure II.14 montre le choix des turbines éoliennes tri pales du point de vu rendement [31].

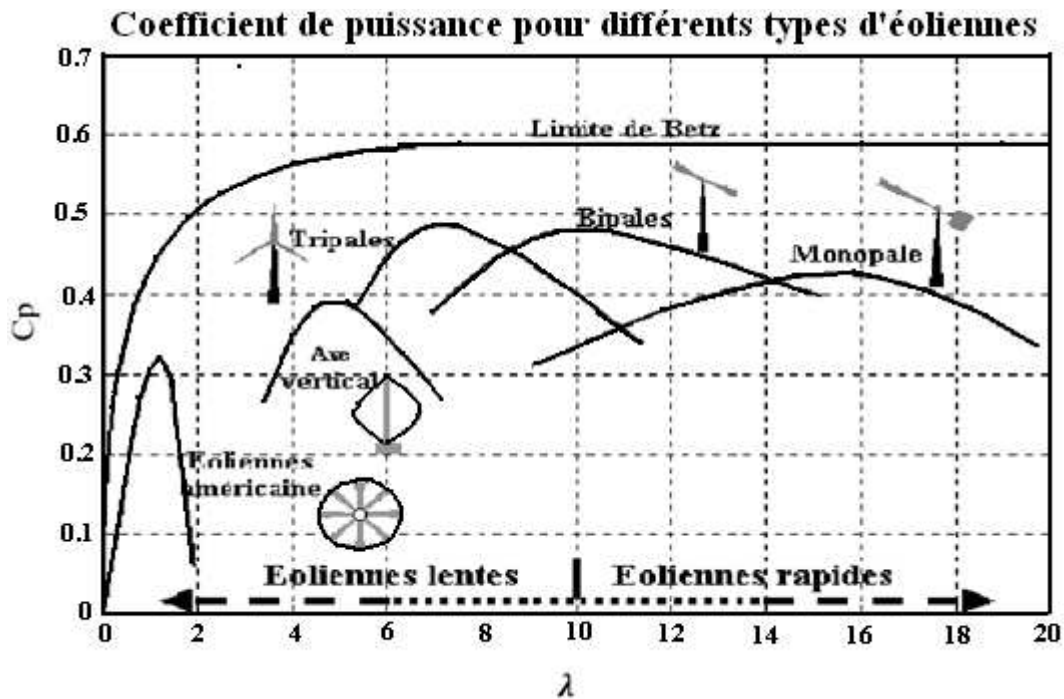


Figure II.14 Coefficient de puissance des différentes configurations d'éoliennes.

Ces deux méthodes de captation de l'énergie disponible dans le vent ont leurs avantages et leurs inconvénients. Ceux-ci sont présentés au Tableau II.3.

Table II.3 Avantages et inconvénients des éoliennes à axe horizontal et à axe vertical.

	Avantages	Inconvénients
AXE HORIZONTAL	<ul style="list-style-type: none"> -Efficacité de conversion d'énergie élevée -Auto démarrage possible -rotor positionné en hauteur donnant accès à des vents élevés 	<ul style="list-style-type: none"> - Coût d'installation élevé -Nécessite une tour robuste - Nécessite de longs câbles électriques
AXE VERTICAL	<ul style="list-style-type: none"> -Coût d'installation réduit -Maintenance des équipements plus aisée -Ne nécessite pas de dispositif d'orientation de la turbine dans l'axe du vent. 	<ul style="list-style-type: none"> -Efficacité de conversion d'énergie faible -Haute variation du couple mécanique des pales - doit démarrer en moteur -Options limitées pour le contrôle de la vitesse ou de la puissance.

La presque totalité des turbines éoliennes rencontrées dans le domaine est à axe horizontal. Ce choix repose principalement sur le fait que ce type de turbine présente une efficacité de conversion d'énergie environ deux fois plus élevée que les éoliennes à axe vertical. Par

ailleurs, les éoliennes à axe vertical présentent des phénomènes de fatigue causés par la haute variation du couple mécanique; ceci en réduit sa robustesse et sa durée de vie.

II.8.1.4 Principaux constituants d'une éolienne à axe horizontal

L'éolienne comporte généralement des éléments mécaniques et électriques qui sont illustrés sur la figure II.15 [35].

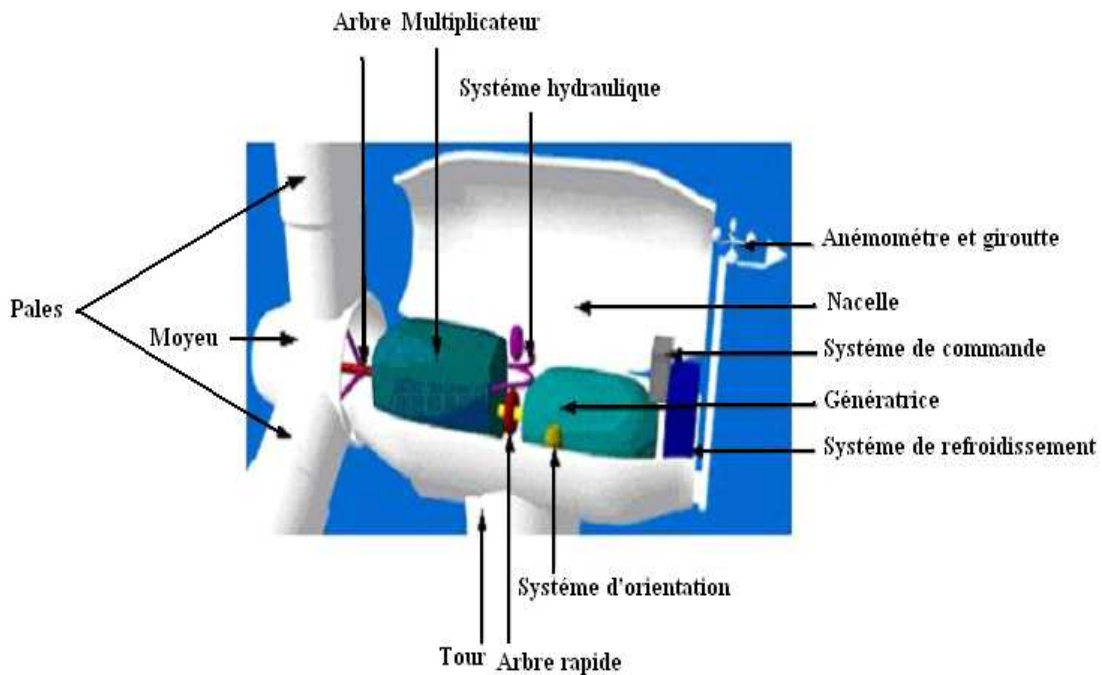


Figure II.15 Eléments constituant une éolienne.

-Le mat ou la tour : C'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier du maximum de l'énergie cinétique du vent et d'éviter les perturbations près du sol. Au sommet du mat se trouve la nacelle.

-La nacelle : Regroupe les éléments mécaniques permettant de coupler la génératrice électrique à l'arbre de l'éolienne.

-Le multiplicateur : sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice électrique.

-Le système de refroidissement : se compose généralement d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et d'un refroidisseur à huile pour le multiplicateur.

-La génératrice électrique : c'est l'élément principal de la conversion mécano-électrique qui est généralement une machine synchrone, asynchrone à cage ou à rotor bobiné. La puissance électrique de cette génératrice peut varier entre quelque kW à 10 MW.

-Le système de commande : qui contrôle en permanence le bon fonctionnement de l'éolienne et qui intervient automatiquement en cas de défaillance.

-**L'arbre**: qui relie le moyeu au multiplicateur contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

-**Le système d'orientation des pâles**: sert à la régulation de la puissance (réglage aérodynamique).

Habituellement, les éoliennes à axe horizontal sont composées de deux ou trois pales, quoiqu'on retrouve une majorité de turbines à trois pales. Le choix du nombre de pales est fonction de différents facteurs dont le coût, la performance, les charges mécaniques en présence, l'impact sur l'entraînement mécanique, le bruit et l'apparence visuelle du rotor [56].

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Cette configuration basée sur la caractéristique de la vitesse. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration.

II.8.1.5 Intérêt de la vitesse variable

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance produite en fonction de la vitesse du rotor est illustrée sur la figure II.16 on voit que pour chaque vitesse de vent, la puissance possède un maximum en fonction de la vitesse du rotor. En suivant ces maximums, on peut tracer une courbe (en pointillés) sur laquelle le coefficient de puissance est maximal [52]. Le lieu où le coefficient de puissance est maximal correspond également à la vitesse spécifique optimale. En modifiant la vitesse d'opération de la turbine, il est possible de conserver un coefficient de puissance maximal en jouant sur la vitesse spécifique et ainsi maintenir l'opération de la turbine sur la courbe en pointillé. Donc pour optimiser la puissance mécanique produite à partir de l'énergie contenue dans le vent, on doit ajuster la vitesse angulaire du rotor en fonction de la vitesse du vent. Seule une configuration à vitesse variable peut arriver à faire ce genre d'optimisation.

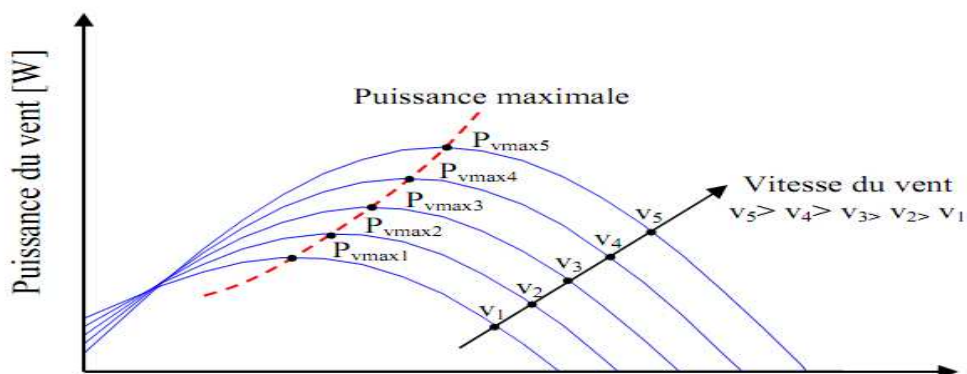


Figure II.16 Puissance de la turbine en fonction de la vitesse du rotor pour différentes vitesses du vent.

II.8.1.6 Définition et principe de fonctionnement du système éolien à vitesse variable

Le système éolien à vitesse variable est un système apte à travailler pour des vitesses égales ou différentes de la vitesse nominale (optimale) à l'aide du sous système MPPT (Maximum Point Tracking) et cela pour produire la puissance max P_{max} . L'MPPT peut être définie comme étant un algorithme ou un système capable d'aider le système éolien à axe horizontal à vitesse variable pour extraire le maximum de puissance électrique à partir de l'énergie cinétique du vent disponible.

Dans un système de production d'énergie par éolienne fonctionnant à vitesse variable, on cherchera systématiquement le régime optimal en exploitant les maximas du réseau des courbes de la Figure II.17 ; ce qui signifie que pour un régime de fonctionnement donné (vitesse du vent fixe) on souhaite que la puissance fournie soit maximale ce qui correspond à une valeur de λ donnée appelée $\lambda_{opt} = \lambda_{Cp_{max}}$ et C_p donné nommé Cp_{max} . La vitesse de rotation optimale Ω_{opt} résultante est alors donnée par la caractéristique correspondant à cette relation donnée sur la **zone II** de la figure II.15. La **zone I** correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, et la **zone III** correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

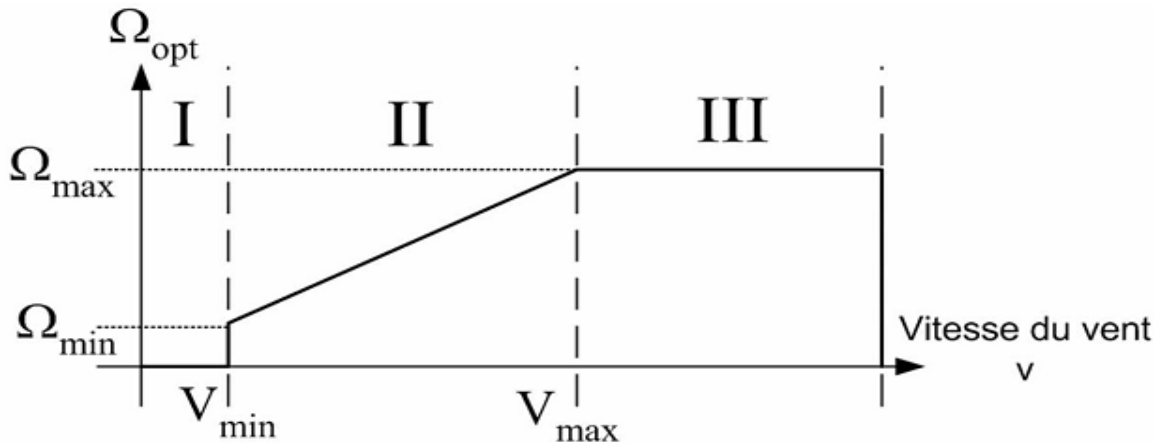


Figure II.17 Diagramme de la vitesse angulaire sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent.

Le Tableau II.4 présente les avantages et les inconvénients des éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable:

Table II.4 Comparaison entre les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable.

	Avantages	Inconvénients
Vitesse fixe	-De technologie simple robuste et approuvée -Solution économique.	-Possède une efficacité aérodynamique peu élevée. -Consomme la puissance réactive.

	-Peu de maintenance (MAS à cage).	-Génère des fluctuations de puissance produite sur le réseau.
Vitesse variable	<p>-Réduit le stress sur les composantes mécaniques de l'éolienne.</p> <p>-Permet de maximiser l'efficacité aérodynamique pour une grande plage de vitesse de vent.</p> <p>-permet de lissage de la puissance de sortie de la turbine.</p> <p>- permet le contrôle de la tension et de la fréquence sur le réseau (contrôle du flux de puissance).</p> <p>-Permet l'utilisation d'une boîte de vitesse réduite (ou absente) produisant moins de pertes par frottement (pleine vitesse variable seulement.</p>	<p>-Nécessite un contrôle complexe</p> <p>-Les convertisseurs de puissance sont engendrent des pertes de puissance électrique.</p>

II.8.1.7 Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

➤ Système à décrochage aérodynamique "stall"

La plupart des éoliennes connectées au réseau électrique nécessitent une vitesse de rotation fixe pour des raisons de cohérence de fréquence avec le réseau. Le système de limitation de vitesse le plus simple est le moins coûteux et un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_{max} (Figure II.18), l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale et par conséquent une baisse du coefficient de puissance; ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation.

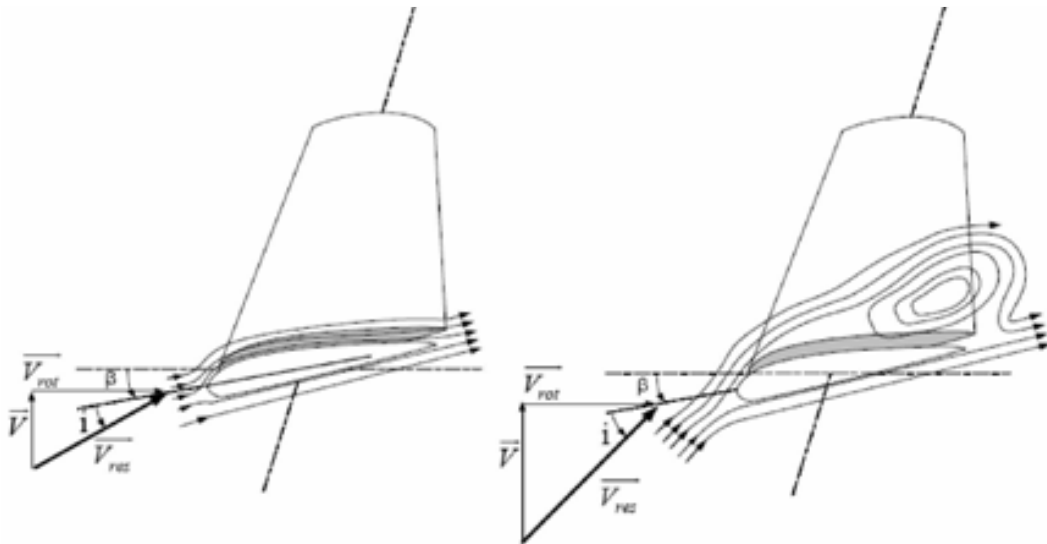


Figure II.18 Flux d'air sur un de pales profile (stall)

Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté. Il peut dans certains cas, être amélioré en autorisant une légère rotation de la pale sur elle-même (système "stall actif") permettant ainsi de maximiser l'énergie captée pour les faibles vitesses de vent. Pour les fortes vitesses de vent, la pale est inclinée de façon à diminuer l'angle de calage β et renforcer ainsi l'effet "stall" de la pale. La répercussion des variations de la vitesse du vent sur le couple mécanique fournie par l'éolienne est ainsi moins importante.

➤ Système d'orientation des pales "pitch"

Il utilise la variation de l'angle de calage des pales (Figure II.19). En variant l'angle d'incidence de la pale, on modifie le rapport entre les composantes de portance et de traînage. L'angle d'incidence optimal conduit à la puissance maximale disponible.

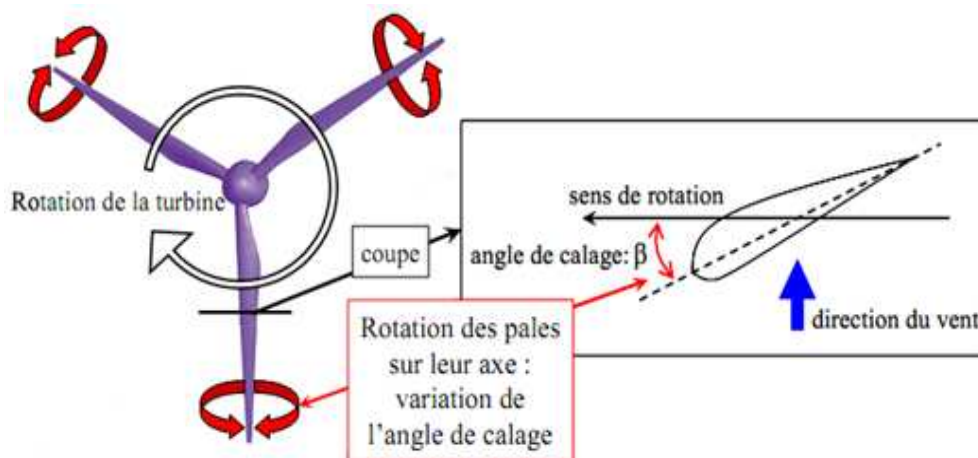


Figure II.19 Variation de l'angle de calage d'une pale

En général, la modification de l'angle de calage de la pale de l'éolienne permet quatre actions distinctes :

- Le démarrage à une vitesse du vent plus faible.
- L'optimisation du régime de conversion de l'énergie, quand la vitesse du vent évolue entre les limites $[V_{min}, V_{max}]$ en complément de la vitesse variable dans une plage relativement réduite.
- La régulation par limitation de la puissance pour $V > V_{max}$.
- La protection de l'éolienne contre les vents trop violents, par la mise en « drapeau » des pales de l'hélice.

II.8.1.8 Les génératrices électriques

Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [32]. On s'intéresse dans ce travail à la machine synchrone à aimant permanent.

II.8.1.8.1 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.

➤ Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (SCIG)

Jusqu'à présent le SCIG correspond au choix prépondérant par sa simplicité, son bon rendement et une maintenance réduite. La demande de puissance réactive est compensée par la connexion d'un groupe de condensateurs en parallèle avec le générateur (Figure II.20) ou par la mise en œuvre d'un convertisseur statique de puissance (Figure II.23).

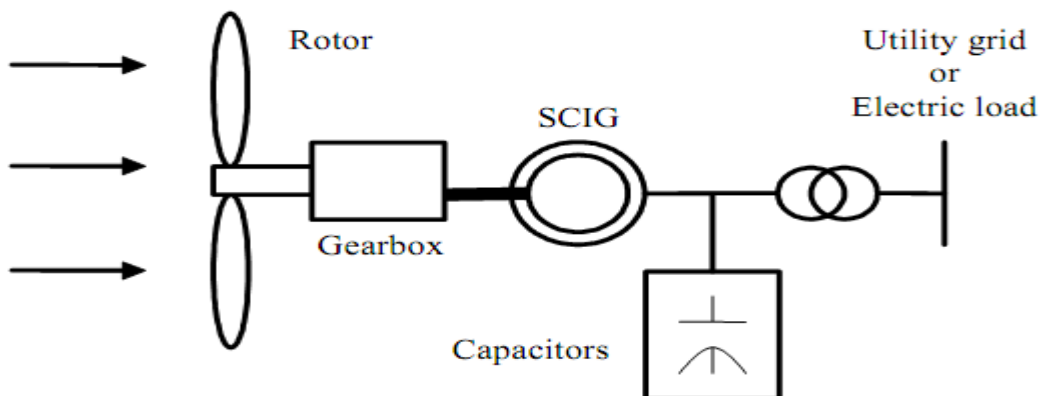


Figure II.20 Système de conversion éolien avec SCIG à vitesse fixe.

➤ Générateur Asynchrone à Rotor Bobiné (WRIG)

Grâce à un système de bagues et balais, la tension appliquée au rotor peut être commandée par un convertisseur électronique de puissance où l'énergie pouvant ainsi être appliquée et extraite du rotor, le générateur peut se magnétiser par le rotor comme par le stator.

Générateur Asynchrone Doublement Alimenté (DFIG)

Une des configurations en forte croissance dans le marché des turbines éoliennes est connue sous le nom de générateur asynchrone doublement alimenté (MADA ou DFIG). Celui-ci est un WRIG dont le stator est relié directement au réseau de puissance et dont le rotor est connecté à un convertisseur de type source de tension (VSC) en « back-to-back », 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 mécaniques et électriques par l'injection d'un courant à fréquence variable au rotor (Figure II.21).

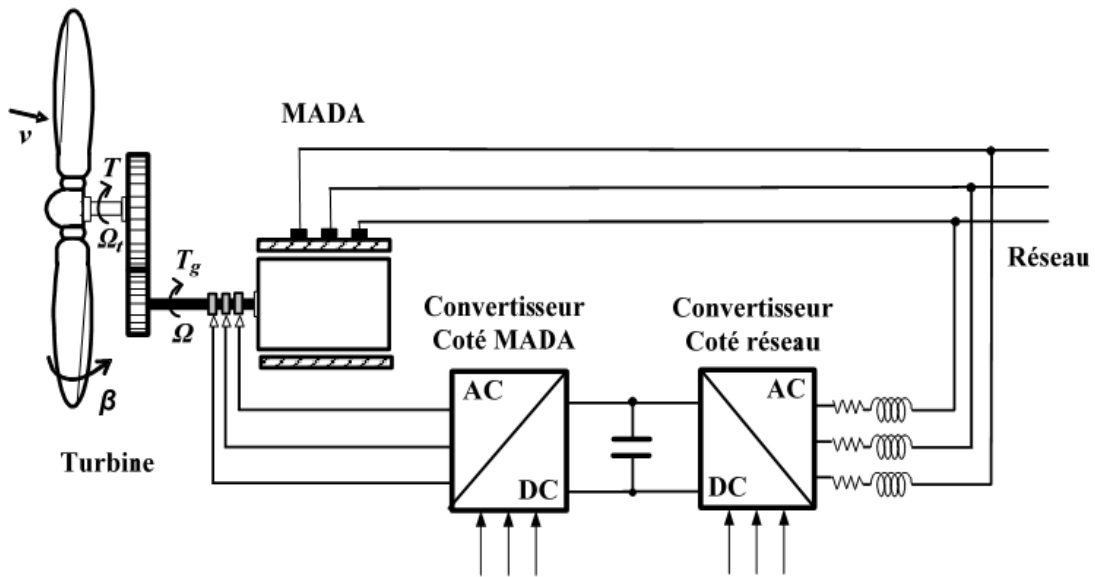


Figure II.21 Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

II.8.1.8.2 Générateur Synchrone (SG)

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du SG 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 (direct-drive) qui ne nécessitent pas de boîte de vitesses (gearless). Le SG est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique (Figure II.22) lequel permet un fonctionnement à vitesse variable. Pour des unités de petites tailles, le générateur à aimants permanents (PMSG)

est plus simple est moins coûteux. Au-delà de 20 kW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente.

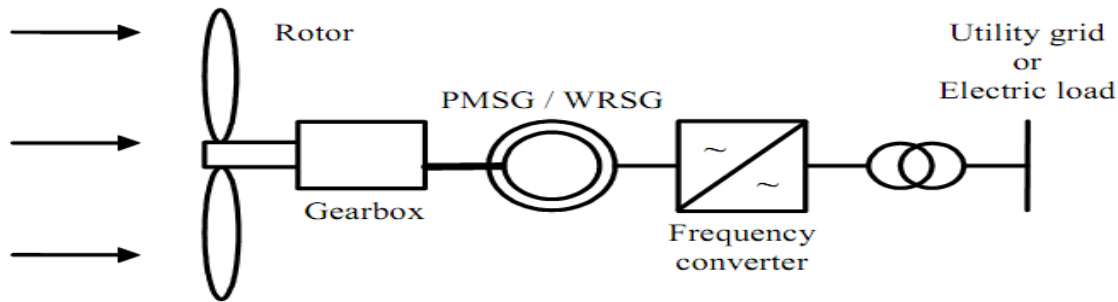


Figure II.22 Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.

➤ Générateur Synchrone à Rotor Bobiné (WRSG)

La connexion directe au réseau de puissance implique que le GS tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brushless avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable.

Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système.

➤ Générateur Synchrone à Aimants Permanents (PMSG)

La caractéristique d'auto excitation du PMSG 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 est réduit et sa simplicité en fait le générateur le plus employé.

Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur, en font de lui le moins compétitif.

II.8.2 Générateur Diesel (GD)

Dans le cas des installations à sources d'énergie renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (figure II.23). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse (régulateur de vitesse) sur le moteur diesel [57].

Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

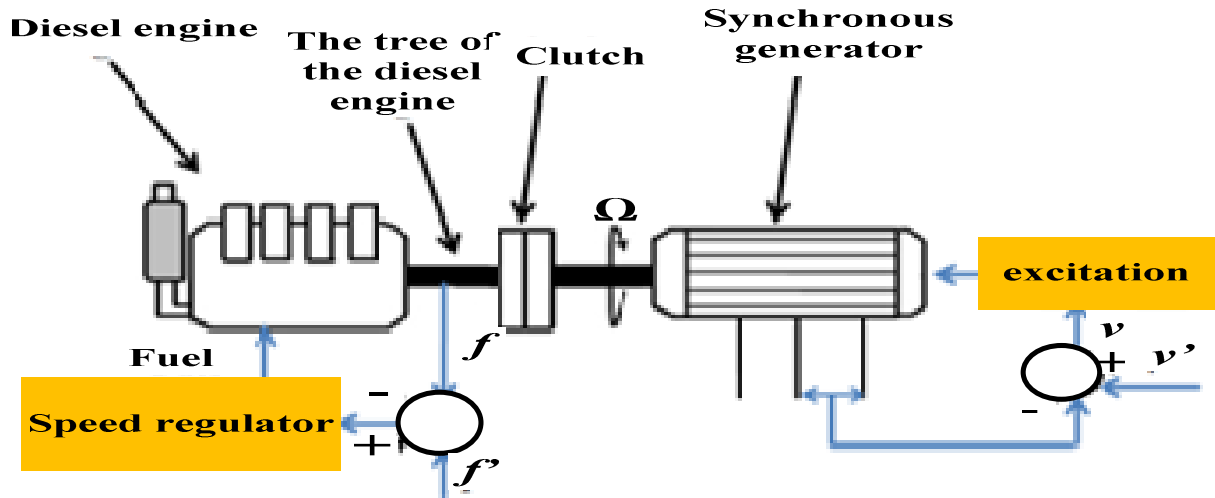


Figure II.23 Configuration du générateur diesel.

Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive.

Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à courant alternatif (CA). Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels.

II.8.3 Systèmes de stockage

Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce, le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé et peut se faire de plusieurs façon : électromagnétique, électrostatique ou encore électrochimique. D'une autre manière on peut stocker l'énergie sous une autre forme, mécanique, hydraulique, pneumatique ou thermique, et la convertir après en énergie électrique (Figure II.24)

L'énergie électrique est une énergie qui ne peut être stockée qu'en faibles quantités. Dans les systèmes isolés, des batteries sont souvent utilisées pour garantir l'équilibre production/consommation et pour lisser les variations de puissance.

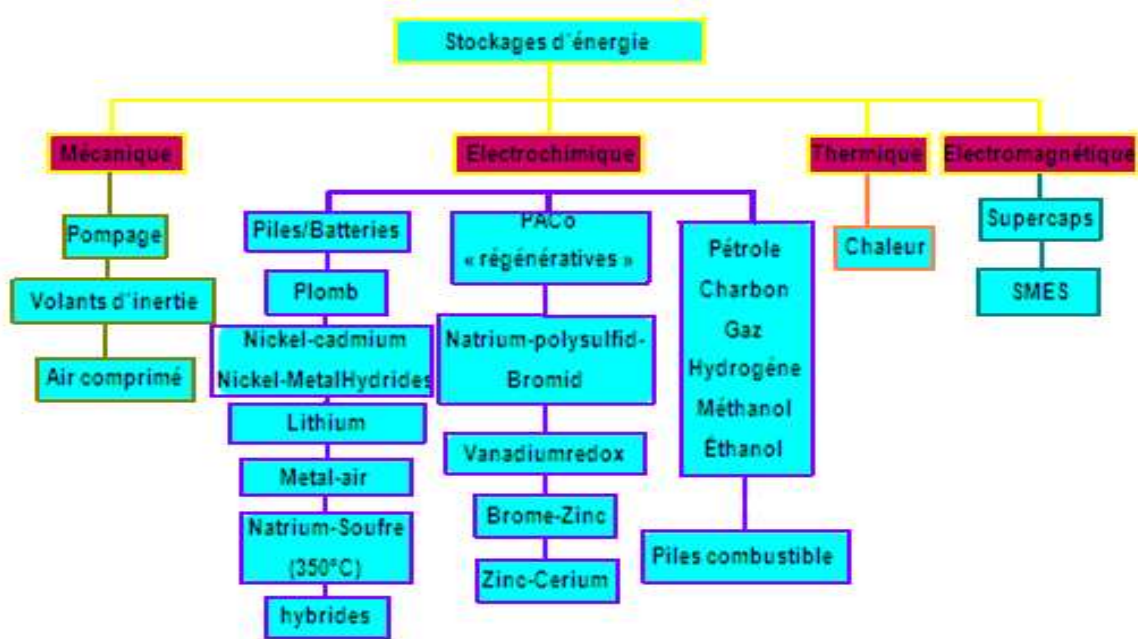


Figure II.24 Classification des stockages d'énergie.

Toute batterie est un ensemble de cellules électrochimiques capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions [33] au niveau des électrodes, le courant circulant sous forme d'ions dans l'électrolyte et sous forme d'électrons dans le circuit raccordé à la batterie (Figure II.25).

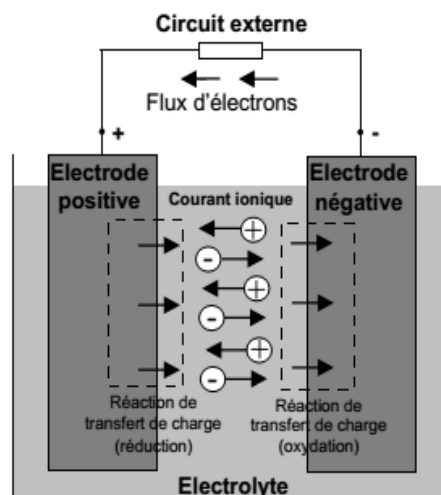


Figure II.25 Cellule électrochimique de base.

L'anode est l'électrode à laquelle l'oxydation (perte d'un ou plusieurs électrons) se produit et à partir de laquelle les électrons vont alimenter le circuit extérieur (la charge). La cathode est l'électrode à laquelle se produit la réduction (gain d'un ou plusieurs électrons); les électrons revenant de la charge arrivent sur cette électrode. En décharge, l'anode est la borne négative de la

batterie et la cathode la borne positive. Par contre en charge, l'électrode négative est la cathode et l'électrode positive est l'anode, les électrons circulant alors dans l'autre sens. La capacité énergétique de la batterie (exprimée en wattheures, Wh) dépend des quantités et de la nature des éléments chimiques compris dans la cellule.

Les paramètres électriques suivants sont généralement employés pour caractériser une batterie:

- La capacité nominale q_{\max} est le nombre maximal d'ampères-heures (Ah) qui peut être extrait de la batterie dans des conditions de décharges prédéterminées.
- L'état de charge SOC (State of charge) est le rapport entre la capacité présente et la capacité nominale q_{\max} : $SOC = q/q_{\max} (0 \leq SOC \leq 1)$. Si $SOC = 1$, la batterie est totalement chargée si $SOC = 0$, la batterie est totalement déchargée.
- Le régime de charge (ou décharge) est le paramètre qui reflète le rapport entre la capacité nominale d'une batterie et le courant auquel celle-ci est chargée (ou déchargée). Il est exprimé en heures. Par exemple, pour une batterie de 150 Ah déchargée à 5 A, le régime de décharge est 30 h.
- La durée de vie est le nombre de cycles charge/décharge que la batterie peut soutenir avant de perdre 20% de sa capacité nominale.

II.8.4 Système de supervision

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système.

Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants. Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

II.8.5 Convertisseurs

Dans un SEH, des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le courant continu (CC) en à courant alternatif (CA) et vice-versa. Trois types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs, les onduleurs et les hacheurs.

- Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement ils sont généralement monophasés ou triphasés.

- Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge.
- Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources.

II.8.6 Charges

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau ...etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive.

II.9 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu la définition du système hybride et des différentes topologies des systèmes hybrides. Nous avons ainsi présenté les différents types de générateurs électriques utilisés dans les turbines éoliennes et les principales applications des éoliennes. Nous nous sommes particulièrement intéressés à machine synchrone aimant permanent (GSAP). Nous avons enfin étudié différentes caractéristiques de chaque composant du système d'énergie hybride SEH ; Eolienne, groupe électrogène, stockage, convertisseur, charge,...etc.

Il est noter que pour qu'un projet éolien soit rentable, il est essentiel de s'assurer que l'on dispose d'une ressource suffisante car la vitesse moyenne du vent sur un site est un facteur déterminant du fait que l'énergie produite varie proportionnellement au cube de cette vitesse. Un site idéal bénéficie de vents assez forts et constants.

Dans ce qui suit, nous allons étudier la modélisation énergétique des composantes du système (Eolien-Diesel).

Chapitre III: Modélisation et commande du Système d'énergie Hybride

III.1 Introduction

Les systèmes hybrides utilisent différentes sources d'énergies comme l'éolien, le photovoltaïque, l'hydroélectrique et le générateur diesel. Ce type de système peut représenter une solution pour les régions éloignées ; dans ce contexte un dimensionnement correct et rentable du système hybride ainsi que l'étude du comportement dynamique du système sont très importants. Afin de concevoir le contrôle et la gestion globale du système une modélisation précise est nécessaire [23]. Dans ce chapitre, on présente le modèle dynamique (partie mécanique) et modèle électrique pour les trois sources d'énergies : éolienne, générateur diesel et batterie de stockage.

III.2 Dimensionnement du système Hybride

La configuration du système hybride dépend évidemment des ressources énergétiques disponibles ainsi que les contraintes d'utilisation. Ceci requiert une campagne de mesure et une analyse préalable des spécificités du site. Le modèle de base étudié, développé et testé est montré dans à Figure III.1. Il est formé de deux sources d'énergies ; l'éolienne, le générateur diesel et batterie de stockage, la charge principale.

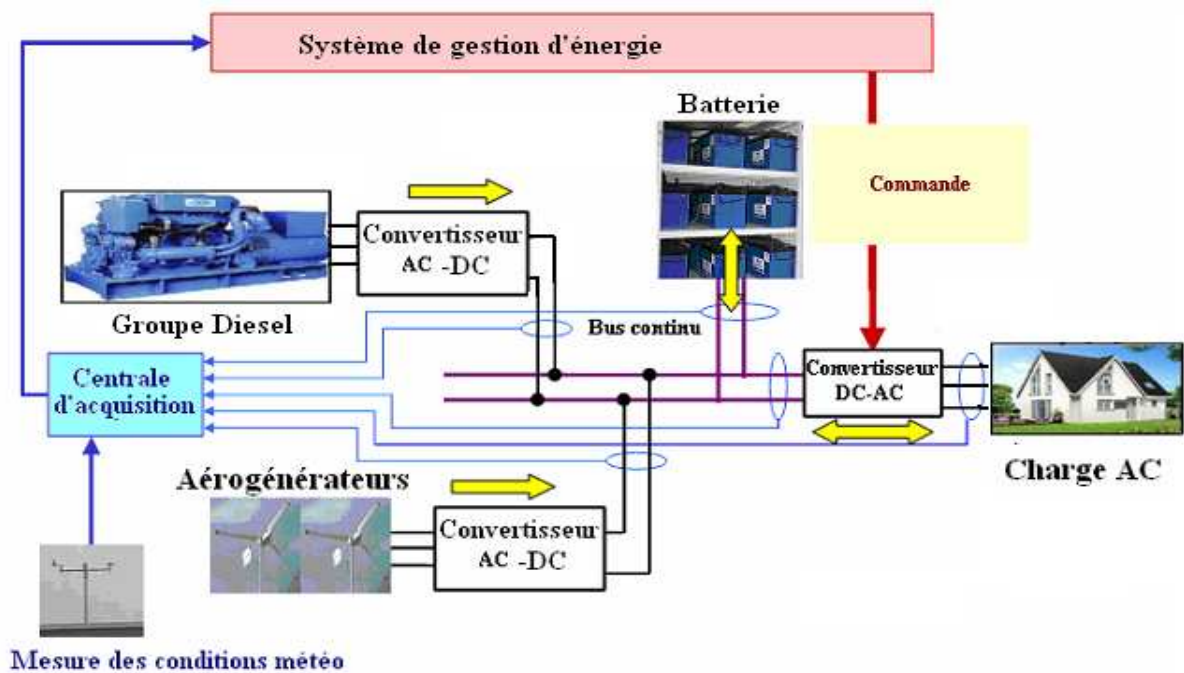


Figure III.1 Schéma présentatif d'un système hybride étudié.

III.2.1 Modélisation du système éolien

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, puis en énergie électrique Figure III.2.

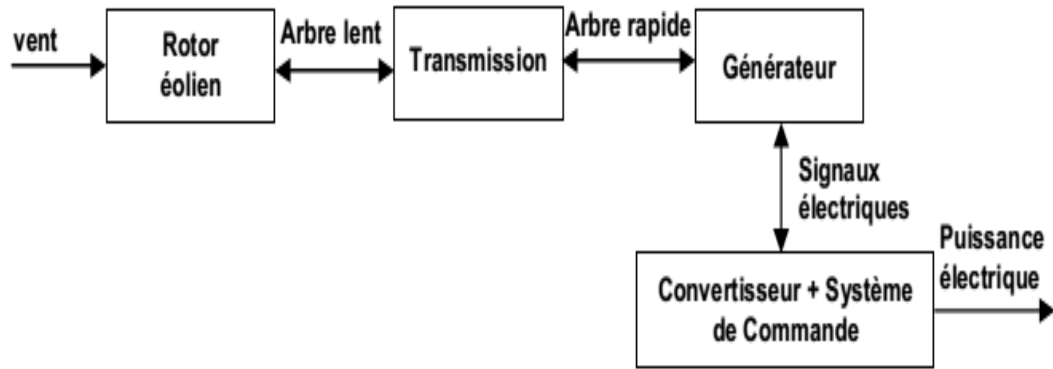


Figure III.2 Structure du système éolien [59].

Lorsque le vent devient suffisant, l'automate renseigné par l'anémomètre et la girouette fixée au sommet de la nacelle ordonne au moteur d'orientation de placer l'éolienne face au vent.

Le vent entraîne les pales qui font tourner un arbre lent. Le multiplicateur augmente la vitesse de rotation et imprime cette accélération à l'arbre rapide. Le mouvement est transmis au générateur électrique qui finalement produit l'énergie électrique. Le courant produit se dirige au sol par des câbles situés dans le fut de l'éolienne [60].

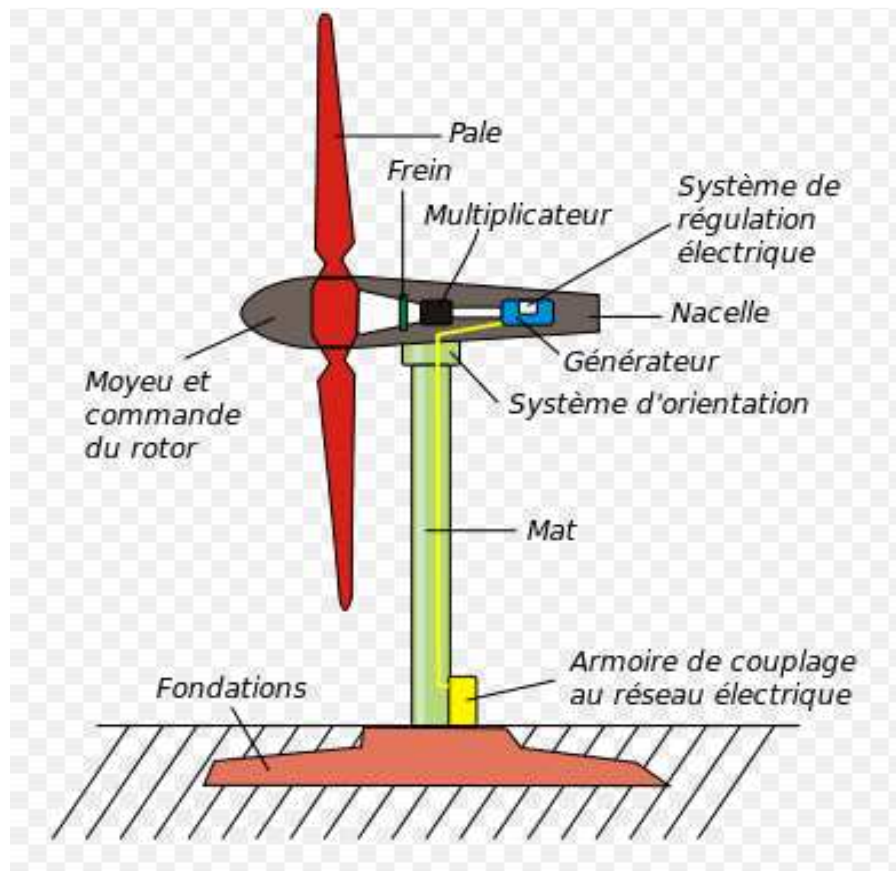


Figure III.3 Schéma d'une éolienne.

Le schéma bloc de l'éolienne étudiée dans le cadre de ce travail est présenté à la Figure III.2. Il s'agit d'une éolienne à axe horizontal, à trois pales couplées avec une génératrice synchrone à aimant permanent (GSAP) à vitesse variable.

La modélisation de l'éolienne exige la modélisation du vent, du comportement aérodynamique des pales, du système mécanique de transmission et du générateur électrique.

III.2.1.1 Modélisation du vent

Le vent est la variable d'entrée du système éolien. La mesure du vent à la hauteur des turbines est assez complexe, cependant le vent peut être représenté par une grandeur aléatoire définie par des paramètres statistiques [61].

La vitesse du vent peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps [34]:

$$V_v = f(t) \tag{III.1}$$

La vitesse du vent sera modélisée dans cette étude sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques sous la forme :

$$V_v(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_n \cdot \omega_v \cdot t)) \tag{III.2}$$

La figure III.4 représente schéma de bloc de vent

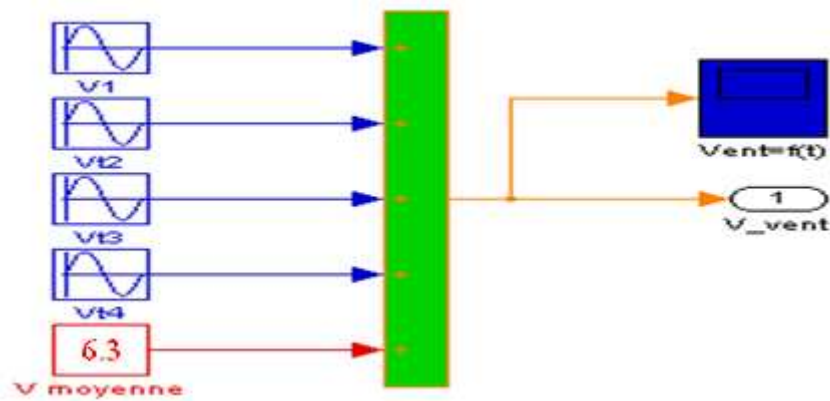


Figure III.4 Schéma de bloc de vent

La production du profil de vent est présentée sur la Figure III.5 où la valeur moyenne de la vitesse du vent est de 6.3 (m/s).

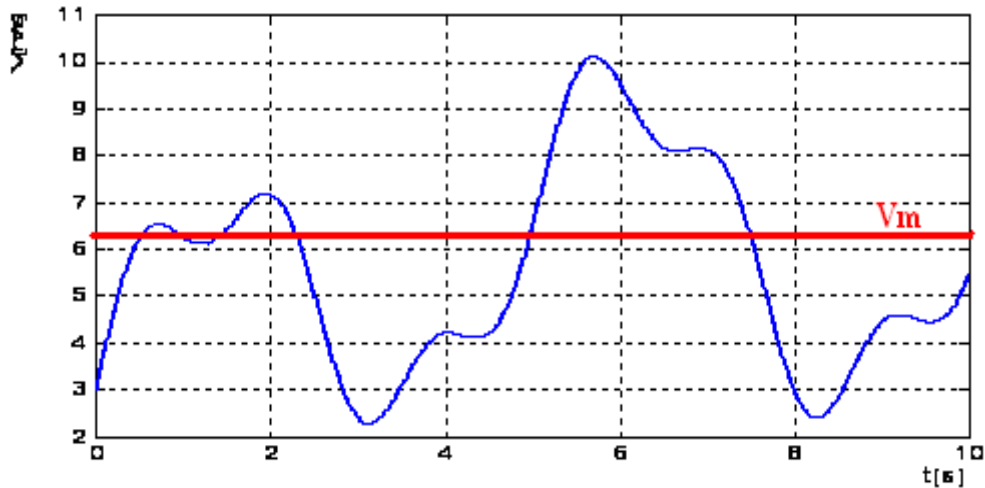


Figure III.5 Modèle du vent.

III.2.1.2 Conversion de l'énergie éolienne

III.2.1.2.a Energie cinétique du vent – conversion en énergie mécanique - Loi de Betz-

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure III .6 sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval. En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit $(V_1+V_2)/2$ la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est [62]:

$$m = \rho \cdot S \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (\text{III.3})$$

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) :

$$P_m = m \cdot \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{III.4})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (III.4):

$$P_m = \rho \cdot S \cdot \frac{(V_1^2 - V_2^2)(V_1 + V_2)}{4} \quad (\text{III.5})$$

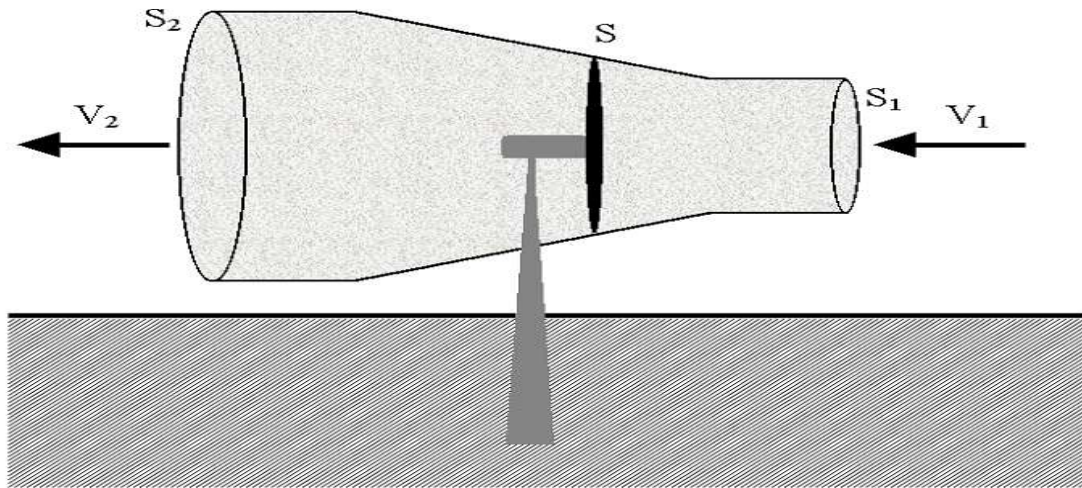


Figure III.6 Théorie de Betz

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

$$P_{mt} = \frac{\rho S V_1^3}{2} \quad (\text{III.6})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left[1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right]}{2} \quad (\text{III.7})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure III.7), on s'aperçoit que le ratio P_m/P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance C_p présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de 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.

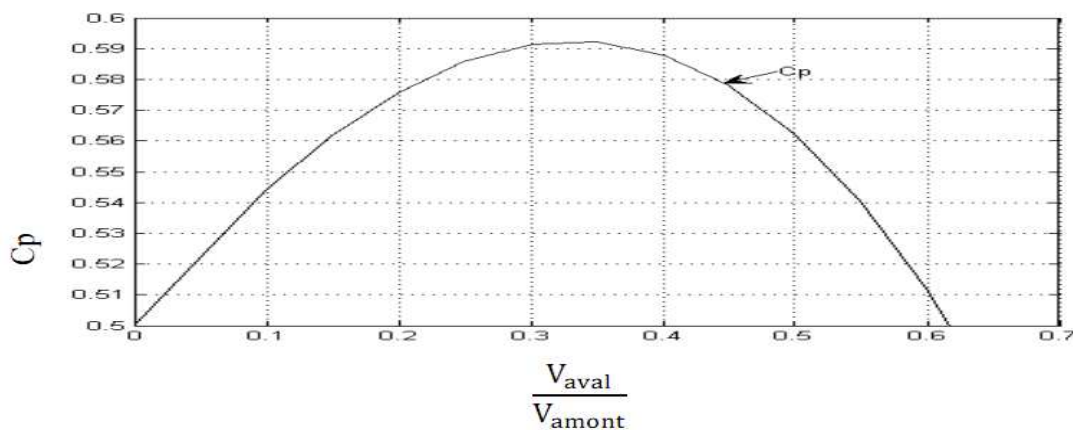


Figure III.7 Coefficient de puissance

III.2.1.2.b Conversion en énergie mécanique

En combinant les équations (III.3), (III.4) et (III.7), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = \frac{1}{2} C_p (\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{III.8})$$

Avec

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1}$$

Ω_1 : Vitesse de rotation avant multiplicateur.

R : Rayon de l'aérogénérateur.

G : Rapport du multiplicateur de vitesse.

La puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre du générateur électrique s'exprime par :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_2 R}{G V_1} \right) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{III.9})$$

Avec

Ω_2 : Vitesse de rotation après multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent (Figure III.8).

ρ : Densité de l'air, environ $1,3 \text{ kg/m}^3$.

S : Surface balayée par l'hélice en $[\text{m}^2]$.

P_m : Puissance mécanique en [W].

R : Rayon du rotor.

C_p : Coefficient de puissance (en fonction de λ et β).

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda i}\right) + C_6 \lambda \quad (\text{III.10})$$

Avec:

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \quad i = \arctg\left(\frac{1}{\lambda}\right) = \arctg\left(\frac{R \Omega}{V_1}\right)$$

Où:

i : Angle d' incidence

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent.

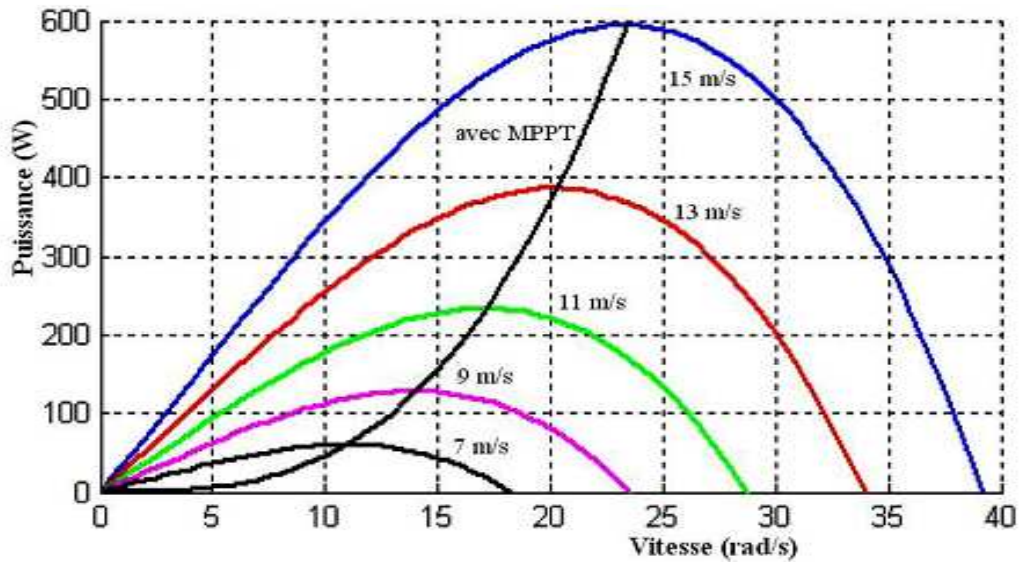


Figure III.8 Puissance théorique disponible d'une éolienne donnée

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe 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 1250 et 2000 *tr/min* pour cet exemple [2].

III.2.1.3 Modélisation de la turbine éolienne

Le modèle est basé sur les caractéristiques de puissance en état d'équilibre de la turbine. La rigidité de l'arbre d'entraînement est supposée infinie, le coefficient de frottement et l'inertie de la turbine doivent être combinés avec ceux du générateur couplé à la turbine.

La puissance de sortie est donnée par l'équation suivante que nous normaliserons en pu :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p(\lambda). \rho. \pi .R^2.V_1^3$$

$$C_p = f(\lambda, \beta) = C_1 \left(\frac{C_2}{\lambda i} - C_3 \beta - C_4 \right) \exp\left(\frac{-C_5}{\lambda i}\right) + C_6 \lambda \tag{III.11}$$

Avec :

$$\frac{1}{\lambda i} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

Les caractéristiques de C_p en fonction de λ pour différentes valeurs de l'angle de calage β sont illustrées sur la figure III.9 suivante. La valeur maximale de C_p est atteinte pour $\beta = 0$ et $\lambda = 8,1$; Cette valeur particulière de λ est définie comme la valeur nominale λ_{nom} .

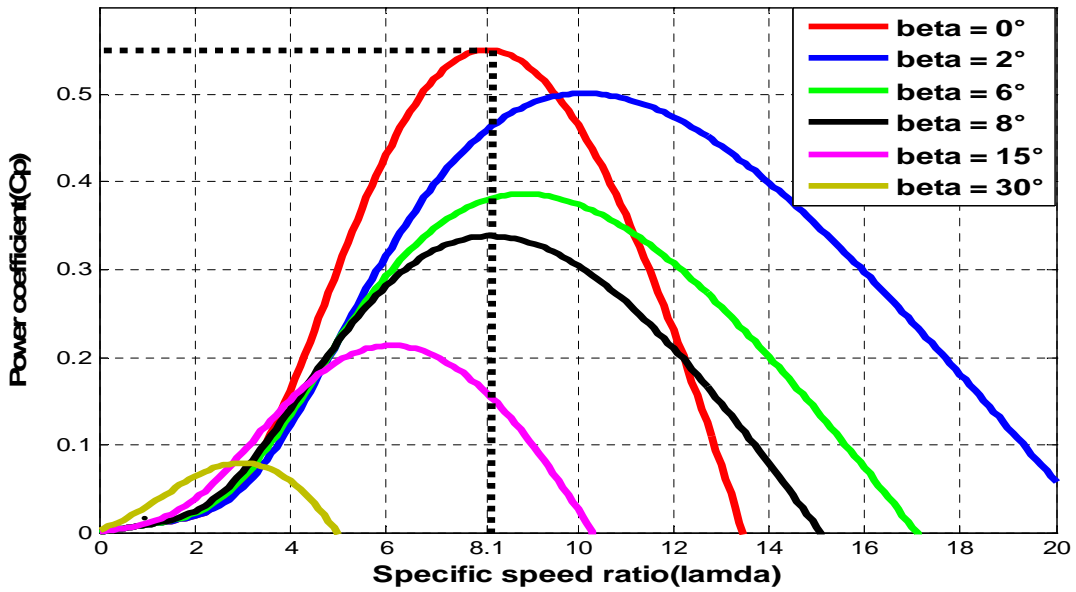


Figure III.9 Coefficient de puissance pour différentes valeurs de β .

• **Transmission**

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse de la génératrice

Figure III.10. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

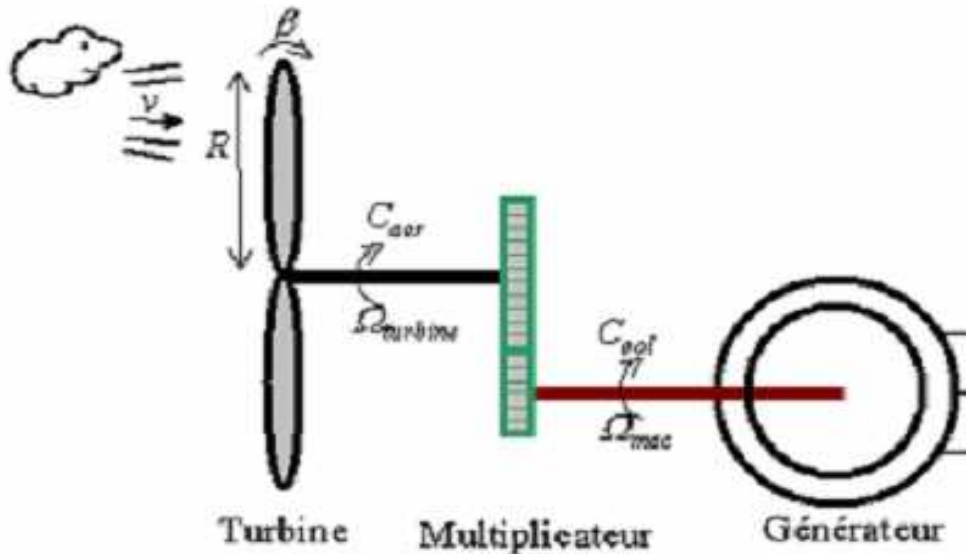


Figure III.10 Schéma de la turbine éolienne.

Avec :

$$C_{aer} = G * C_g \tag{III.12}$$

• **Equation dynamique de l'arbre**

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie J et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine.

$$J = \left(\frac{J_t}{G^2} \right) + J_g \tag{III.13}$$

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

$$C_m = J \frac{d \Omega_m}{dt} \tag{III.14}$$

Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique C_{em} produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux C_{vis} , et le couple issu du multiplicateur C_g .

$$C_m = C_g - C_{em} - C_{vis} \tag{III.15}$$

Le couple résistant du aux frottements est modélisé par un coefficient de frottement visqueux f :

$$C_{vis} = f \Omega_{mec} \tag{III.16}$$

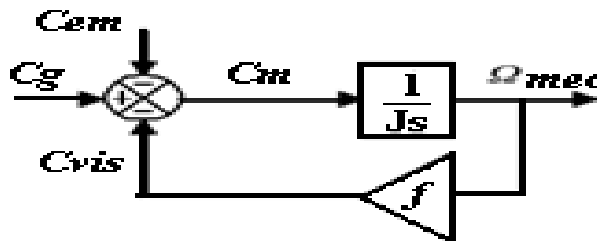


Figure III.11 Schéma bloc du modèle de l'arbre mécanique.

Les équations précédentes permettent d'établir le schéma bloc d'asservissement de vitesse de la turbine (Fig. III.12).

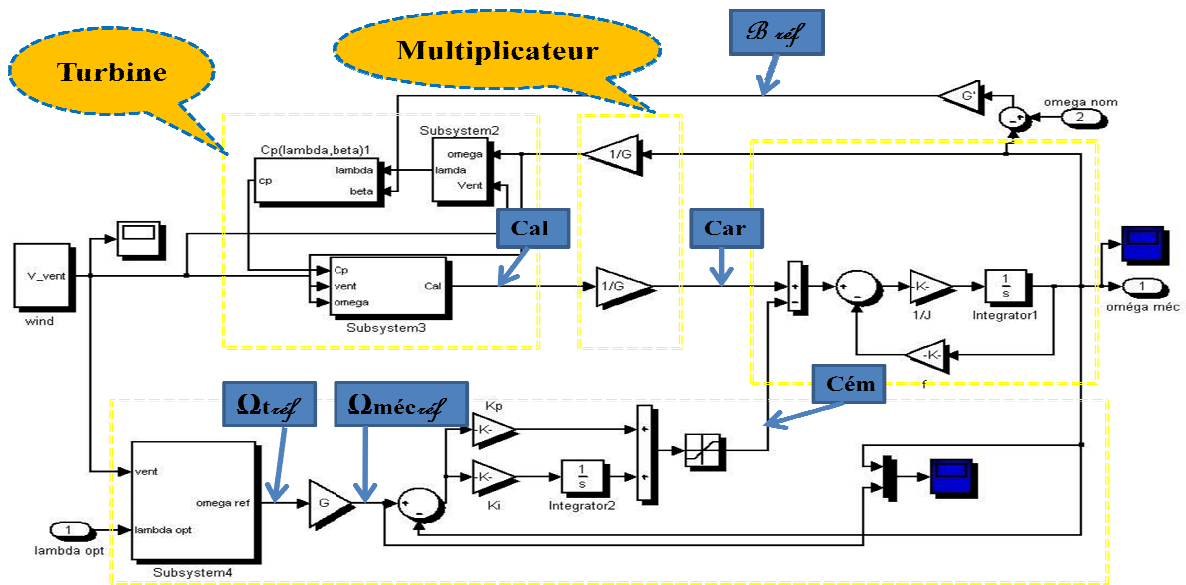


Figure III.12 Schéma de bloc d'asservissement de la vitesse de la turbine.

III.2.1.4 Modélisation du système d'orientation des pales

Le système d'orientation des pales sert essentiellement à limiter la puissance générée. Avec un tel système, la pale est tournée par un dispositif de commande appelé "pitch Control". En réglant l'angle d'orientation des pales on modifie les performances de la turbine et plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont face au vent en basses vitesses puis pour les fortes vitesses de vent s'inclinent pour dégrader le coefficient de puissance. Elles atteignent la position "en drapeau" à la vitesse maximale (figure III.9).

L'entrée de commande du système d'orientation des pales et la puissance électrique mesurée sont illustrées sur le schéma suivant [63] :

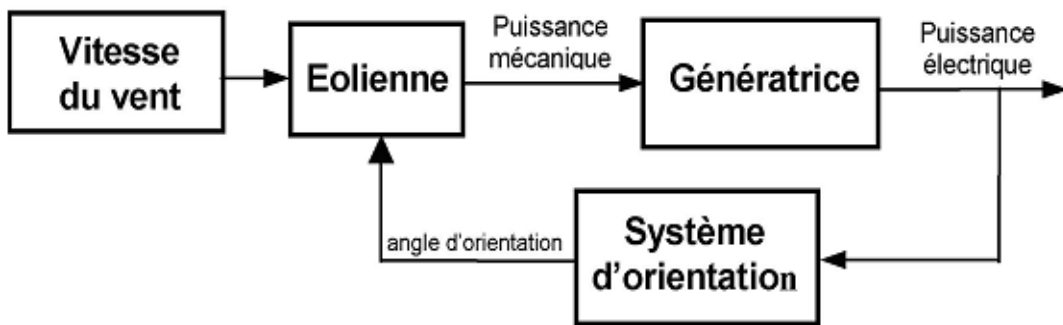


Figure III.13 Schéma d'application du système d'orientation des pales.

III .2.1.5 Génération de l'angle de référence (β_{ref})

L'angle d'orientation des pales doit être régulé de manière à maintenir constante la puissance électrique générée. La forme des pales est plus généralement les caractéristiques de la turbine jouent un rôle primordial dans le réglage de puissance.

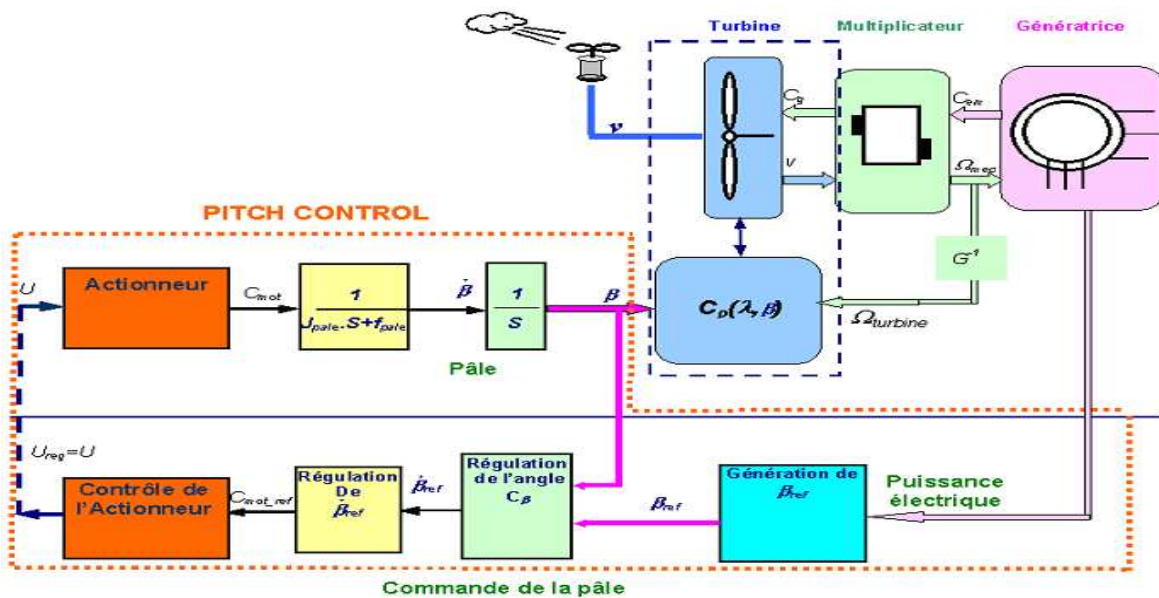


Figure III.14 Schéma bloc de du système d'orientation des pales [35]

Le signal à l'entrée du régulateur de l'angle "C_β" à pour objectif d'éliminer l'erreur statique par l'intégrateur ; on obtient donc le modèle simplifié sous forme de schéma-bloc de la Figure III.15.

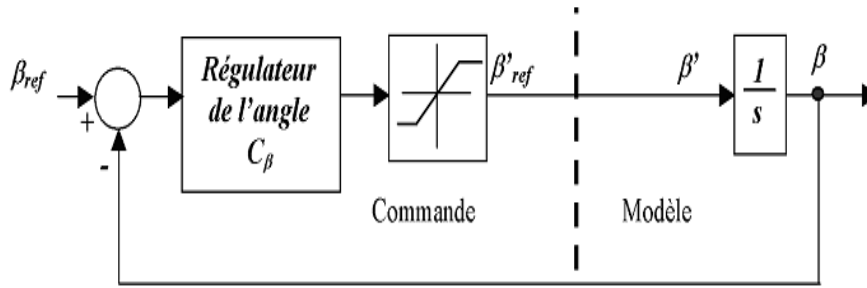


Figure III.15 Modélisation du système de régulation de l'angle de calage en boucle fermée.

III.2.1.6 Modélisation de la génératrice synchrone à aimants permanents

Grâce aux nombreux avantages qu'elle a par rapport aux autres types de machines électriques (robustesse, maintenance, prix) la machine synchrone à aimants permanents est intéressante pour l'utilisation comme génératrice couplée à une turbine éolienne. Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents obéit à certaines hypothèses essentielles simplificatrices telles que [8] :

- ✓ L'absence de saturation dans le circuit magnétique.
- ✓ La distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator.
- ✓ L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau.
- ✓ L'effet d'encochage est négligeable.
- ✓ La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

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

$$\begin{bmatrix} U_{sa} \\ U_{sb} \\ U_{sc} \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \phi_{sa} \\ \phi_{sb} \\ \phi_{sc} \end{bmatrix} \tag{III.17}$$

R_s : Résistance des phases statoriques.

$[U_{as}, U_{bs}, U_{cs}]^T$: Tensions des phases statoriques.

$[i_{as}, i_{bs}, i_{cs}]^T$: Courants des phases statoriques.

$[\phi_{as}, \phi_{bs}, \phi_{cs}]^T$: Flux totaux à travers les bobines statoriques.

Comme les enroulements statoriques sont montés en étoile à neutre isolé (figure III.16), la somme instantanée des courants statoriques est nulle de sorte qu'il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire de tension ou de flux,

elle n'intervient pas dans le couple. Le comportement de la machine est donc représenté par deux variables indépendantes.

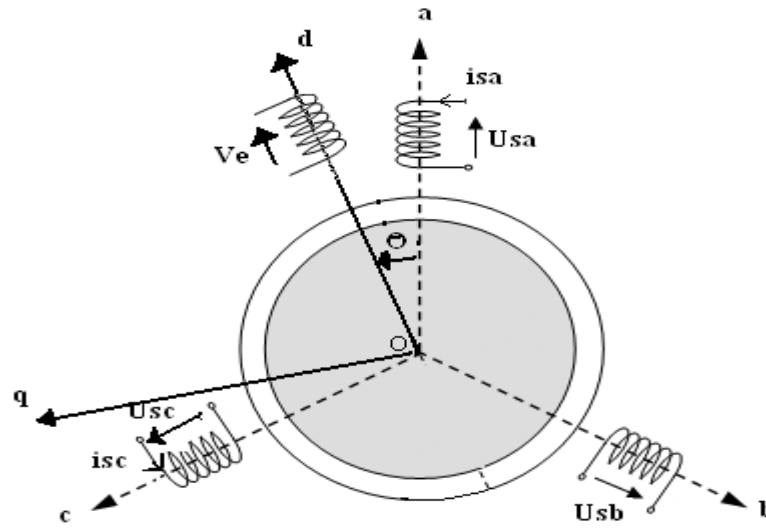


Figure III.16 Structure de la génératrice synchrone

Pour simplifier le système d'équations à coefficients variables, un modèle dans le repère de Park de cette machine (figure III.17) sera utilisé U_{sd} , U_{sq} et I_{sd} , I_{sq} . Le repère de Park est en fait un repère diphasé, équivalent du repère triphasé, plus simple à manipuler car les grandeurs électriques évoluent comme des grandeurs continues. On peut passer de l'un à l'autre repère à l'aide de matrices de passage.

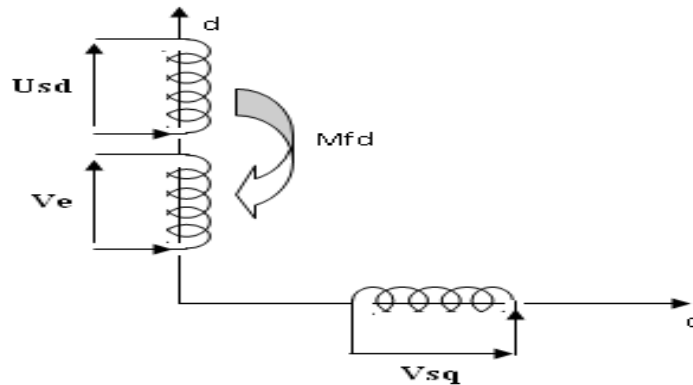


Figure III.17 Développement des enroulements de la génératrice synchrone suivant le système d'axe (dq).

$$[U_{sdq}] = [P(\theta)][U_{sabc}] \tag{III.18}$$

$$[I_{sdq}] = [P(\theta)][i_{sabc}] \tag{III.19}$$

Avec:

$P(\theta)$: Matrice de PARK est donnée par:

$$[P(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.20})$$

Après développement des équations ci-dessus, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{aligned} U_{sd} &= R_s I_{sd} + \frac{d}{dt} \phi_{ds} - p\Omega \cdot \phi_{sq} \\ U_{sq} &= R_s I_{sq} + \frac{di_q}{dt} \phi_{sq} + p\Omega \cdot \phi_{sd} \end{aligned} \quad (\text{III.21})$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, Φ_{sd} et Φ_{sq} sont fonctions linéaires des courants I_{sd} et I_{sq} :

$$\begin{aligned} \phi_{sd} &= L_{sd} I_{sd} + \phi_e \\ \phi_{sq} &= L_{sq} I_{sq} \end{aligned} \quad (\text{III.22})$$

Ou:

Φ_e : Flux des aimants à travers le circuit équivalent direct.

Les équations de la machine dans le repère de Park sont les suivantes :

$$U_{sd} = R_s I_{sd} + L_s \frac{di_{sd}}{dt} - L_s p\Omega \cdot i_{sq} \quad (\text{III.23})$$

$$U_{sq} = R_s I_{sq} + L_s \frac{di_{sq}}{dt} + L_s p\Omega \cdot i_{sd} \quad (\text{III.24})$$

$$\omega = p \cdot \Omega \quad (\text{III.25})$$

i_{sd}, i_{sq} : Courants statoriques dans le repère de Park [A].

U_{sq}, U_{sd} : Tensions statoriques dans le repère de Park [V].

R_s : Résistance statoriques [Ω]

L_s : Inductance cyclique statorique [H]

p : Nombre de paire de pôles de la machine synchrone.

ω : Pulsation des tensions [rad/s].

Les tensions étant les grandeurs d'entrée, on peut exprimer les grandeurs de sortie (les courants) en fonction de celles-ci. On obtient alors :

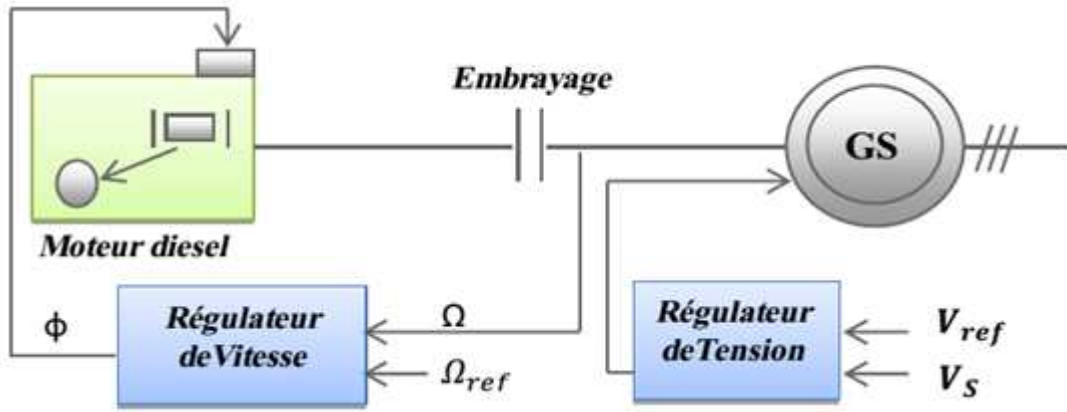


Figure III.19 Modèle simplifié du générateur diesel.

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.

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. 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.

Le bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié est illustré sur la Figure III.20

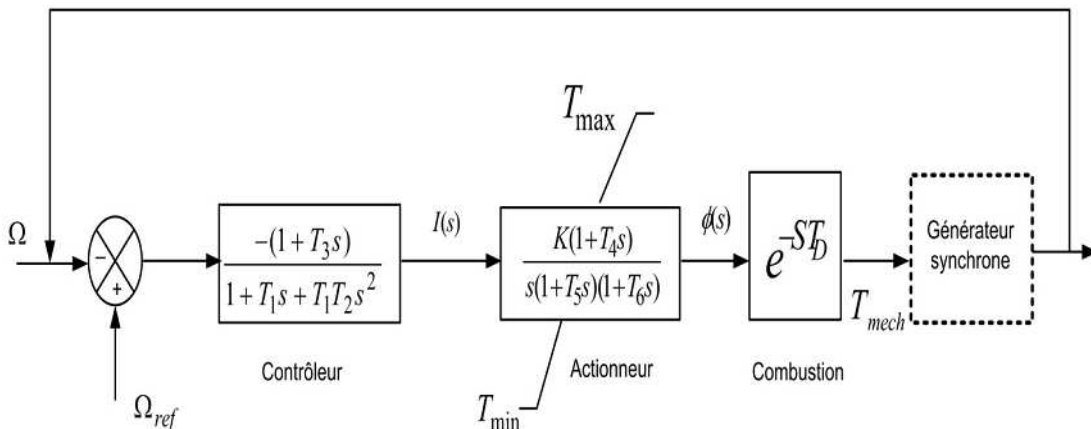


Figure III.20 Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié.

La dynamique de fonctionnement de l'actionneur est approchée par une fonction de transfert avec le gain K qui adapte la relation entre le couple et la consommation de carburant.

$$G(s) = \frac{K(1 + T_4s)}{s(1 + sT_5)(1 + sT_6)} I(s) \quad (\text{III.29})$$

Le bloc combustion inclut un retard qui représente le temps nécessaire pour que le moteur diesel réponde à une demande de modification du taux d'injection de carburant ; ce temps mort T_D est le résultat de la position de plusieurs cylindres qui ne sont pas acceptés la quantité de carburant à un instant donné. Le délai peut être exprimé comme étant le temps réel entre les arrivées consécutives des pistons au point d'injection plus approximativement un quart de tour du vilebrequin du couple produit par le moteur diesel.

$T_{mech}(S)$ est une fonction du débit de carburant $\Phi(s)$:

$$T_{mech} = e^{-sT_D} \phi(s) \quad (\text{III.30})$$

La consommation horaire de carburant du générateur diesel $Cons(t)[l/h]$ peut être modélisée par la loi linéaire en fonction de la puissance de sortie requise par la charge [64] :

$$Cons(t) = \alpha_{GD} \cdot P_{GD}(t)_{gen} + \beta_{GD} \cdot P_{GD}(t)_{rat} \quad (\text{III.31})$$

Où :

α_{GD} [l/kWh] et β_{GD} [l/kWh] sont les coefficients de la courbe de consommation fournies par le fabricant.

$P_{GD}(t)_{gen}$ [kW] : Puissance générée par le GD.

$P_{GD}(t)_{rat}$ [kW] : Puissance nominale de GD.

α_{GD} et β_{GD} sont les constantes qui sont égales à 0.246 l/kWh , 0.08145 l/kWh respectivement [64].

Dans le cas d'un réseau isolé ayant comme source principale le générateur diesel celui-ci est chargé de fixer la fréquence du réseau et de garder l'amplitude de la tension constante. Pour le SEH étudié dans cette thèse, la fréquence et l'amplitude de la tension sont fixées par l'onduleur, ce qui permet au GD de fonctionner à puissance constante et d'être arrêté si nécessaire. Par conséquent, le modèle du moteur diesel se réduit à une constante qui fixe la puissance de la machine synchrone.

III.2.2.1 Modèle simplifié de la machine synchrone

La puissance mécanique fournie en sortie du bloc « moteur diesel » est convertie en puissance électrique par un modèle simplifié [65] de la machine synchrone. Les parties mécaniques et électriques de la machine sont modélisées dans le même bloc.

Le rotor de la machine synchrone est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation I_{ex} continu créant un champ magnétique $2p$ polaire. Il possède donc " p " paires de pôles, le même nombre de pôles se retrouve dans le stator. Ses enroulements sont le siège de courants alternatifs triphasés sachant que la liaison entre la pulsation ω_g du champ magnétique tournant et la vitesse de rotation est :

$$\Omega_s = \omega_g / p \quad (\text{III.32})$$

Avec $\omega_g = 2\pi f$ où f est la fréquence des courants alternatifs en [Hz].

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une force électromotrice $e(t)$ de valeur efficace E :

$$E = K N \Phi f = K N \Phi p n_s = K' \Phi n_s \quad (\text{III.33})$$

Où:

K : Coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

N : Nombre de conducteurs d'une phase de la machine (1 spire = 2 conducteurs)

Φ : Flux maximum à travers un enroulement [Wb]

n_s : Vitesse de rotation [tr/min]

$K' = K.N.p$: Constante globale (caractéristique de la machine)

Le modèle équivalent d'un enroulement du générateur synchrone est présenté sur la Figure III.21

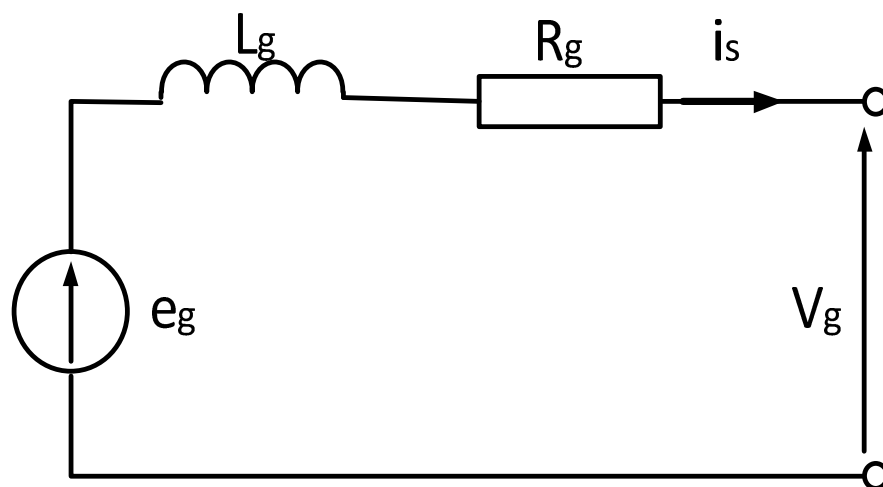


Figure III.21 Modèle équivalent d'un enroulement.

Où :

e_g : f.é.m. à vide [V]

V: Tension aux bornes d'un enroulement de la machine [V] .

R_g : Résistance de l'enroulement

L_g : Inductance synchrone [H]

La loi des mailles pour le schéma présenté dans la Figure III-21 avec les grandeurs instantanées est :

$$e_g = v_g + L_g \frac{di_g}{dt} + R_g \cdot i_g \quad (\text{III.34})$$

En triphasé, le stator comporte trois enroulements et donc trois forces électromotrices $e_{g1}(t)$, $e_{g2}(t)$ et $e_{g3}(t)$ de même valeur efficace E et déphasées de $2\pi/3$.

Dans le modèle simplifié de la machine synchrone, la partie mécanique sans frottement est décrite par l'équation:

$$J_{ds} \frac{d\Omega_s}{dt} = T_d - T_{em} \quad (\text{III.35})$$

Où :

J_{ds} : L'inertie totale de l'ensemble moteur diesel générateur synchrone.

Ω_s : Vitesse de rotation.

T_d : Couple mécanique sur l'arbre.

T_{em} : Couple électromagnétique.

III.2.2.2 Embrayage

Le système hybride éolien-diesel a trois modes de fonctionnements ; le passage du mode « tout-Diesel » au mode « tout-éolien » est assuré par la mise hors service du moteur diesel. La mise en place d'un embrayage entre le moteur diesel et la machine synchrone assure cette fonction. L'ouverture et la fermeture sont basées sur la comparaison entre la puissance de la charge principale et la puissance débitée par la GSAP de l'éolienne. Si la puissance de l'éolienne est supérieure de la charge l'embrayage est ouvert et la charge sera alimentée par éolienne seule si non l'embrayage restera toujours fermé.

III.2.3 Batterie

Il existe dans la littérature une large variété de modèles de batterie [66] [67] [68]. Le plus souvent ces modèles représentent la batterie par un circuit électrique équivalent composé de résistances, de capacités et autres éléments de valeur fixe ou variant avec des paramètres tels que l'état de charge ou la température. Ces modèles sont utilisés pour déterminer l'état de charge ou

pour prédire la durée de vie des batteries. La plupart des modèles sont constitués de deux parties, l'une décrivant le modèle de capacité et l'autre le modèle de tension de la batterie [69].

La capacité est une des caractéristiques les plus importantes d'une batterie. Cette capacité représente la quantité de courant qui peut être extraite d'une électrode via les "masses actives", c'est-à-dire l'électrolyte et les matériaux actifs des électrodes sur une décharge. Cette capacité s'exprime en ampères-heures, Ah ($1\text{Ah} = 3600$ coulombs). En pratique, cette capacité dépend du courant, ainsi que de la température.

Le modèle de la tension fournit l'amplitude de la tension aux bornes de la batterie [66-69]. Cette tension est influencée par la profondeur de la charge et de la décharge. Le modèle de la tension doit être capable de prévoir que la tension de la batterie baisse lentement (linéairement) pendant la première partie de décharge et rapidement à la fin, quand la batterie est presque vide (Figure III.22). Dans le cas de la recharge, la tension augmente linéairement pendant la première partie et plus rapidement vers la fin de la charge.

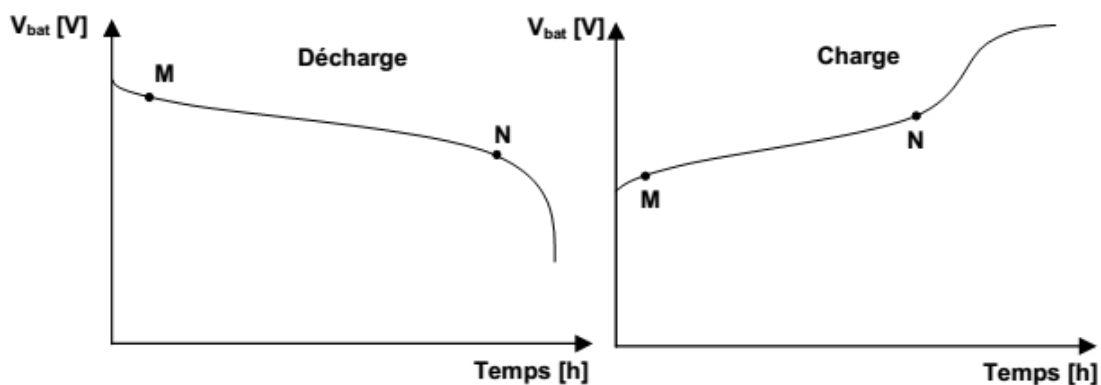


Figure III.22 Evolution de la tension avec le temps, durant la charge et la décharge

Le modèle de batterie est basé sur l'observation du phénomène physico-chimique de la charge et de la décharge du système de stockage ; on peut utiliser le circuit équivalent suivant (Figure III.23):

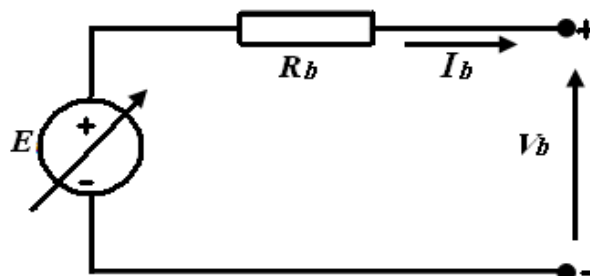


Figure III.23 Schéma électrique simplifié d'une batterie.

Par convention la batterie est vue comme un générateur ; le courant de charge est négatif et celui de décharge est positif. Pour ce modèle utilisée dans cette étude est de nickel-cadmium (Ni-Cd). Donc le modèle mathématique est :

$$E = E_0 - \frac{V_p Q_b}{Q_b - \int i_b dt} + \tilde{A} \exp\left(-B_t \cdot \int i_b dt\right) \tag{III.36}$$

Avec

E : Tension de batterie (V)

E₀ : Tension de constante de batterie (V)

V_p : Tension de polarisation (V)

Q_b : Capacité de batterie (Ah)

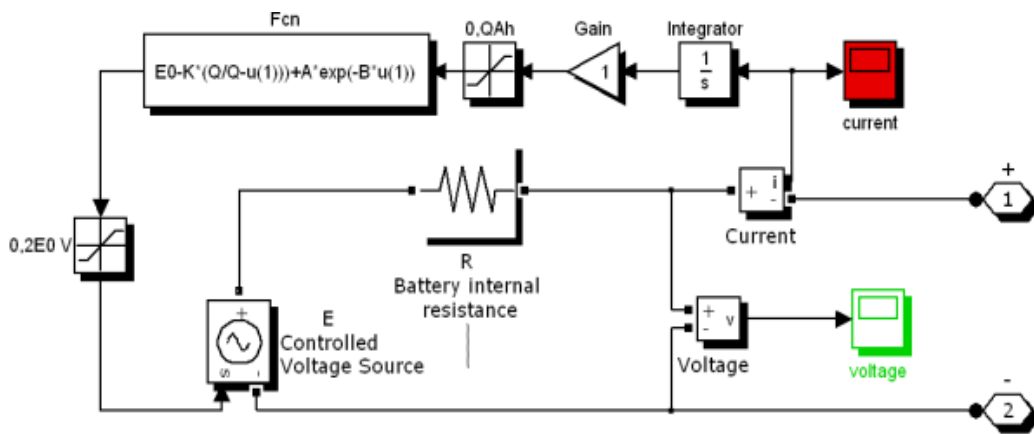


Figure III.24 Schéma de Simulation de la batterie (Ni-Cd).

III.2.4 Redresseur

Contrairement aux redresseurs classiques les redresseurs MLI sont réalisés à l'aide de semi-conducteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture. La possibilité de commande à l'ouverture permet un contrôle total du convertisseur, parce que les interrupteurs peuvent être commutés selon les besoins aussi bien à la fermeture qu'à l'ouverture avec une fréquence assez élevée. Le schéma bloc est représenté dans la figure III-25.

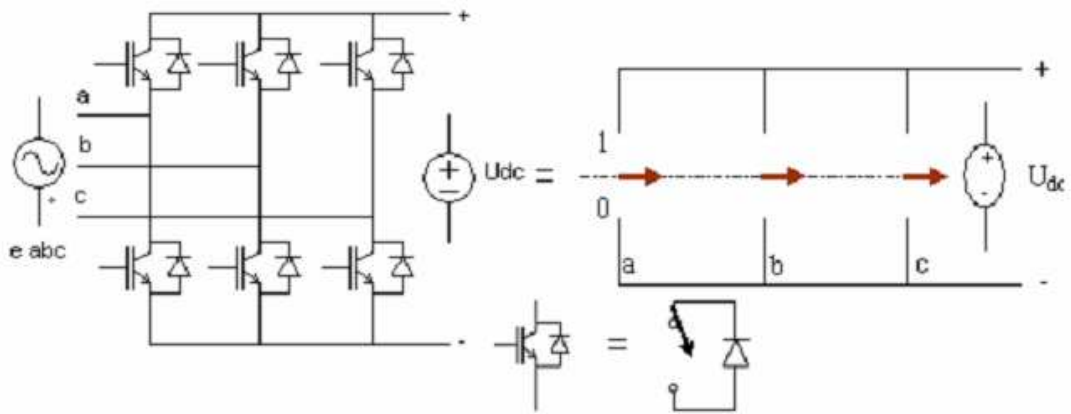


Figure III.25 Pont de redresseur.

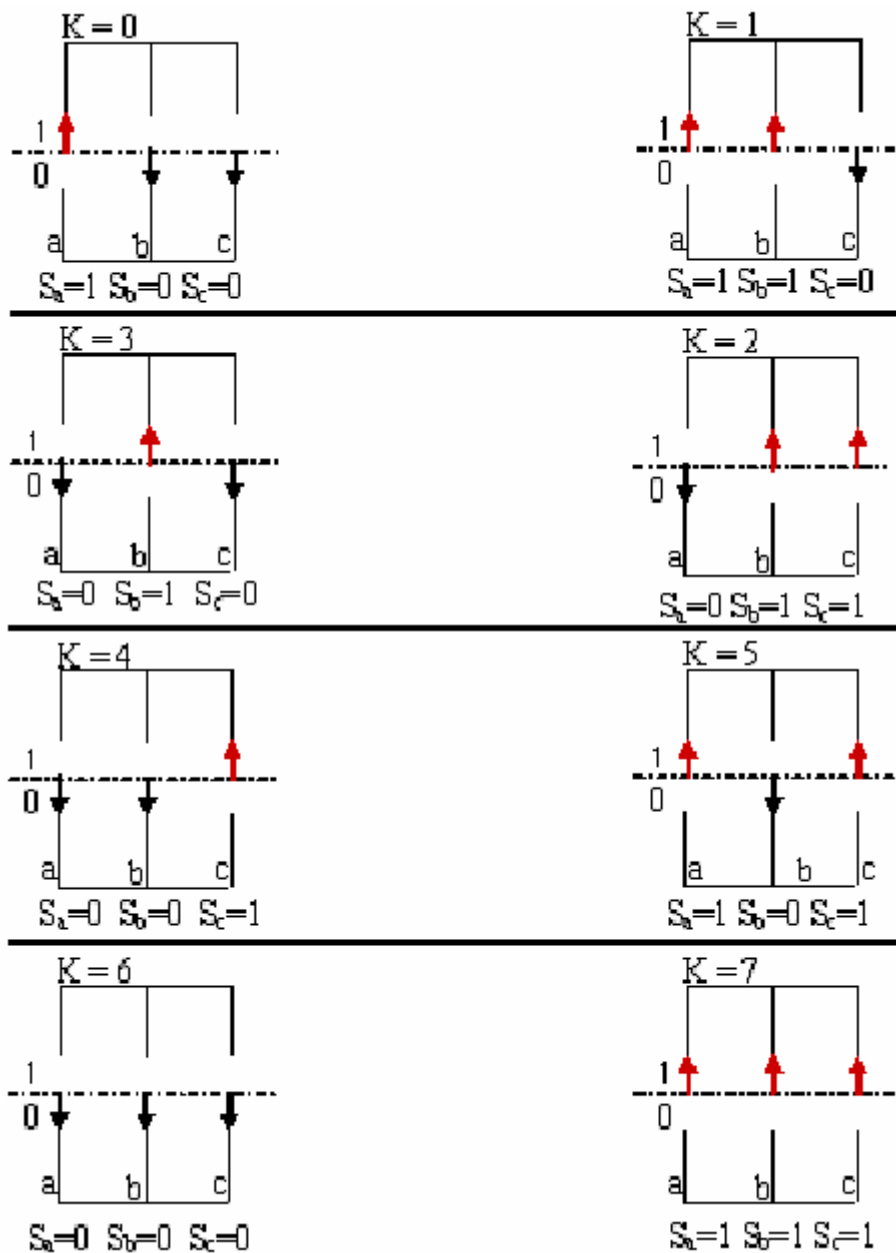


Figure III.26 Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

III.2.5 Hacheur réversible en courant

Dans le cas du Hacheur utilisé par la charge/décharge des batteries le courant électrique doit être réversible. Ainsi pour réaliser le transfert d'énergie dans les deux sens, un hacheur survolteur et un hacheur dévolteur ont été associés [68] comme l'indique la Figure III.27

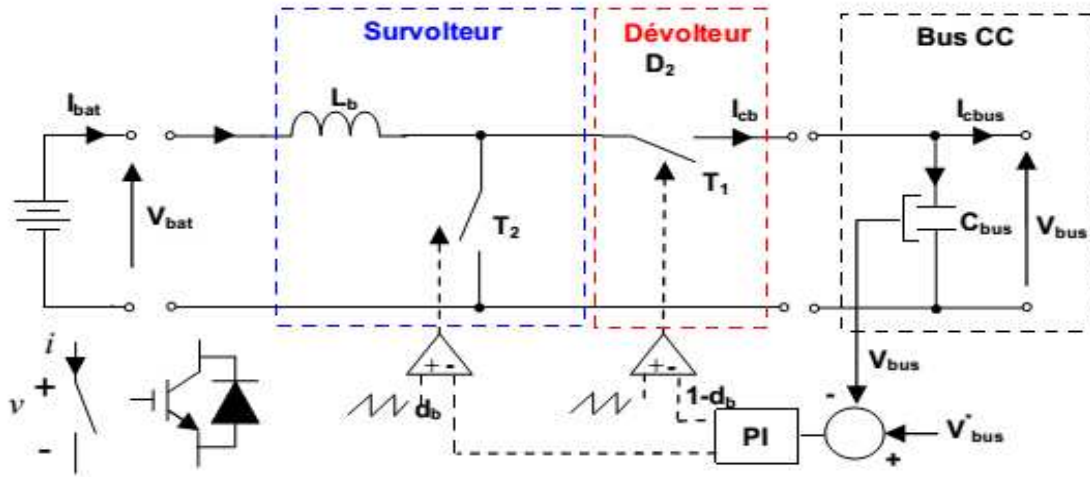


Figure III.27 Hacheur réversible en courant

Les équations différentielles définissant le fonctionnement des deux hacheurs réunis sur la structure présentée dans la Figure III.27 ont été résolues en utilisant un modèle en valeurs moyennes [71]. Sachant que la commande des interrupteurs T1 et T2 est simultanée avec des rapports cycliques d_b et $1-d_b$ complémentaires, le fonctionnement du hacheur réversible en courant est décrit par :

$$\frac{di_{bat}}{dt} = \frac{1}{L_s} (d_b V_{bus} - V_{bat}) \tag{III.37}$$

En appliquant la loi de conservation de la puissance, le courant injecté ou absorbé du bus à CC s'exprime :

$$i_{cb} = d_b i_{bat} \tag{III.38}$$

Le rapport cyclique d_b est obtenu à partir d'un régulateur PI ayant comme entrée l'erreur de tension sur le bus à CC.

III.2.6 Convertisseur multi-niveaux

Durant ces dernières années, on vit la naissance de nouveaux convertisseurs de puissance multi-niveaux qui sont utilisés dans le domaine des entraînements de grande puissance où il trouvent une intégration rapide dans le domaine éolienne.

III.2.6.1 Différents topologie des onduleurs multi-niveaux

Par définition, l'onduleur de tension multi-niveaux possède trois ou plusieurs niveaux ; l'objectif de cette partie est de donner un aperçu général des trois topologies de base des onduleurs multi-niveaux:

- La topologie à diodes de bouclage
- La topologie à condensateur flottant
- La topologie en cascade

III.2.6.1.a) Onduleur de tension a diodes de bouclage

L'onduleur à trois niveaux, se compose en trois bras et deux sources de tension continue chaque bras de l'onduleur est constitué de quatre paires diode-interrupteur bidirectionnel et deux diodes médianes permettent d'avoir le niveau zéro de la tension de sortie de l'onduleur. Le point milieu de chaque bras est relié à une alimentation continue (Figure III.28) donnant une représentation schématique de cet onduleur. L'objectif était de réduire l'amplitude des harmoniques injectés par l'onduleur dans la charge.

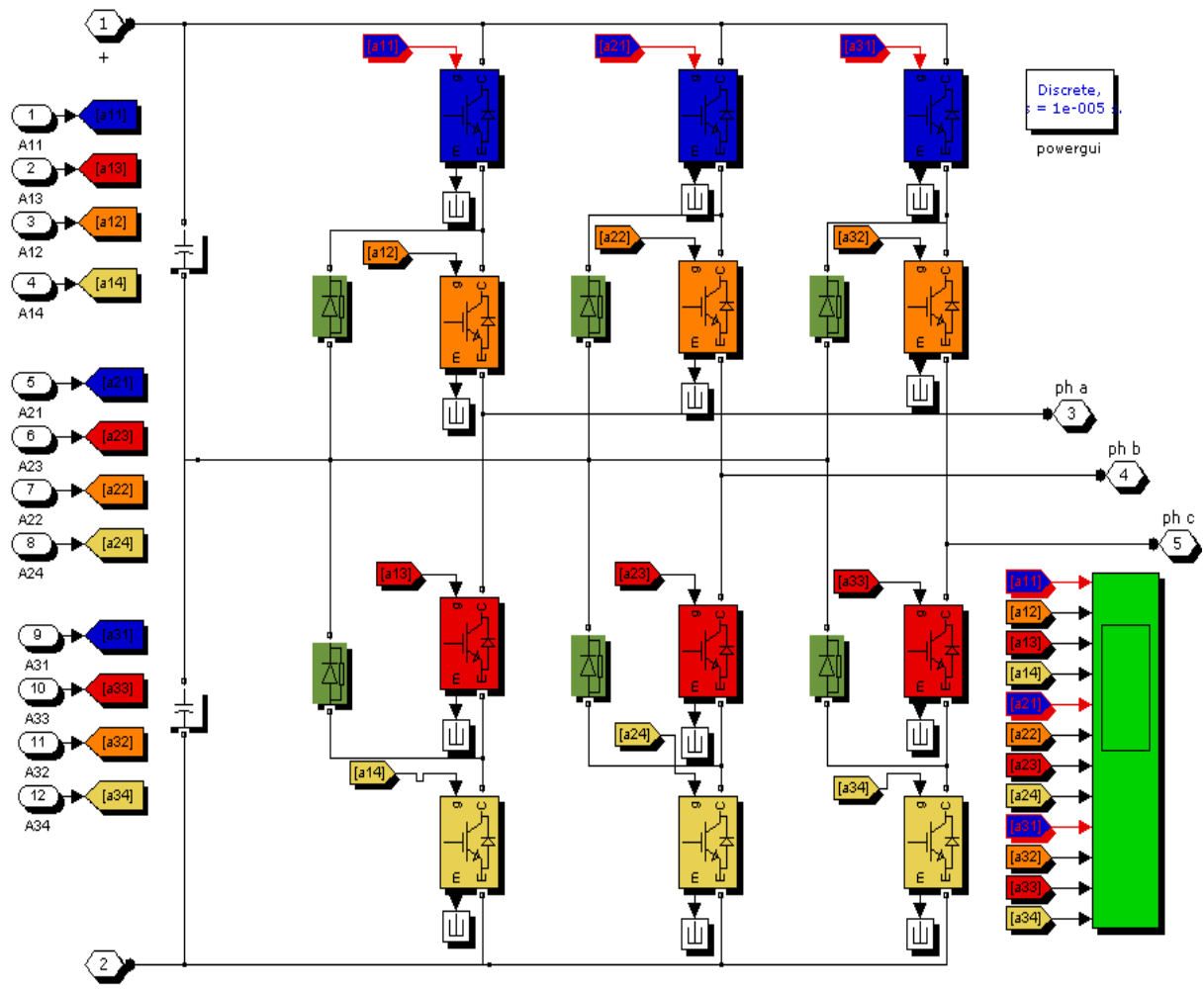


Figure III.28 Topologies d'onduleurs NPC trois niveaux

➤ *Modélisation du fonctionnement d'un bras d'onduleur trois niveaux*

La symétrie de la structure de l'onduleur à trois niveaux permet leur modélisation 'Figure.III.29'.

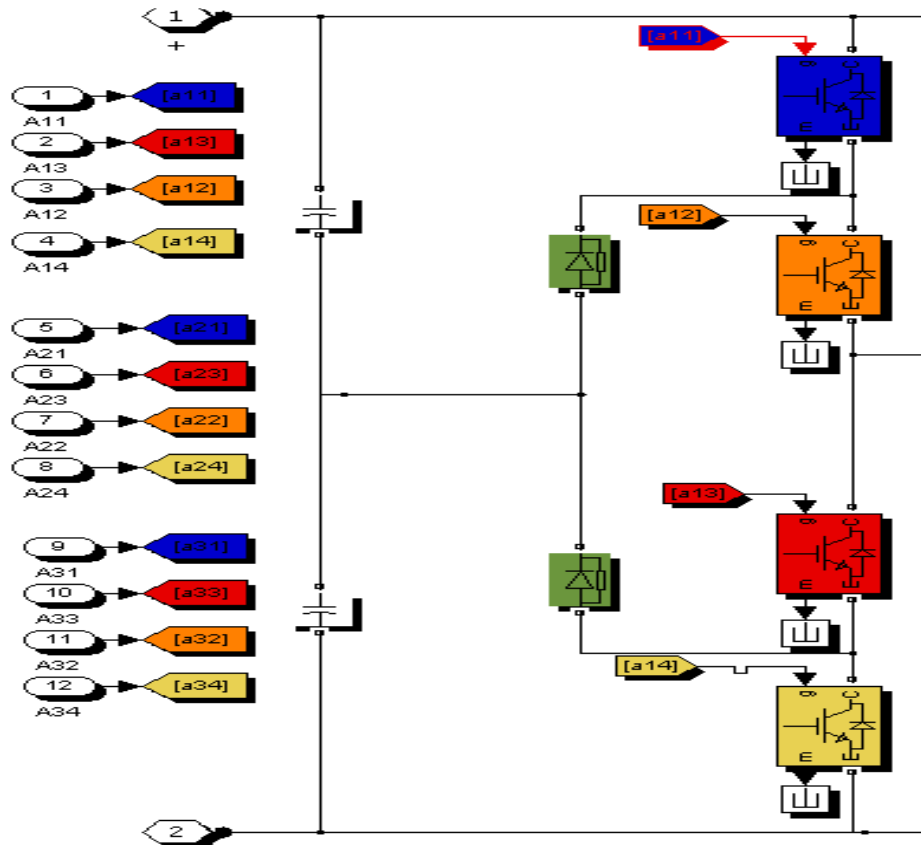


Figure III.29 Structure d'un bras de l'onduleur.

➤ *Commande des convertisseurs statiques :*

Un convertisseur est dit à mode commandé si les transitions entre ses différentes configurations dépendent uniquement de la commande externe et non plus des commandes internes.

➤ *Commande complémentaire*

Pour éviter les courts-circuits des sources de tension par conduction et pour délivrer les trois niveaux de tensions désirées on doit le faire fonctionner en son mode de commande.

Trois commandes complémentaires peuvent être appliquées sur un bras d'onduleur à trois niveaux.

$$\left\{ \begin{array}{l} G_{k3} = \overline{G}_{k1} \\ G_{k4} = \overline{G}_{k2} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} G_{k2} = \overline{G}_{k1} \\ G_{k4} = \overline{G}_{k3} \end{array} \right\}, \left\{ \begin{array}{l} G_{k4} = \overline{G}_{k1} \\ G_{k3} = \overline{G}_{k2} \end{array} \right\} \quad (III.39)$$

Avec : G_{kS} la commande de la gâchette de l'interrupteur T_{kS} du bras k.

Table III.1 Excitation des interrupteurs

G_{k1}	G_{k2}	G_{k3}	G_{k4}	V_{ko}
0	0	1	1	V_{c2}
0	1	0	1	inconnue
1	0	1	0	0
1	1	0	0	V_{c1}

Afin d'avoir la Commande totale de l'onduleur à trois niveaux, on doit éliminer le cas qui donne une réponse inconnue.

En traduisant cette commande complémentaire par les fonctions de connexion des interrupteurs du bras "k" on trouve :

$$\begin{cases} F_{k1} = 1 - F_{k4} \\ F_{k2} = 1 - F_{k3} \end{cases} \tag{III.40}$$

On définit la fonction de connexion des demi-bras notée F_{km}^b avec :

$$m = \begin{cases} 1 & \text{pour le demi-bras du haut constitué de } TD_{k1} \text{ et } TD_{k2} \\ 0 & \text{pour le demi-bras du bas constitué de } TD_{k3} \text{ et } TD_{k4} \end{cases}$$

Les fonctions de connexion des demi-bras s'expriment au moyen des fonctions de connexion des interrupteurs comme suit :

$$\begin{cases} F_{k1}^b = F_{k1} F_{k2} \\ F_{k0}^b = F_{k3} F_{k4} \end{cases} \tag{III.41}$$

III.3 Conclusion

La définition des principes de fonctionnement et la modélisation des sources d'énergie sont nécessaires pour évaluer le comportement d'un système hybride électrique. C'est pourquoi dans ce chapitre nous avons présenté les trois sources d'énergie électrique les plus utilisées dans la réalisation de source hybride électrique ; ces sources sont : les générateurs éoliens, le groupe électrogène et les batteries électrochimiques. Nous pouvons utiliser comme sources principales les systèmes éoliens grâce à leurs énergies spécifiques élevées. Ces sources

permettent de fournir de l'énergie électrique sans aucune pollution localisée mais leurs coûts sont élevés par rapport aux sources d'énergie conventionnelles. Les générateurs éoliens présentent l'avantage de produire de l'énergie électrique à partir de ressources naturelles gratuites (vent). Les batteries électrochimiques peuvent être utilisés comme sources auxiliaires dédiées au stockage de l'énergie afin d'améliorer le comportement des systèmes hybrides électriques en régime transitoire.

Dans ce chapitre, on a passé en revue la machine synchrone et la modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion tels que la machine synchrone à aimants permanents, les convertisseurs statiques (onduleur et redresseur) et la commande M.L.I.

Le chapitre suivant est consacré à la simulation utilisant le logiciel Simulink/Matlab des différentes parties de la chaîne de conversion et le système global.

Chapitre IV : Application au système Hybride Eolien- Diesel

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente d'une part la structure de commande globale du système hybride dans le mode de connexion autonome. D'autre part, la méthode proposée pour la gestion de la répartition des puissances entre les sources et les charges dans un système hybride, l'aspect technique des technologies, les critères nécessaires qu'il faut respecter lors de la gestion des échanges énergétiques dans le système hybride sont exposés.

Le système SEH c'est une solution complètement innovatrice qui va pouvoir profiter du potentiel éolien disponible dans les sites isolés et alimentés par les diesels. L'idée consiste à jumeler ces diesels déjà sur place avec une centrale éolienne surdimensionnée par rapport aux besoins et un système de stockage [70]. Le principe du fonctionnement de ce système hybride dont les avantages techniques et économiques ayant une efficacité énergétique spécifiquement au niveau de l'augmentation du rendement du groupe diesel et la diminution de sa consommation en carburant seront étudiés en détail et feront l'objet principal de ce mémoire. La stratégie de gestion proposée ici est basée sur des concepts énergétiques à travers l'automatisation c'est-à-dire comment câbler le système avec des automates de telle sorte que le démarrage et l'arrêt des groupes se fassent sans l'intervention de l'homme quand on a un besoin énergétique et de garantir une meilleure utilisation de l'ensemble des groupes.

IV.2 Contrôle et gestion de l'énergie du système hybride

La gestion d'énergies décrit le processus de gestion à la fois la production et la consommation d'énergie. Le but de la gestion de l'énergie est de fournir l'énergie fiable et de qualité pour les consommateurs. Dans cette étude, la stratégie de contrôle intègre un système contrôlant la gestion de l'énergie appliquée du côté de la production ; les principales fonctions du système de contrôle assurent les opérations de fonctionnement du système lors de divers événements. En outre, il est capable de planifier et de gérer les ressources énergétiques et de leurs conversions pour fournir l'énergie aux consommateurs. En fait, la gestion de l'énergie proposée nous assure les principaux résultats de la stratégie de contrôle [58].

La stratégie de gestion de l'énergie utilisée dans cette étude est conforme à l'organigramme représenté sur la Figure IV.1 ce qui permet au système de supervision de décider combien et quelles sources il faut mettre en marche et comment utiliser le stockage si c'est disponible [54], [55].

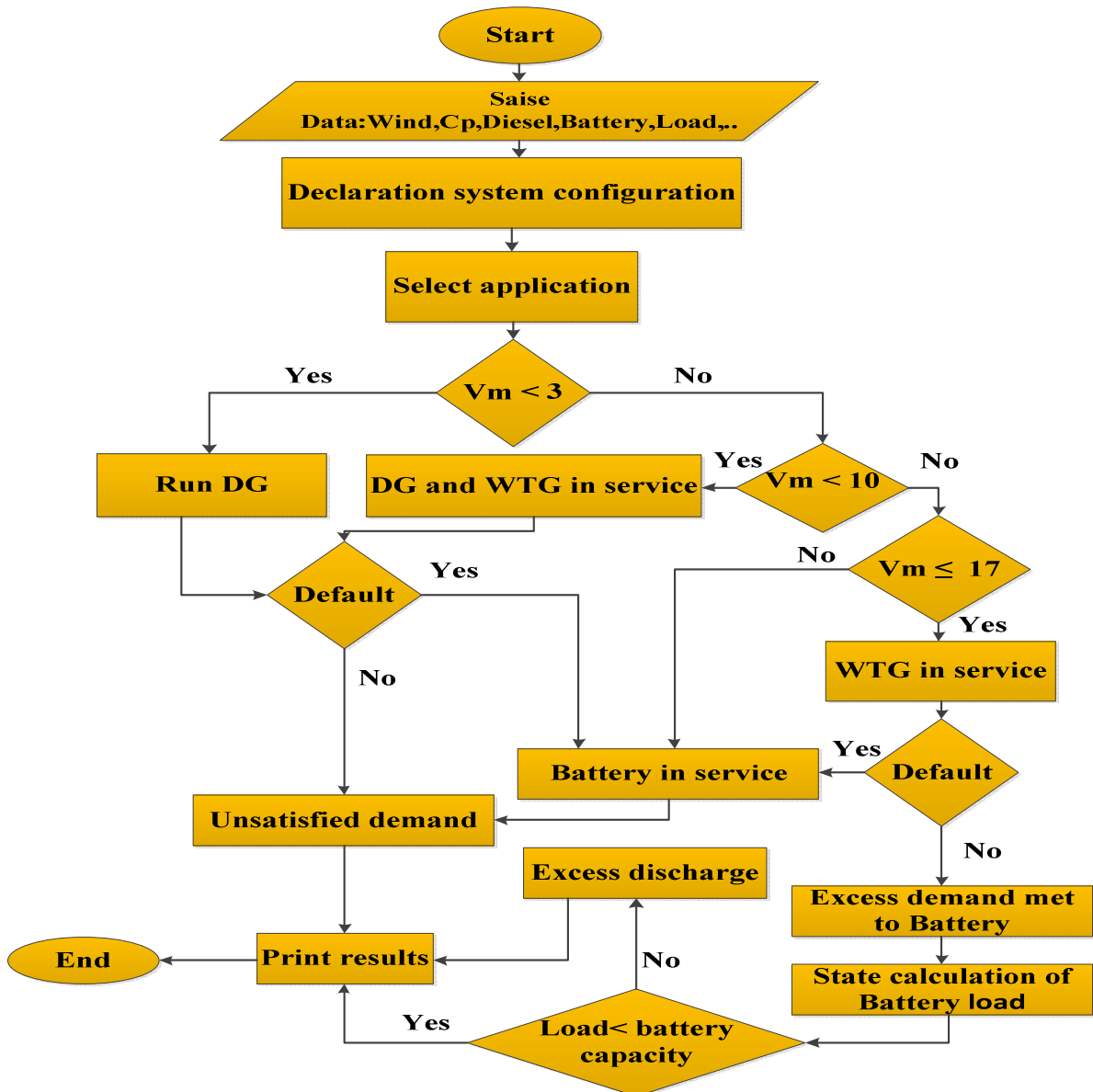


Figure IV.1 Organigramme de simulation et de gestion.

Le système global montré dans la Figure IV.2 est implanté dans Matlab/Simulink. Les éléments du SHED sont utilisés par module. Une charge non linéaire représente la puissance demandée par les consommateurs.

La connexion de ces éléments est réalisée au niveau d'un bus de tension continue. Ce bus présente l'avantage d'interconnecter plus aisément les différents éléments du système hybride et le générateur diesel peut être dimensionné de façon optimale c'est-à-dire de sorte à fonctionner à puissance nominale pendant le processus de chargement des batteries jusqu'à un état de charge de 75 à 85%.

À partir du bus continu on réalise la connexion au réseau grâce à un convertisseur de puissance continu/alternatif qui adapte ensuite la tension et la fréquence avant de les transformer en énergie à courant alternatif qui seront transmis aux charges. A l'aide du logiciel

de simulation Matlab-*Simulink* on transforme les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc.

Le choix de la taille (puissance) et le type des éléments est une étape très importante dans le but de garantir l'énergie nécessaire au site, tout en assurant une autonomie énergétique et selon les énergies renouvelables disponibles [25]. L'électricité provenant de ces sources est intermittente, dépendante des conditions climatiques.

✓ **Aspects techniques des technologies :**

- Le niveau de commercialisation
- L'efficacité
- La durée de vie
- La précision
- La disponibilité des ressources correspondantes

Notre système de production appelé système hybride présente en somme le double avantage de minimiser les perturbations de l'environnement grâce à une consommation sur le lieu de production de ressources naturelles renouvelables.

Les éléments sélectionnés pour notre installation (éolien-groupe diesel-batterie) sont :

- Un générateur éolien GSAP(WTG).
- Un générateur Diesel (GD).
- Un système de stockage d'énergie par Batterie (BESS).

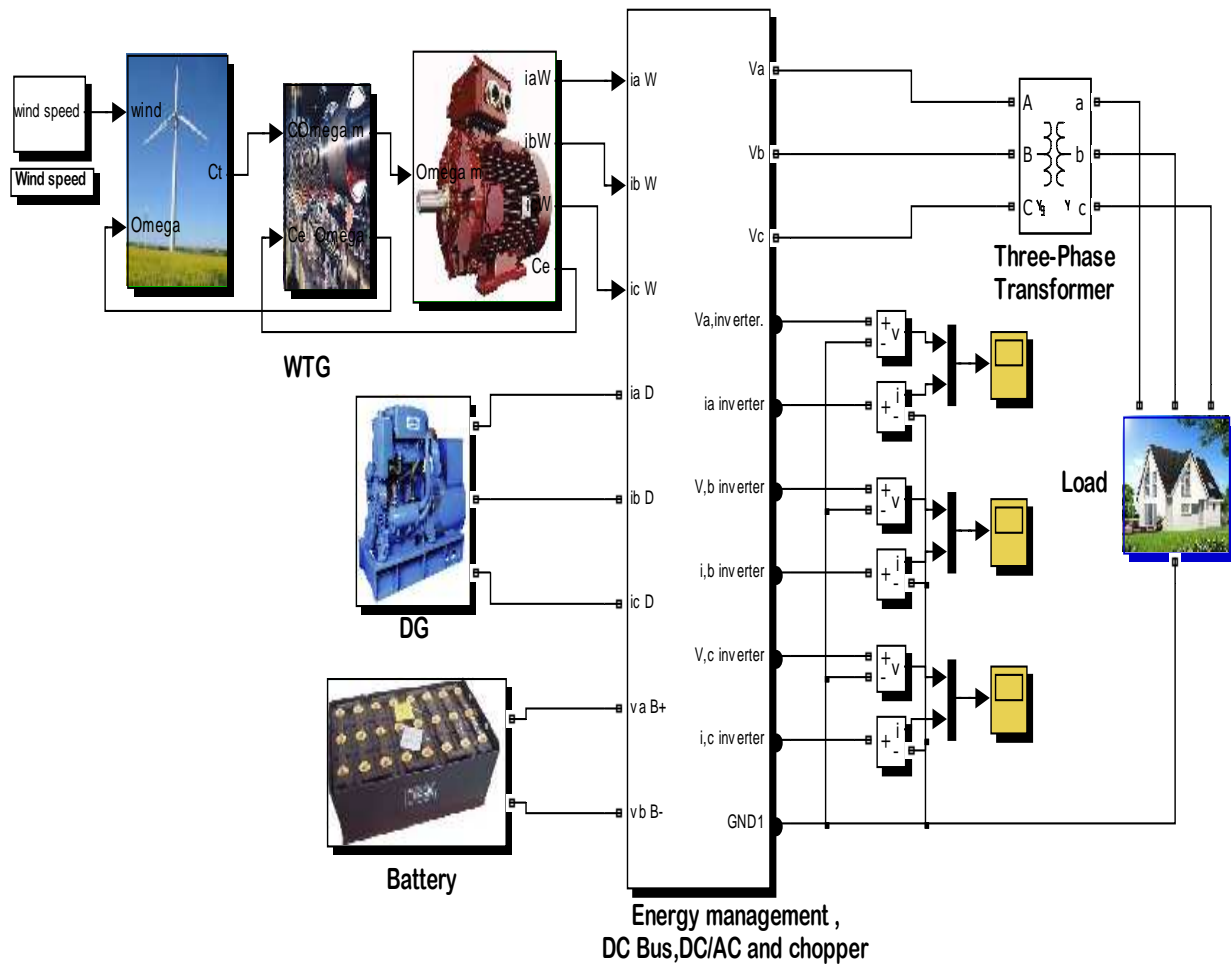


Figure IV.2 Schéma global du système.

IV.2.1 L'éolienne

La turbine éolienne ayant une caractéristique qui lui est propre et qui dépend des paramètres de construction définissant son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement. La turbine choisie est de la marque Wind World A/S W2080 / 120 kW, c'est une turbine à axe horizontal de puissance nominale 120kW, à trois pales, le rotor fonctionne dans la direction du vent, elle dispose de caractéristiques très avancées en matière de sécurité (système de freinage en cas d'urgence ou pour l'entretien), Wind World A/S W2080 / 120 kW peut développer de l'énergie même à très bas régime du vent (3 m/s).



Figure IV.3 Wind World A/S W2080 / 120 kW

L'éolienne Wind World A/S W2080 / 120 kW considérée par des données présentées dans le tableau IV.1 (Annexe A).

Table IV.1 Caractéristiques techniques de Wind World A/S W2080 / 120 kW

	Wind World A/S W2080 / 120 kW
-Nombre d'éolienne	1
-Puissance nominal de l'éolienne	120 kW
-Boite de vitesse	1 :23
-Hauteur de la tour	24m
-Nombre de pales	3
-Poids	25,6 T
-Nacelle	3,1 T
-Rotor	2,6 T
-Tour	7,5 T
-Diamètre	20.8 m

La puissance nominale de cette étude est la puissance pour un vent déterminé, appelé vent nominal. Au-delà de cette vitesse du vent, la puissance est maintenue constante grâce au dispositif de régulation l'asservissement de vitesse (voir figure IV.4).

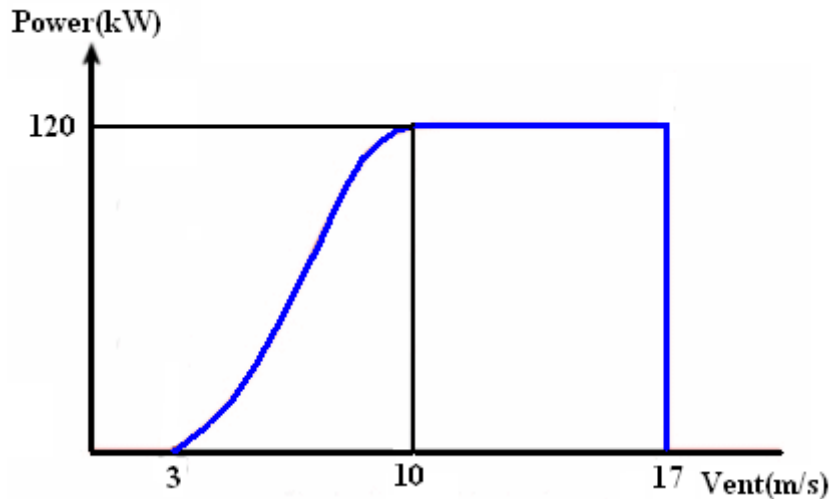


Figure IV.4 Courbe de puissance relative en fonction de vitesse du vent

IV.2.2 Le générateur diesel

La puissance générée par le groupe électrogène est faible par rapport au réseau classique. Cela signifie qu'il sera influencé par la charge supportée, ce qui entraîne des fluctuations dans la fréquence et la tension. La variation dans la charge est donc un paramètre important à étudier avant d'entamer la tâche de dimensionnement de système. Le groupe électrogène est généralement dimensionné pour une charge finale connectée prévue [51]. Il est essentiel que les règles de sécurité doivent être respectées afin d'assurer la protection des personnes et des biens. Une installation du groupe électrogène peut provoquer des situations dangereuses car le court-circuit dans un alternateur est plus grand que le courant nominal ; il est souhaitable de placer la génératrice près de la charge pour éviter de longs câbles [6]. Le dimensionnement du générateur diesel doit tenir compte de l'influence sur l'environnement. Tous les impacts doivent être étudiés et tout genre de pollution doit être réduit au minimum pour préserver l'environnement. Les impacts qui traduisent un fonctionnement du groupe diesel sont : les émissions de gaz à effet de serre, les vibrations, le bruit et les perturbations sur le réseau électrique dans le cas de connexion avec ce dernier [51] [6].

En vue du caractère non régulier des ressources renouvelables, un générateur diesel est nécessaire comme un système d'appoint. Le générateur choisi est de types (groupe électrogène de 150kVA/120kW volvo.diesel) du constructeur Volvo Engine Cie, Ltd. (Annexe B) il génère une puissance maximale de 120kW.

Table IV.2 Paramètres du groupe traditionnel

Carburant	Diesel
- Cylindre Agencement	6 dans ligne
- Déplacement	7.15L
- Air Prise Système	Turbo
- Évalué Alimentation électrique	140kW
- Maximum. En attente Alimentation électrique	153kW
- Échappement gaz flux	26.7m ³ /min [943cfm]
- Échappement la température	476° C [889° F]
- 110% (attente Alimentation électrique)	33.3 l/h
- 100% (de Perfection Alimentation électrique)	30.2 l/h
- 75% (de Perfection Alimentation électrique)	22.6 l/h
- Total Carburant Flux	360 l/h
- Pétrole Consommation	0.10 l/h
- Engine Pétrole Bidon Capacité	17 l

IV.2.3 Batterie

Il est possible d'assurer la fourniture de toute l'énergie nécessaire au site directement par les trois générateurs cependant dans le but de minimiser le fonctionnement du générateur diesel et par suite les émissions des gaz ; il est judicieux de rajouter un système de stockage d'énergie. Les caractéristiques de la batterie (Ni-Cd) sont données dans le tableau IV.3.

Table IV.3 Caractéristiques de la Batterie

Spécifications	Valeurs (unités)
Durée de vie nominale	10 (ans)
Etat de charge minimale	50 (%)
Capacité nominale	410.16 (Ah)
Tension nominale	214.2311(V)

IV.3 Données météorologiques (région d'Adrar)

Afin de mettre en évidence la performance de l'algorithme de gestion appliquée sur le système SEH dans cette étude, nous cherchons à mettre en évidence l'importance du vent dans le fonctionnement du Système d'Énergie Hybride(WDHS) pour voir son rôle dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre et le réchauffement climatique caractérisant l'effet économique. Grâce à la réduction du taux de consommation du carburant et son prix ce qui

justifie la raison de la thèse étudiée. Dans cette étude nous avons étudié la comparaison entre deux mois de la même région, le premier mois est caractérisé par un taux ventilation élevé (Mai) et le deuxième mois par une ventilation faible (Octobre).

La Figure IV.5 représente la vitesse du vent réel mesurée dans la wilaya d'Adrar pour une année selon le tableau I.2 du chapitre I.

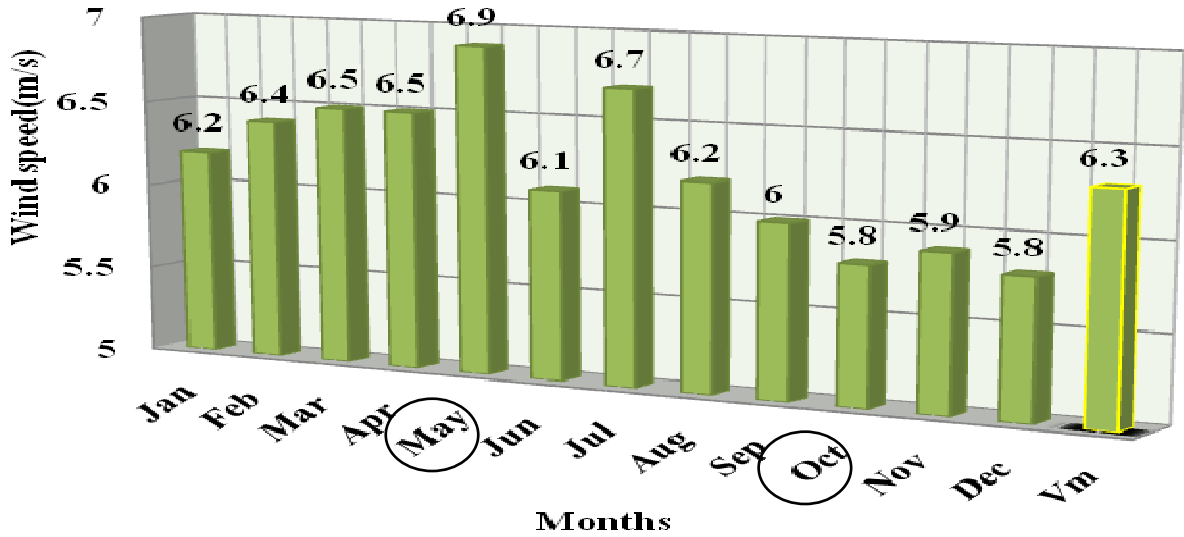


Figure IV.5 La vitesse du vent moyenne annuelle pour le site étudié (Adrar).

Les Figures données ci-dessous représentent la vitesse du vent journalière réelle pour les mois de Mai et d'octobre respectivement de la wilaya d'Adrar (Figure IV.6 et Figure IV.7).

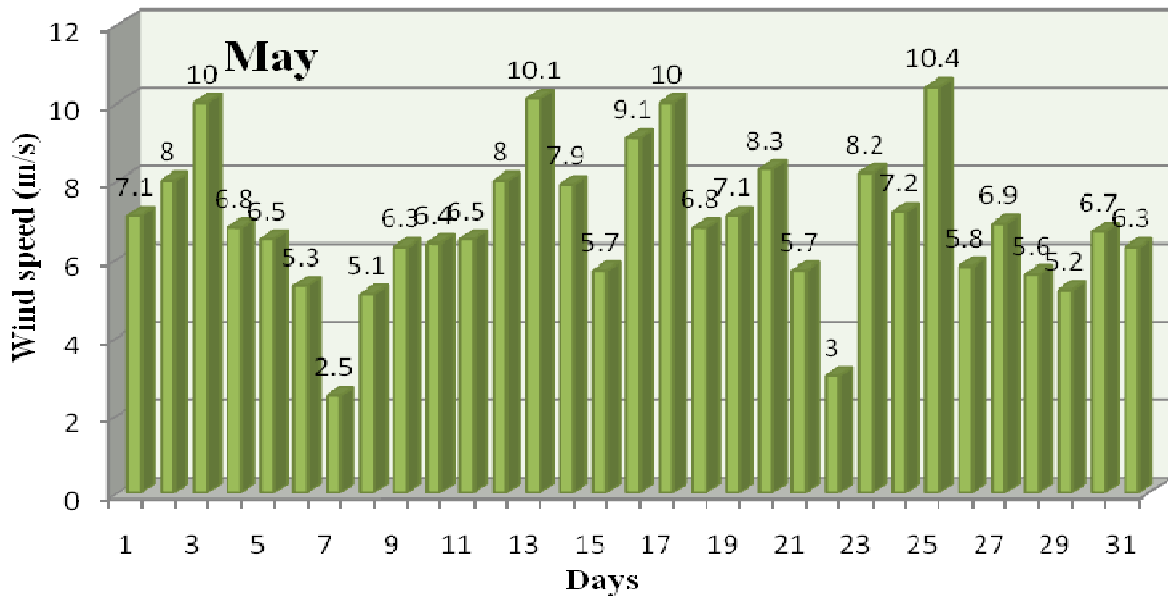


Figure IV.6 La vitesse du vent moyen journalier au mois Mai.

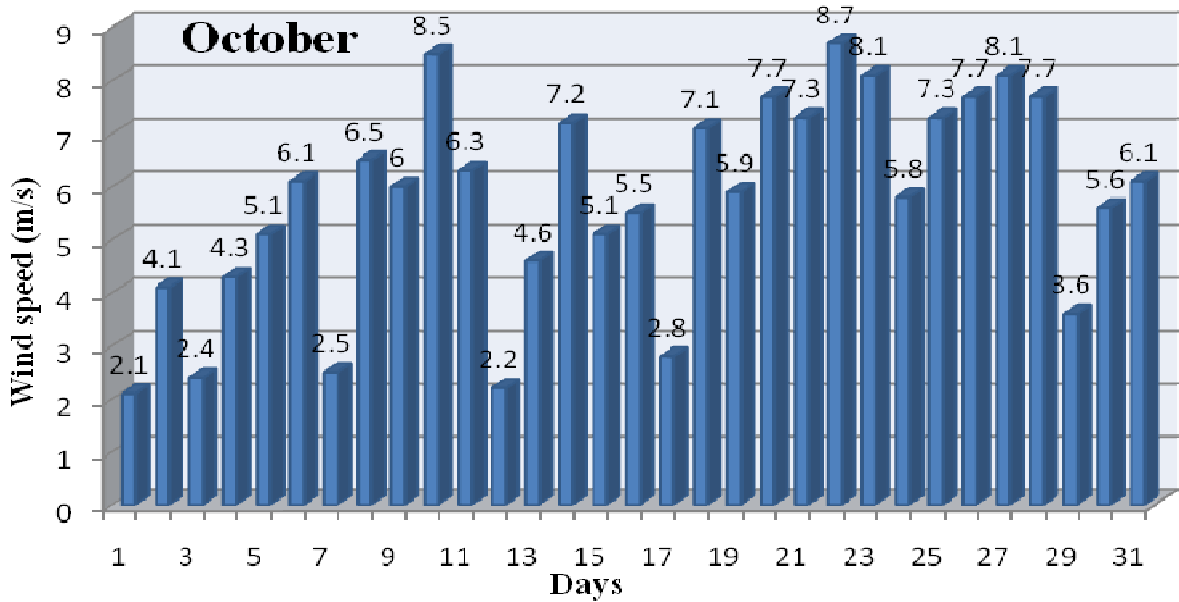


Figure IV.7 La vitesse du vent moyen journalier au mois d’octobre.

IV.4 Courbe de charge du site étudié

Le dimensionnement d’un tel système de production de l’énergie dépend essentiellement du profil de la consommation à satisfaire. La figure IV.8 représente un profil de l’évolution journalière de la charge ; ce profil est considéré le même durant tous les jours de l’année.

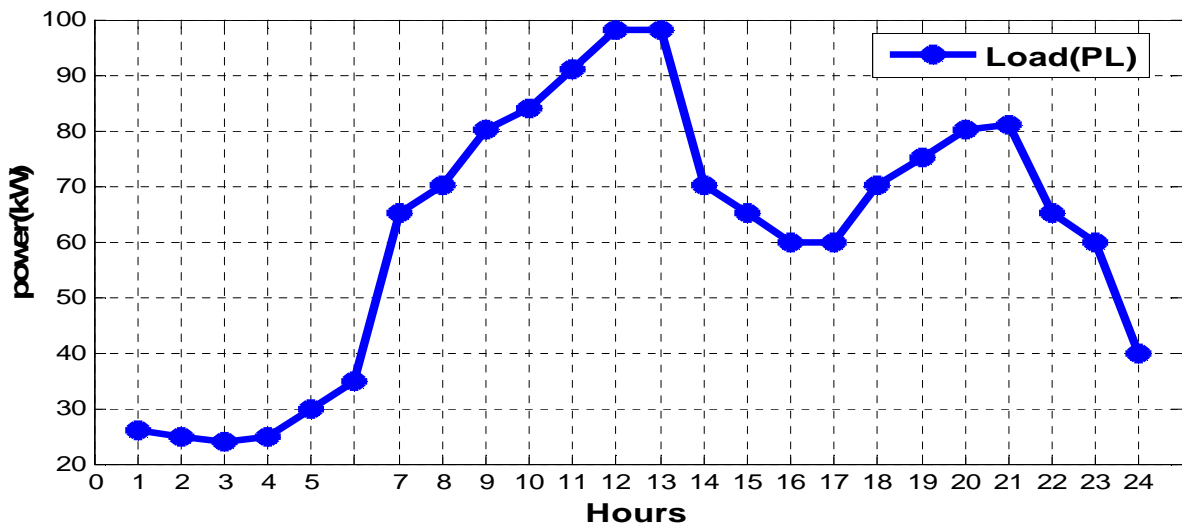


Figure IV.8 Répartition journalière de la charge électrique.

La demande de charge électrique est un élément important d’un WDHS et toute autre puissance génératrice du système. Le procédé de consommation quotidien est supposé suivre le système avec le même profil pour chaque année avec une charge de pointe de 99 kW cela est présenté sur la figure IV.8 ; cela montre que la consommation est importante dans la journée (99kW à 12h et à 13h) et par contre négligeable dans la nuit (25kW à 3h). La charge est maximale pendant les heures de pointe (12h et 13h) suivant la Figure IV.8.

IV.5 Bilan énergétique du système éolien-diesel

Cette Figure représente la puissance journalière produite par le système (WDHS) selon la vitesse du vent pour les deux mois ; Mai et Octobre (voir Figure IV.9 et Figure IV.10).

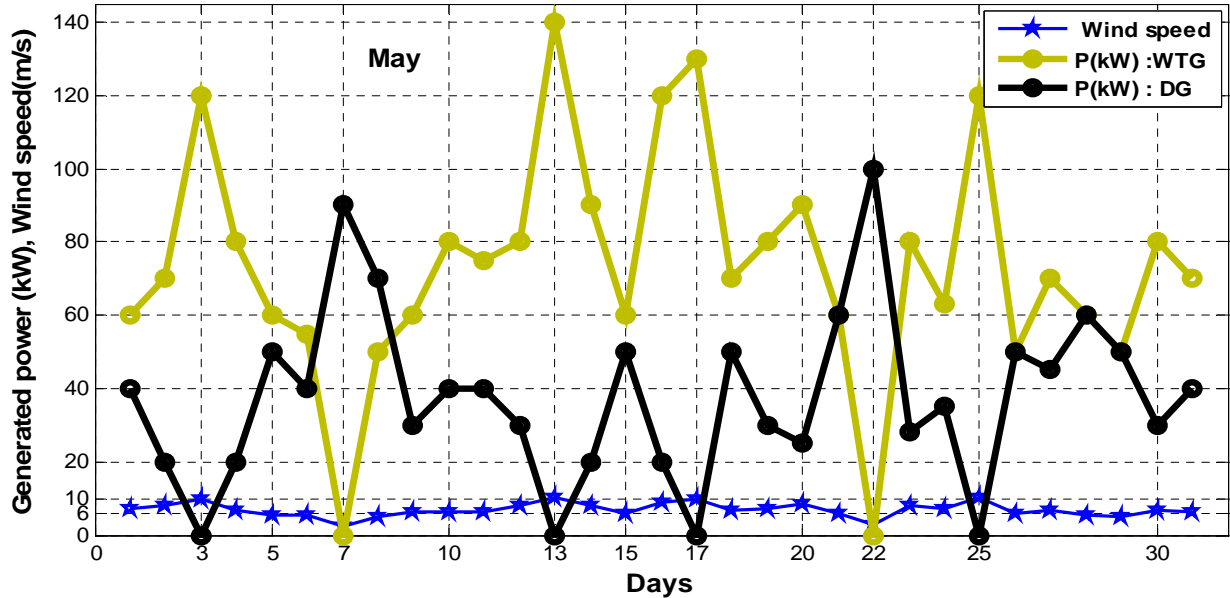


Figure IV.9 Puissance journalière produite par WDHS au mois de Mai.

D’après la Figure IV.9, on remarque que pendant les jours (3^{ème}, 13^{ème}, 17^{ème}, 25^{ème}) la puissance des consommateurs (P_L) sont alimentés par la puissance électrique générée par l’éolien (WO) à cause de l’excellente vitesse du vent dépassant ($V_m \geq 10m/s$) où pendant ces jours le DG est au repos ; tandis que le surplus de la puissance électrique est stocké dans les batteries pour qu’il soit consommé ultérieurement selon la stratégie de l’énergie proposée dans Figure IV.1 ; par contre pour les jours et particulièrement (7^{ème}, 22^{ème}) du même mois les consommateurs sont alimentés par le groupe diesel (DO) à cause de la faiblesse du taux du vent ($V_m \leq 3m/s$).

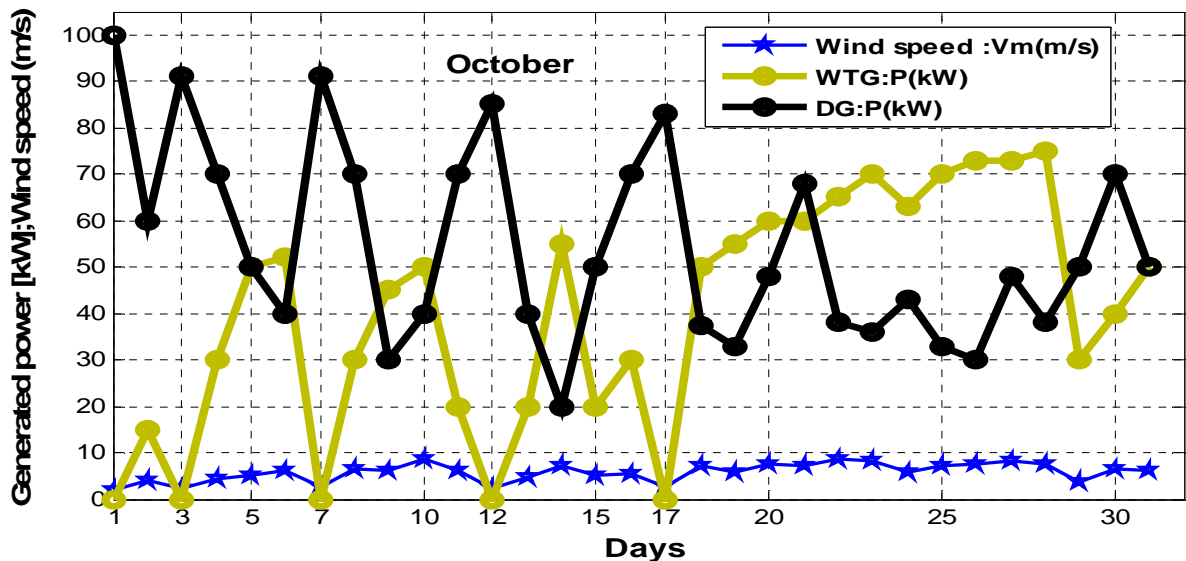


Figure IV.10 Puissance journalière produite par WDHS au mois d’octobre.

Nous remarquons dans Figure IV.10 que l'approvisionnement de la charge (P_L) est généralement fournie par le générateur diesel seulement (DO) où celui-ci travaille tout le mois. Nous observons aussi que le vent a cessé de fonctionner pendant cinq jours pendant les mois d'Octobre et en particulier (1^{er}, 3^{ème}, 7^{ème}, 12^{ème}, 17^{ème}). D'un autre côté au mois de Mai il s'est arrêté pendant deux jours (7^{ème}, 22^{ème}) tandis que les autres jours nous avons l'hybridation (WD).

IV.6 Analyse écologique du système hybride

La figure ci-dessous représente la relation entre la consommation journalière de carburant en fonction de la puissance générée par le générateur diesel pendant les mois de Mai et Octobre respectivement (voir Figure IV.11).

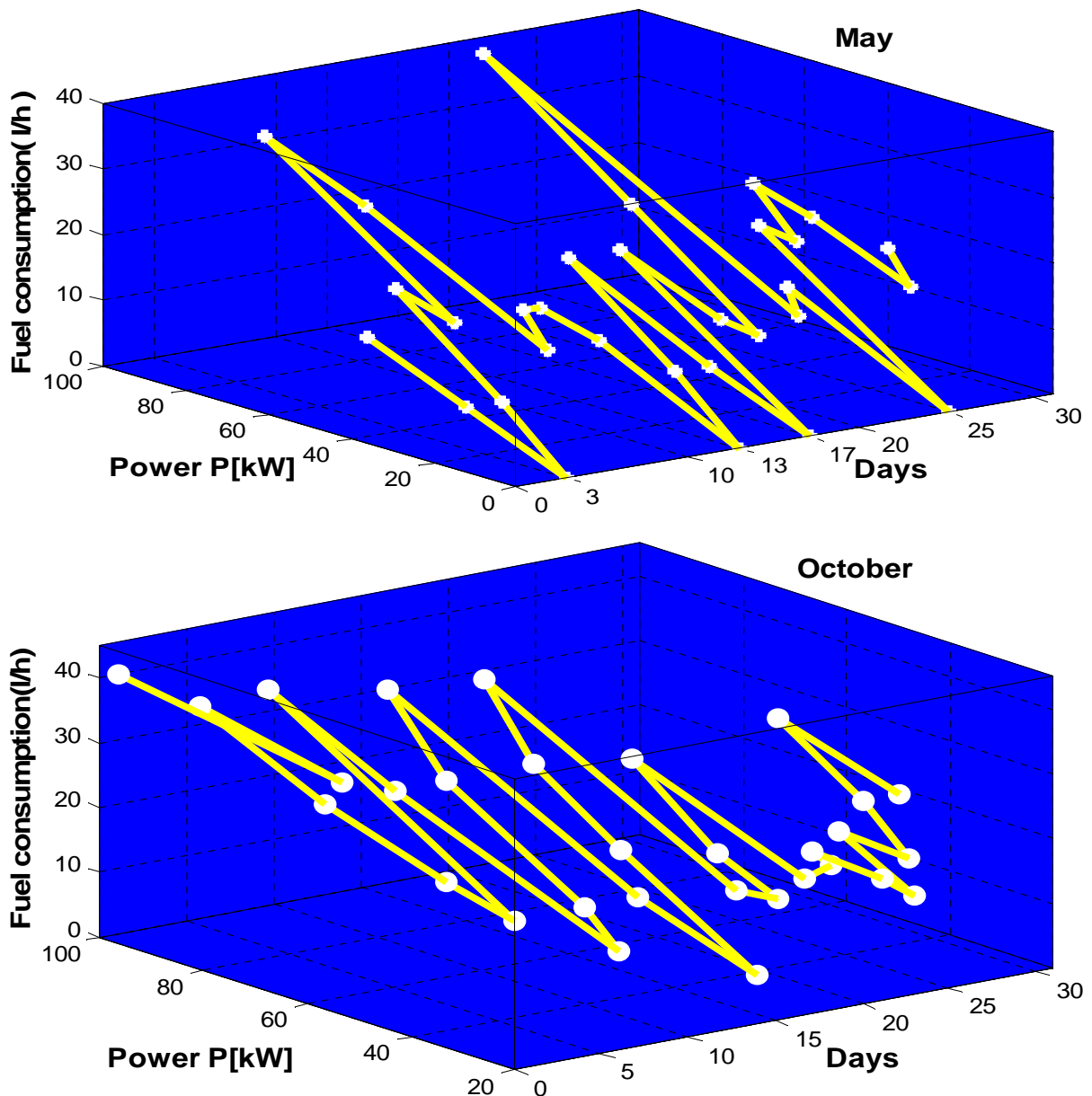


Figure IV.11 La consommation de carburant en fonction de la puissance générée par DG.

Selon Figure IV.11 la quantité de la consommation de carburant est nulle pendant la journée (3^{ème}, 13^{ème}, 17^{ème}, 25^{ème}) parce que la vitesse du vent est suffisante. Sur un autre côté pour les jours (7^{ème}, 22^{ème}), la consommation de carburant atteint un niveau maximale car le site est trop venteux pendant ce temps.

La figure suivante présente la quantité de carburant économisé pendant deux mois (voir Figure IV.12) .Sachant que la consommation de carburant est plus élevée en octobre qu'en mai.

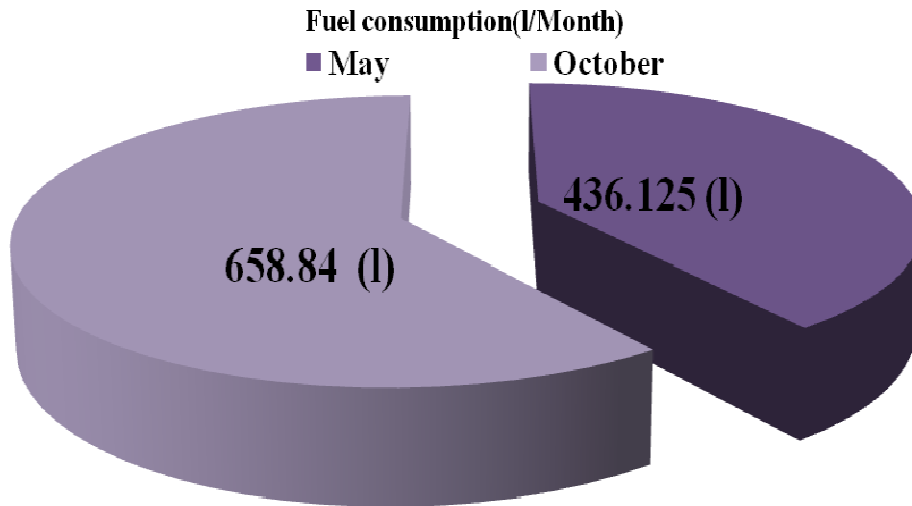
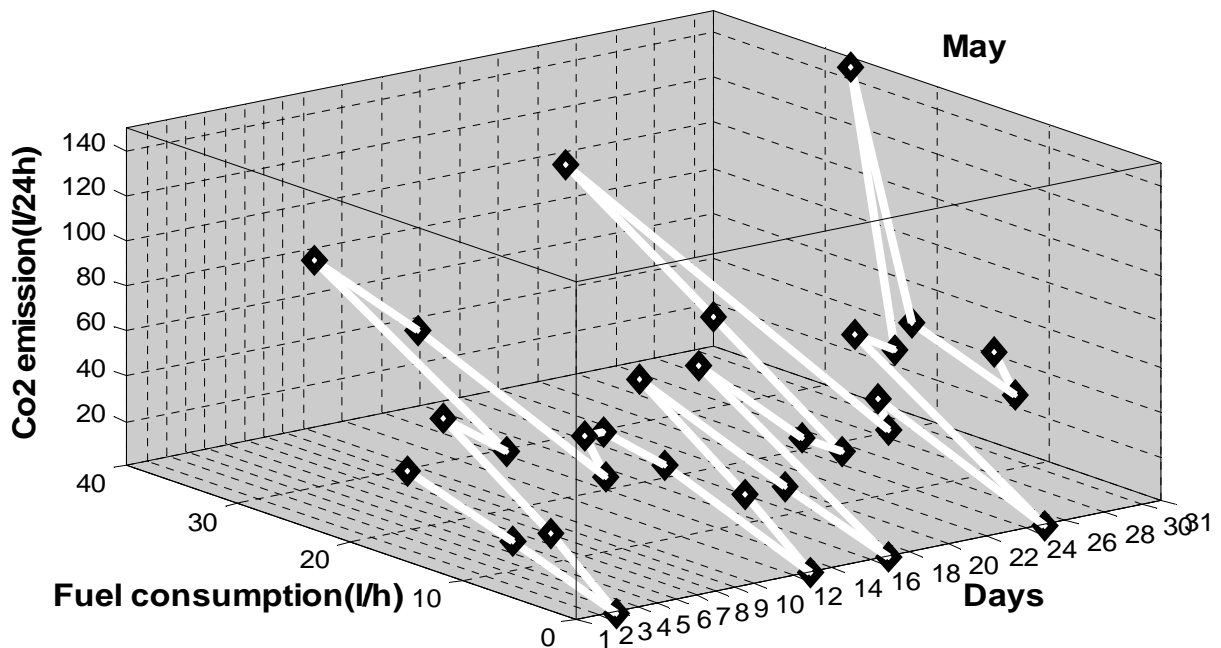


Figure IV.12 Gain du carburant sauvé.

La figure IV.13 montre l'effet de la consommation de carburant générée par groupe diesel sur les émissions de CO₂.



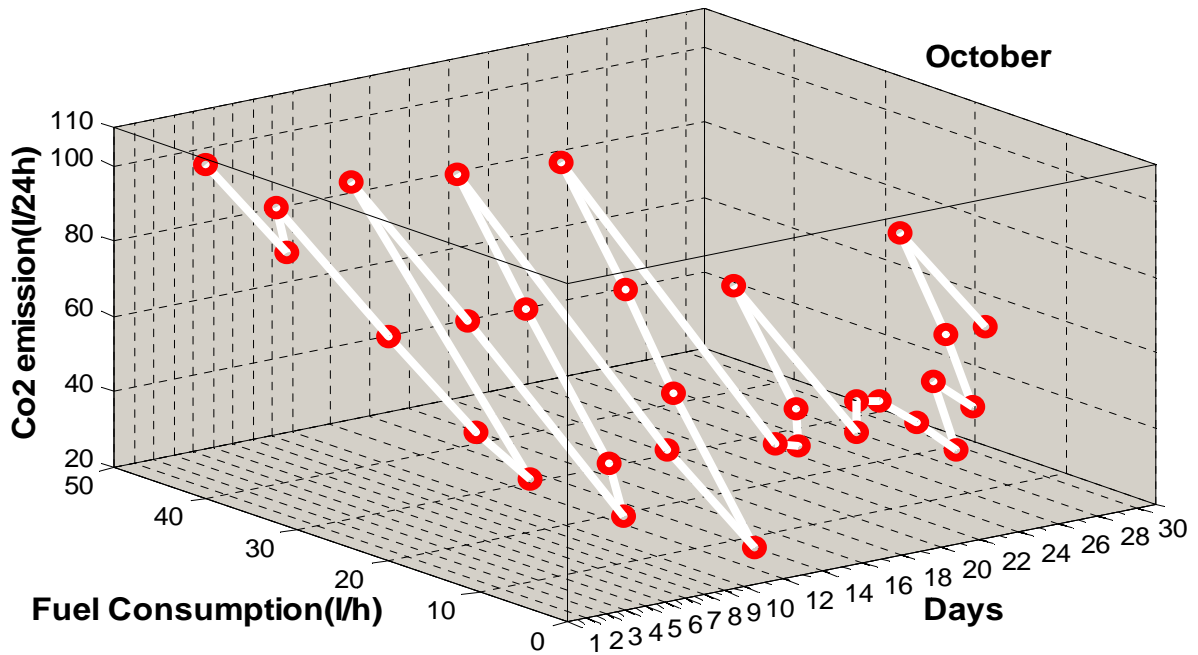


Figure IV.13 Emission de CO₂ en fonction de la consommation de carburant.

IV.7 Analyse technico-économique du système étudié

L’histogramme de la Figure IV.14 nous donne une idée générale sur le coût total du kWh fourni par le système SWDH pendant un mois. Sachant qu’au mois de Mai l’énergie fournie par l’éolienne est plus élevée que celle du diesel ce qui correspondant aux coûts de 13918 (DA/mois) pour l’éolienne et 7131 (DA/ mois) pour le diesel ceci aura une influence directe sur le taux d’émission CO₂ et le changement climatique.

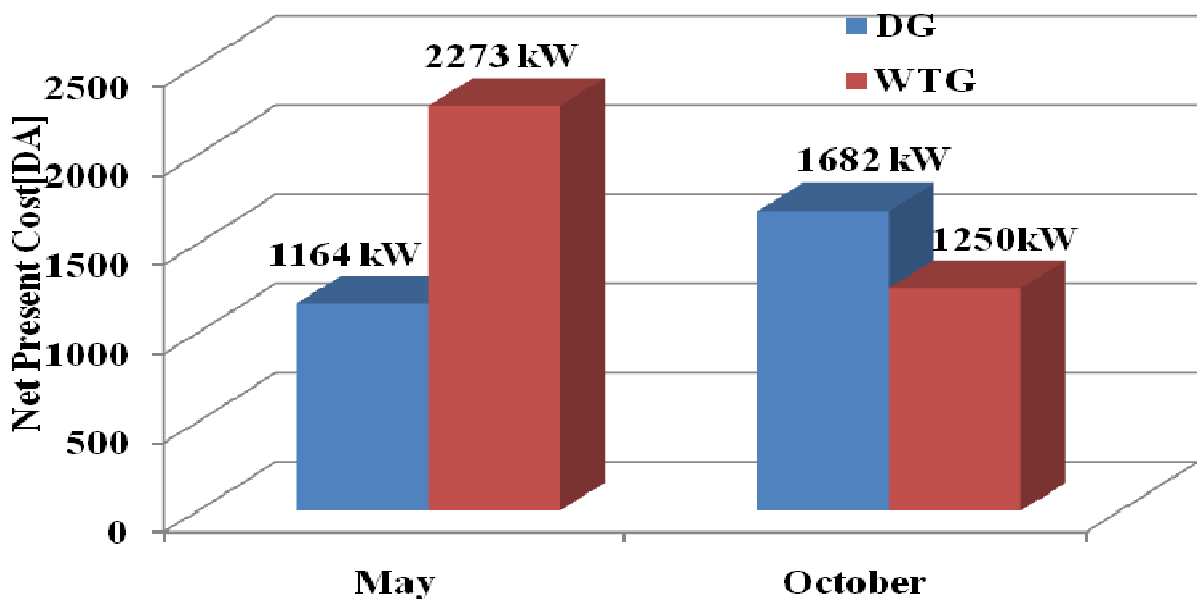


Figure IV.14 Gain technico-économique du système étudié.

Le générateur diesel présente le coût le plus élevé (deux fois plus que le générateur éolien) au mois de Mai cela est dû au nombre de l’intermittence (marche/arrêt) de chacun.

IV.8 Comparaison entre les deux systèmes : éolien et diesel

Après l'analyse des résultats des deux configurations, il est certain que le système hybride présente un choix stratégique justifié sur les deux plans : économique et environnemental.

Sur le tableau ci dessous nous donnons le résumé des calculs journaliers des coûts économiques générés par le système étudié sachant que le prix moyen de consommation de l'énergie électrique est de 6.123 (DA/ kWh) selon la source des relevés de la Sonelgaz « Société Algérienne de Gestion du Réseau de Transport de L'électricité ».

Table IV.4 Résumé des calculs journaliers des coûts économiques générés par le système étudié

Jours	Prix d'énergie DG (6.123DA/kWh)		Consommation du carburant (l/24h)		Prix unitaire du carburant (14.2DA/l)		Emission CO ₂ (2.71kg/l)		Prix d'énergie WTG (6.123DA/kWh)	
	Mai	Octobre	Mai	Octobre	Mai	Octobre	Mai	Octobre	Mai	Octobre
1	244.92	612.3	15	40.1	213	569.42	40.65	108.671	367.38	0
2	122.46	367.38	7.5	33.2	106.5	471.44	20.325	89.972	428.61	91.845
3	0	557.193	0	36.5	0	518.3	0	98.102	734.76	0
4	122.46	428.61	7.5	26.25	106.5	372.75	20.325	71.137	489.84	183.69
5	306.15	306.15	18.75	18.75	266.25	266.25	50.812	50.81	367.83	306.15
6	244.92	244.93	15	15	213	213	40.64	40.64	336.765	318.39
7	551.07	557.193	33.75	37	479.25	525.4	91.462	100.27	0	0
8	428.61	428.61	26.25	26.25	372.75	372.75	71.137	71.137	306.15	183.69
9	183.69	183.69	11.25	11.25	159.75	159.75	30.487	30.487	367.38	275.53
10	244.92	244.93	15	15	213	213	40.65	40.65	489.84	306.15
11	244.92	428.61	15	26.25	213	372.75	40.65	71.137	459.225	122.46
12	183.69	520.455	11.25	36	159.75	511.2	30.487	97.56	489.84	0
13	0	244.93	0	15	0	213	0	40.65	857.22	122.46
14	122.46	122.45	7.5	7.5	106.5	106.5	20.325	20.325	551.07	336.76
15	306.15	306.20	18.75	18.79	266.25	266.818	50.812	50.92	367.38	183.69
16	122.46	428.62	7.5	26.25	106.5	372.75	20.325	71.137	734.76	122.46
17	0	508.209	0	35.5	0	504.1	0	96.205	795.99	0
18	306.15	229.61	18.75	14	266.25	198.8	50.812	37.94	428.61	306.15
19	183.69	202.06	11.25	13.5	159.75	191.7	30.487	36.585	489.84	336.765
20	153.075	293.904	9.375	16	133.125	227.2	25.406	43.36	551.07	367.38
21	367.38	416.364	22.5	25	319.5	355	60.975	67.75	367.38	367.38
22	612.3	232.674	37.5	13.75	532.5	195.25	101.625	37.262	0	397.99
23	171.444	220.428	10.5	15.75	149.1	223.65	28.455	42.682	489.84	428.6
24	214.305	263.289	13.125	15.5	186.375	220.1	35.568	42	385.749	385.749
25	0	202.06	0	13.5	0	191.7	0	36.585	734.76	428.61
26	316.15	183.7	18.75	11.25	266.25	159.75	50.812	30.487	306.15	446.97
27	275.535	293.904	16.875	16	239.625	227.2	45.731	43.36	428.61	446.97
28	367.38	232.674	22.5	13.75	319.5	195.25	159.75	37.262	367.38	459.225
29	306.15	306.5	18.75	19	266.25	269.8	50.812	51.49	306.15	183.69
30	183.69	428.62	11.25	26.25	159.75	372.75	30.487	71.137	489.84	244.92
31	244.92	306.5	15	19	213	269.8	40.65	51.49	428.61	306.15
the sum	7131	10303	436.125	658.84	6193	9327.1	1280.7	1779.2	13918	7659.8

IV.8.1 Le plan économique

D'après le Tableau IV.4 on résume la comparaison des principaux paramètres économiques des deux composantes pendant le mois d'octobre dans le tableau IV.5 on remarque que le GD présente le coût plus élevé que l'éolien.

Table IV.5 Comparaison économique entre les WTG et DG

	Prix d'énergie (6.123DA/kWh)	
	Octobre	
	WTG	DG
\sum La somme	7659.8	10303

Le tableau IV.6 représente la consommation du carburant de générateur diesel et leur coût.

Table IV.6 Coût du système DG

	Octobre	
	Consommation du carburant (l/mois)	Prix unitaire du carburant (14.2DA/l)
\sum La somme	658.84	9327.1

IV.8.2 Le plan environnemental

Comme indiqué dans le chapitre précédent l'énergie éolienne est une énergie qui n'émet aucun gaz nocif à effet de serre c'est-à-dire aucune émission de CO₂. Le tableau IV.7 représente les émissions de CO₂ par le générateur diesel.

Table IV.7 L'émission de CO₂ généré par DG

	Octobre	
	Consommation du carburant (l/mois)	Emission CO ₂ (2.71kg/l)
\sum La somme	658.84	1779.2

Le taux de l'émission de CO₂= 1779.2 kg/mois pour système traditionnel (GD), cet indice met en évidence le rôle de l'utilisation des énergies renouvelables dans la réduction des émissions de gaz à effet de serre.

IV.9 Analyse énergétique

Pour simuler le système WDHS, nous avons réalisé le schéma de simulation de la (Fig.15) sous le logiciel Matlab- Simulink 7.8 pour l'alimentation d'une charge (AC) pour un régime de basse tension sachant qu'au début nous utilisons l'éolienne seule pour alimenter cette charge avec une vitesse de vent bien contrôlée. Après nous utilisons le groupe diesel seul pour la même charge sachant que La synchronisation sera établie entre les deux sources d'énergies à t=1.2s avec une vitesse du vent variant de 3 à 10 (m/s).

IV.9.1 Modèle de l'éolienne seule en service ($10 \leq V_m < 17$) m/s

Le modèle de l'éolienne seule est montré à la Figure IV.6. Il est simulé pour valider le bon fonctionnement du régulateur des tensions, courants et fréquence où la vitesse du vent est entre 10 à 17(m/s). La charge branchée est soumise à de petite de variation durant la période de simulation.

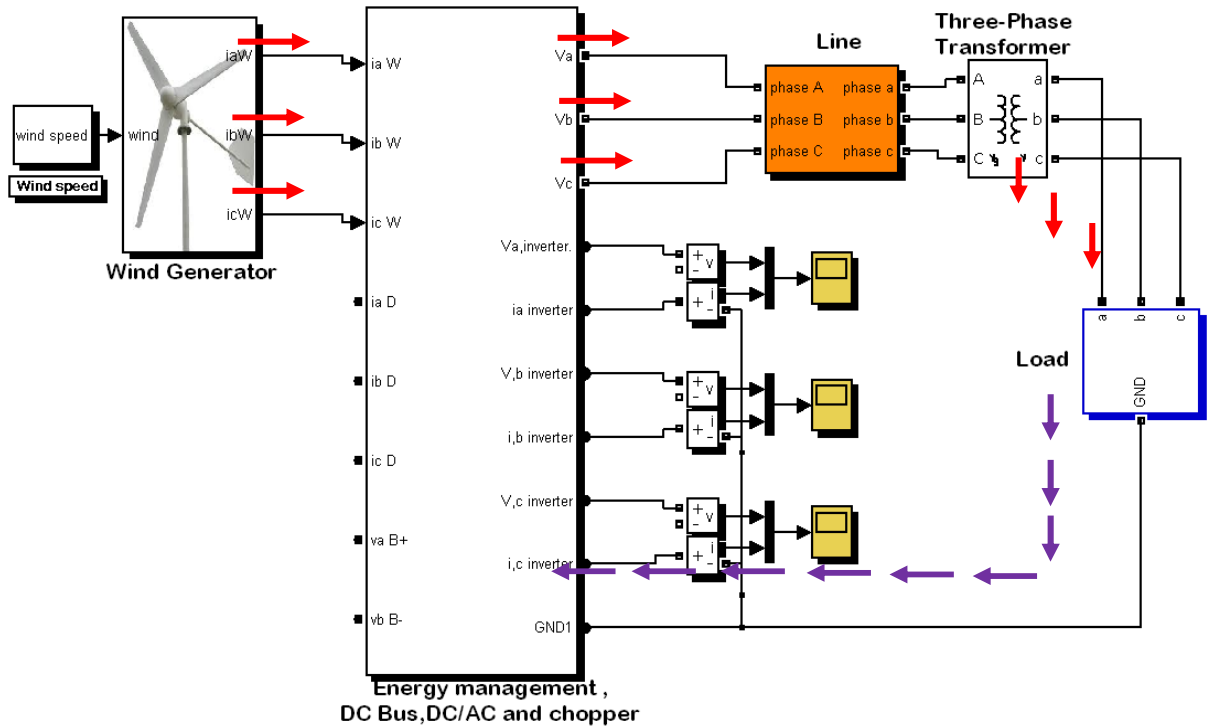


Figure IV.15 Schéma de simulation du système du éolien avec la charge.

Les formes d'ondes montrées dans la Figure IV.16 et la Figure IV.17 représentent les tensions simples v_{abc} (v) et les courants simples i_{abc} (A) générés par l'éolienne ou les courants sont d'environ $i=4,8$ A et de tension 220v.

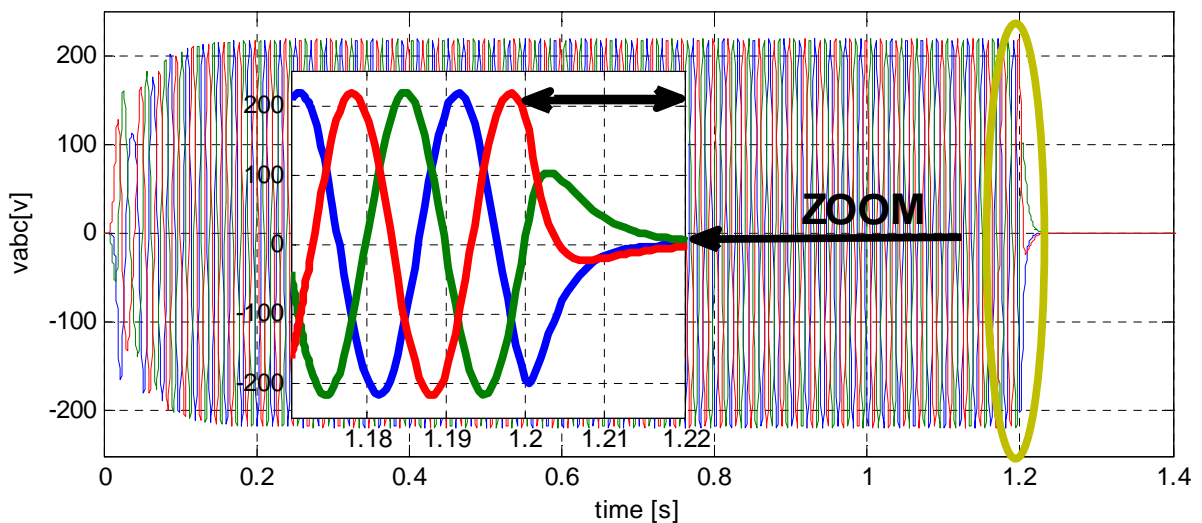


Figure IV.16 L'évolution des tensions statoriques générées par l'éolienne.

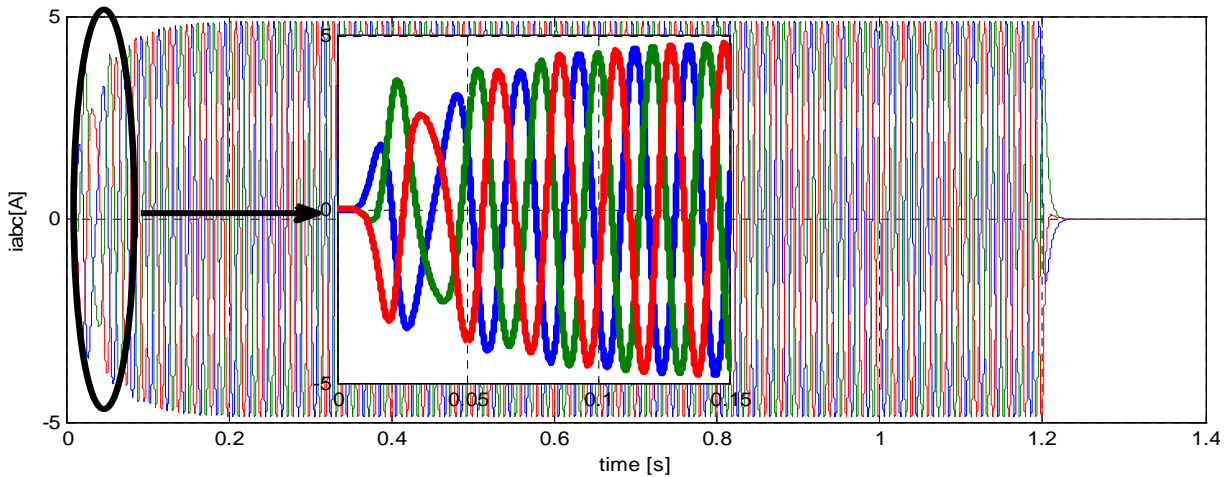


Figure IV.17 L'évolution des courants statoriques générés par l'éolienne.

Les résultats de simulations montrés à la Figure IV.16 et figure IV.17 démontrent que l'éolienne est capable de fournir l'énergie demandée par la charge en présence de vent fort ($V_m > 10m/s$) ; dans ce cas la batterie a absorbé le surplus de puissance fournie par l'éolienne pour le stockage.

IV.9.2 Modèle du générateur diesel ($V_m < 3 m/s$)

Le modèle du GD est donné à la Figure IV.18 ; il est validé par simulation pour s'assurer du bon fonctionnement du régulateur de tension et de vitesse.

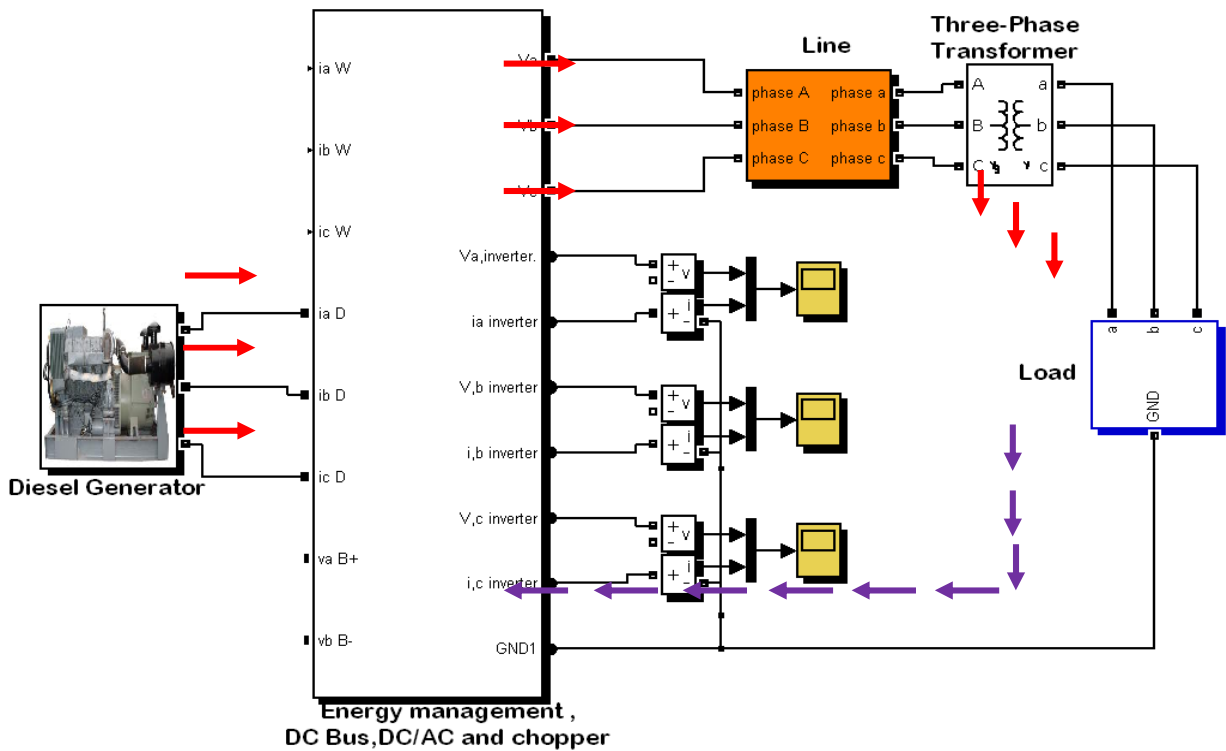


Figure IV.18 Schéma de simulation du système du générateur diesel avec la charge.

Les formes d'ondes montrées dans la Figure IV.19, et Figure IV.20 représentent l'évolution des tensions simples statoriques v_{abc} (V) et l'évolution des courants simples statoriques i_{abc} (A) respectivement générées par le groupe diesel.

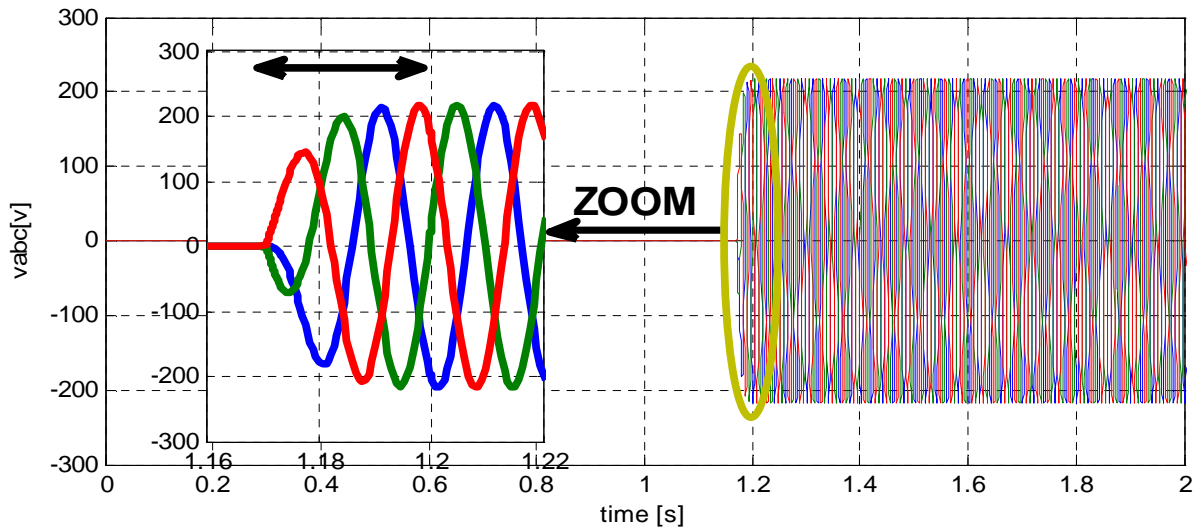


Figure IV.19 L'évolution des tensions statoriques.

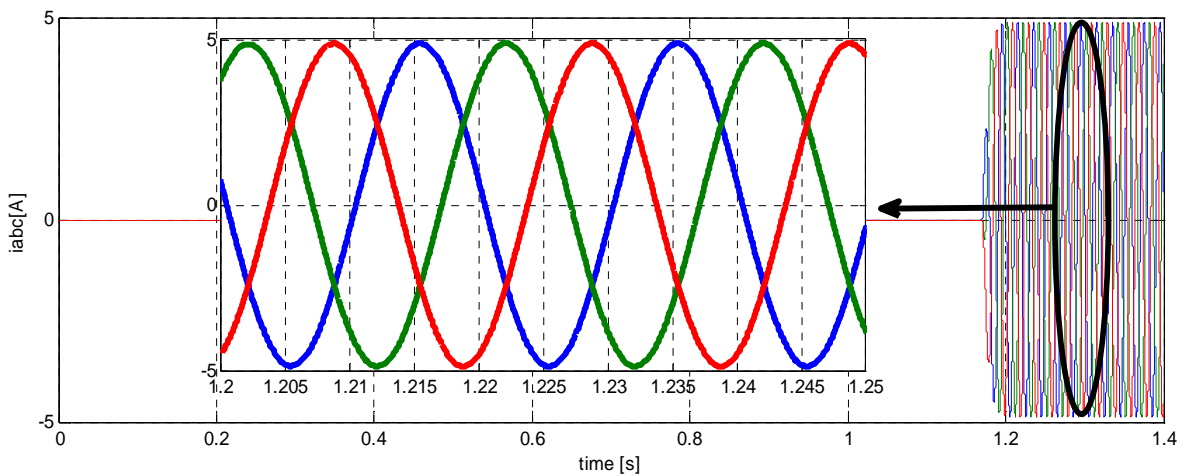


Figure IV.20 L'évolution des courants statoriques.

IV.9.3 Modèle WTG/DG en service [$(3 \geq V_m > 10)m/s$]

Les deux sources d'énergie testées au paravent sont synchronisées maintenant afin de maintenir la tension et la fréquence de notre système autonome SHED constantes lors de la variation de la vitesse du vent.

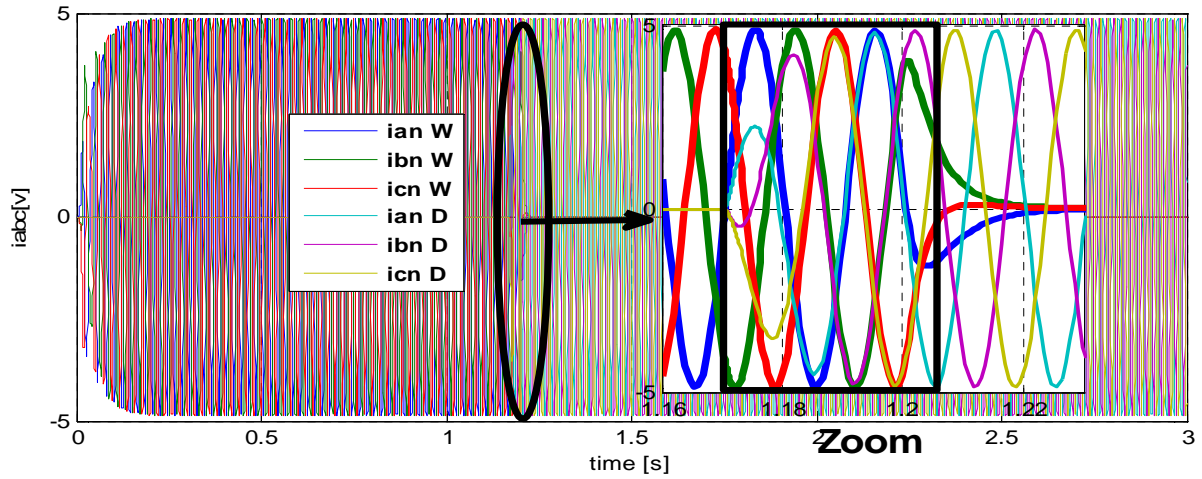


Figure IV.21 Courants produits par (Eolienne/Diesel).

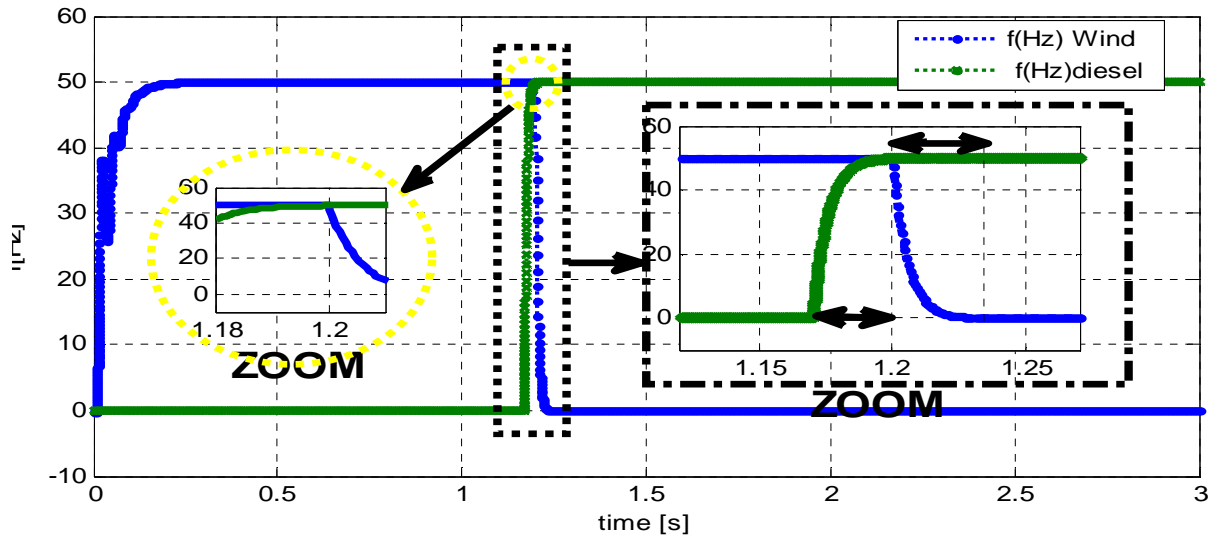


Figure IV.22 Aperçu de La fréquence.

Les résultats de simulations montrés dans la Figure (IV.21, IV.22) prouvent le bon fonctionnement du système. La tension et la fréquence sont parfaitement régulées et maintenues constantes à l'aide du convertisseur de puissance.

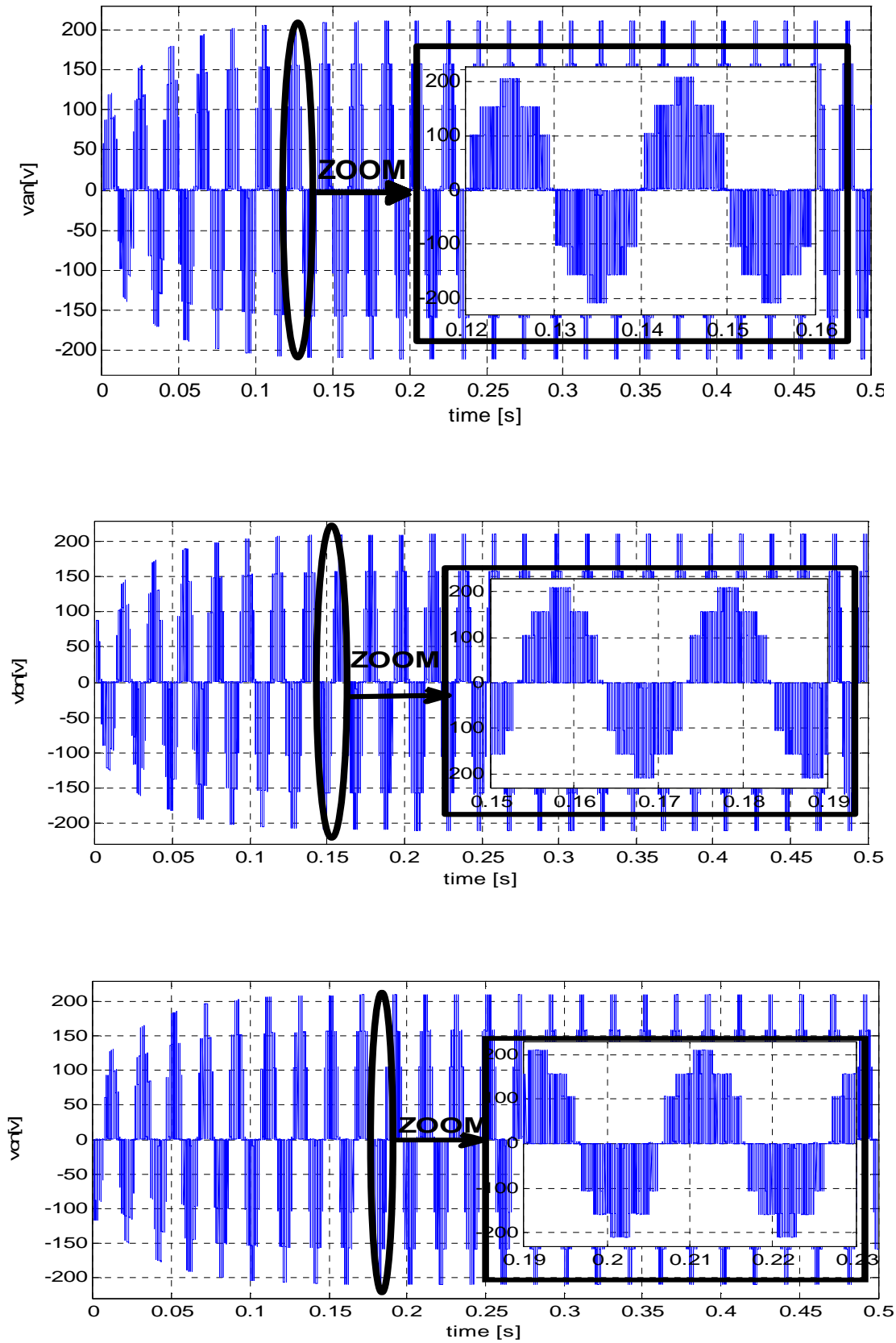


Figure IV.23 Tensions simples des phases «A,B,C » générées par l'onduleur.

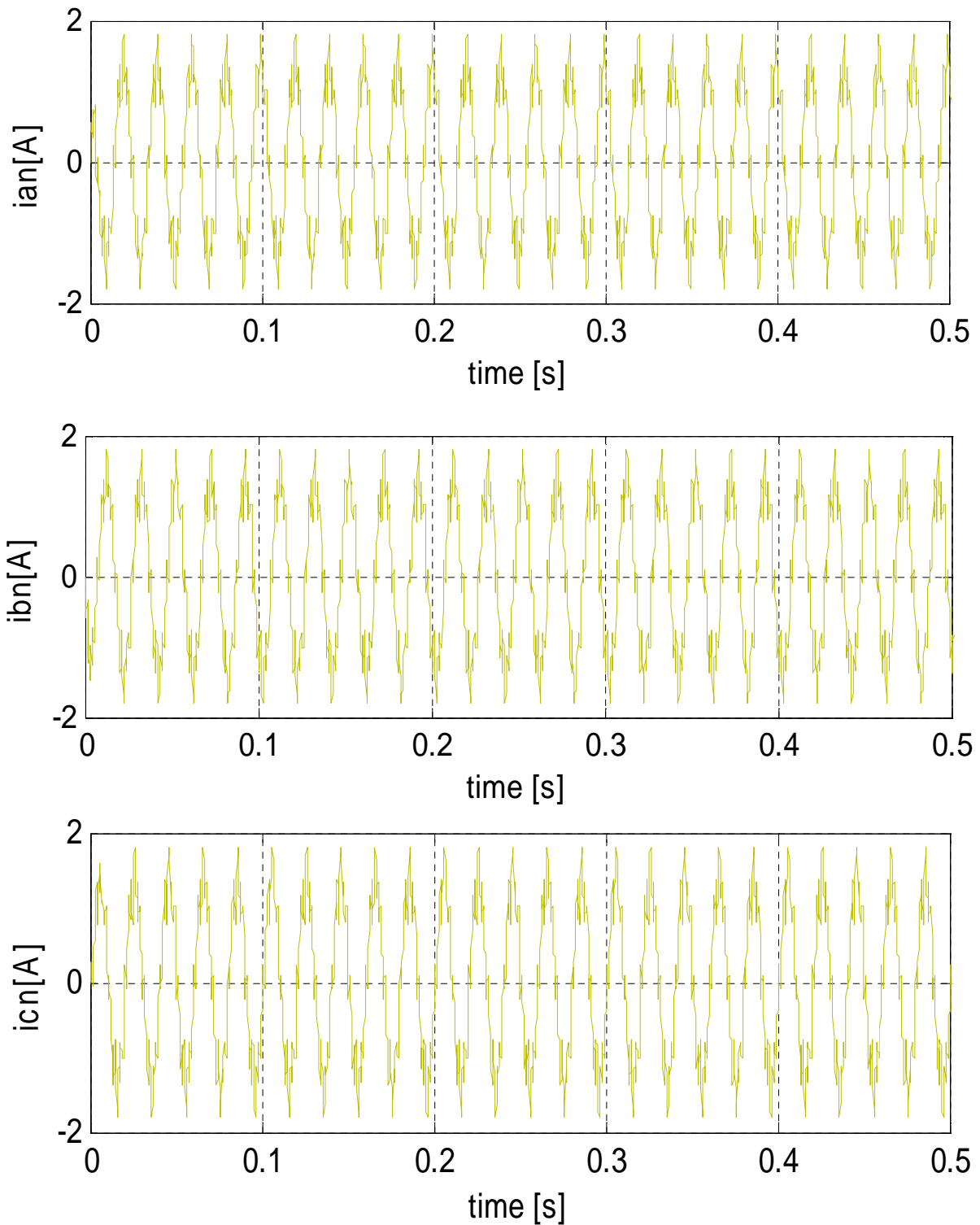


Figure IV.24 Allure des courants des phases avec charge

IV.10 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons établi la nouvelle stratégie de gestion pour l'optimisation du système SEH en contrôlant la puissance générée par l'éolienne, le diesel et la batterie. Les simulations ont permis de tester les performances de chaque source d'énergie. Une synchronisation entre les deux sources d'énergie a été établie en présence de la variation de la

charge et du vent. Les résultats obtenus ont montrés que la charge est alimentée sans interruption, la tension d'alimentation et la fréquence de cette dernière sont restées constantes durant tous les modes de fonctionnement.

Les résultats obtenus montrent la souplesse du système proposé face aux variations de la puissance demandée tout en minimisant les émissions des gaz à effet de serre et assurant une meilleure stabilité sur la tension et la fréquence générées en présence des perturbations provoquées par la ressource aléatoire du vent.

Conclusion générale

Conclusion générale et perspectives

Dans ce travail nous avons analysé l'intégration d'un système hybride avec un système de stockage situé dans un site isolé. Le système hybride comprend une éolienne à vitesse variable contrôlée par la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), un groupe électrogène diesel et une batterie électrochimique comme système de stockage. La simulation de la gestion de ce système a été appliquée au site d'Adrar où les données météorologiques (vitesse du vent, température, relief) sont disponibles. Selon les résultats obtenus, la gestion nous a permis d'obtenir un gain technico-économique en carburant, une longévité du groupe électrogène, une assurance en continuité de service et l'élimination d'une partie des gaz à effet de serre lors du fonctionnement en éolien.

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 de l'ordre de 22 000 MW entre 2011 et 2030 pour couvrir la demande nationale en électricité. Dans ce cadre, la wilaya d'Adrar a bénéficié d'un projet de ferme éolienne de production d'énergie d'une capacité de 10 MW, la première du genre à l'échelle nationale et à l'horizon 2020, la wilaya d'Adrar sera renforcée d'une nouvelle centrale de 175 MW qui est en voie de réalisation et dont les études sont en cours.

Références Bibliographiques

- [1] HASSINI née BELGHITRI HOUDA « Modélisation, Simulation et Optimisation d'un Système hybride Eolien-photovoltaïque » Mémoire de magister université Abou-bakr Belkaid de Tlemcen, Algérie, 2010.
- [2] Tarak GHENNAM « Supervision d'une ferme éolienne pour son intégration dans la gestion d'un réseau électrique, Apports des convertisseurs multi niveaux au réglage des éoliennes à base de machine asynchrone à double alimentation » Thèse de doctorat université de l'Ecole Militaire Polytechnique d'Alger, Algérie, 2011.
- [3] Syndicat des Energies Renouvelables / France Energie Eolienne, <http://www.notre-planete.info/ecologie/energie/energie-eolienne.php>, 1 juin 2016.
- [4] Carson D.J, « Boundary Layer Meteorology, Introduction Lectures ». Workshop on An Atmospheric Area Modelling, ICTP, 1990.
- [5] KHALED FERKOUS "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne.", Mémoire de Magister, Université Mentouri Constantine (2009).
- [6] Nordin, H., & Lindemark, B. (1999, June). System reliability, dimensioning and environmental impact of diesel engine generator sets used in telecom applications. In *Telecommunication Energy Conference, 1999. INTELEC'99. The 21st International* (pp. 7-pp). IEEE.
- [7] HAMMOUCHE, R. Atlas vent de l'Algérie/ONM. Algiers: Office des publications Universitaires (OPU), 1990.
- [8] MEIBODY-TABAR, Farid. Machines synchrones à aimants permanents alimentées par onduleurs de tension: Modélisation, commande et segmentation de puissance. 2000. Thèse de doctorat.
- [9] H.Ibrahim, R.younès, 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.
- [10] STOYANOV, Ludmil. Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. 2011. Thèse de doctorat. Université Pascal Paoli.

- [11] Farouk Chellali, Adballah Khellaf, Adel Belouchrani, Abdelmadjid Recioui « A contribution in the actualization of wind map of Algeria» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 993–1002).
- [12] *Annuaire statistique de l'année 2008*, Direction de la Planification et de l'Aménagement du Territoire, WILAYA D'ADRAR, mai 2009.
- [13] HUSSEIN IBRAHIM « Etude et Conception d'un Générateur Hybride d'électricité de type Eolien-Diesel avec élément de stockage d'air comprimé » Thèse de doctorat université du Québec, Canada, Juin 2010.
- [14] K. MESSAITFA ,T. CHERGUI . l'eau, l'énergie & le vent a travers la région d'Adrar, Algérie . <http://amistimimoun.free.fr/8Adherents/EauEnergieVent.pdf> . 1juin 2016.
- [15] HOUASNIA ADEL « Stratégie de gestion multi énergie dans un système Hybride Eolien - Diesel-Dispositif de stockage » Université du Québec à Trois-Rivières, 2007.
- [16] G. Solari « Wind Speeds Statistics », Collège on atmospheric Boundary Layer and Air Pollution. ICTP, Trieste, Italie 1994.
- [17] B. Yousef, G. Aymeric Collecte, organisation, traitement, analyse de mesures éoliques et modélisation énergétique. Thèse doctorat Université Tecnica Federico Santa Maria, UTFSM, Valparaso, Chili 2005.
- [18] GENIVAR, Analyse des vents et des surcotes de tempêtes. projet de réhabilitation du brise-lames à l'entrée du port de mer de la compagnie minière Québec cartier Société en commandite 2007.
- [19] Amar KHELIF « expérience, potentiel et marche photovoltaïque algérien » *New Energy Algeria NEAL* , Alger – Algérie.
- [20] IMEN Jarraya, Fathi Ben Amar, Mustapha Elamouri, Rachid Dhifaoui « Choix des systèmes éoliens appropriés pour les sites tunisiens » *International Renewable Energy Congress*, Sousse, Tunisia 2010.

- [21] TENINGE, Alexandre. Participation aux services système de parcs éoliens mixtes: application en milieu insulaire. 2009. Thèse de doctorat. Institut National Polytechnique de Grenoble-INPG.
- [22] Baring-Gould, E. I., Flowers, L., Lundsager, P., Mott, L., Shirazi, M., & Zimmerman, J. (2003, June). Worldwide status of wind/diesel applications. In Proceedings of the 2003 AWEA Conference, Austin, TX (No. 0.2, pp. 0-4).
- [23] Miloud REZKALLAH. Amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride éolien-diesel. 2010. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure.
- [24] BRIHMAT Fouzia. Etude conceptuelle d'un système de conditionnement de puissance pour une centrale hybride PV/Eolien. 2012. Thèse de doctorat. Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou.
- [25] BAGHDADI Fazia . Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables. 2011. Thèse de doctorat. Université Mouloud Maameri de Tizi Ouzou.
- [26] Majid ZANDI. Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique. 2010. Thèse de doctorat. Vandoeuvre-les-Nancy, INPL.
- [27] « 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>. 1 juin 2016.
- [28] AbdelKader Ould Mahmoud « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour alimentation de charges mixtes » Thèse de doctorat Université de Nouakchott 2008.
- [29] BOYETTE, Armand. Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne. 2006. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy I.
- [30] POITIERS, Frédéric. Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-machine asynchrone à cage autonome-machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. 2003. Thèse de doctorat. Université de Nantes.

- [31] LOPEZ, Miguel. Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée. 2008. Thèse de doctorat. Université Paris Sud-Paris XI.
- [32] Ramakumar, R. "Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas." *IEEE Power Engineering Society General Meeting, 2004*.
- [33] DEVILLIERS, Didier et MAHÉ, Éric. Cellules électrochimiques: aspects thermodynamiques et cinétiques. *L'actualité chimique*, 2003.
- [34] Adam MIRECKI « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005.
- [35] EL AIMANI, Salma. Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension. 2004. Thèse de doctorat. Ecole Centrale de Lille.
- [36] Ensalem R., « Climatologie Générale », Ed. ENP, Alger 1989.
- [37] Le site web en ligne <http://www.rzs-hm.si/people/Mark.Zagar/work/arpege/lien5-4-3.html>. 1juin 2016.
- [38] TURBELIN, Grégory. Modélisation de la turbulence atmosphérique en vue de l'étude du chargement aérodynamique des structures soumises aux effets du vent. 2000. Thèse de doctorat.
- [39] Kasbadji Merzouk N., « Wind Energy Potential in Algeria », *Int. J. Renewable Energy*, 21/3-4, 55 -562, 2000.
- [40] UMA, « Etude préliminaire des atlas maghrébins des énergies renouvelables ». RAPPORT INTERNE A UMA, 1992.
- [41] Kasbadji Merzouk N. et H. Daaou., « Cartes Saisonnières du Vent en Algérie ». Journée d'études : Météorologie et Climatologie entre sciences et prise de décision, ONM/Alger, 2001.
- [42] Association canadienne de l'énergie éolienne. <http://www.smallwindenergy.ca>. 1 juin 2016.

- [43] TURCOTTE, Dave, ROSS, Michael, et SHERIFF, Farah. Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools: status and needs. In : *PV Horizon: Workshop on photovoltaic hybrid systems, Montreal*. 2001.
- [44] FADAEINEDJAD, Roohollah, MOSCHOPOULOS, Gerry, et MOALLEM, Mehrdad. The impact of tower shadow, yaw error, and wind shears on power quality in a wind-diesel system. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2009, vol. 24, no 1, p. 102-111.
- [45] Weis, T. M., et A. Ilinca. 2008. « The utility of energy storage to improve the economics of wind-diesel power plants in Canada ». *Renewable Energy*, vol. 33, no7, p. 1544-57.
- [46] VALENCIAGA, Fernando et PULESTON, Paul F. Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2005, vol. 20, no 2, p. 398-405.
- [47] AGBOSSOU, Kodjo, KOLHE, Mohanlal, HAMELIN, Jean, *et al.* Performance of a stand-alone renewable energy system based on energy storage as hydrogen. *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2004, vol. 19, no 3, p. 633-640.
- [48] NELSON, D. B., NEHRIR, M. H., et WANG, C. Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems. *Renewable energy*, 2006, vol. 31, no 10, p. 1641-1656.
- [49] KHAN, M. J. et IQBAL, M. T. Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system. *Renewable energy*, 2005, vol. 30, no 3, p. 421-439.
- [50] T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, T. Funabashi “A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island” *IEEE Transactions on Energy Conversion* , June 2005.
- [51] B. Colin. Groupes Electrogènes de Secours. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/energies-th4/reseaux-electriques-industriels-et-tertiaires/42265210/groupes-electrogenes-de-secours-d5180/>. 1juin2016.

- [52] GUÉRETTE, Dominique. Asservissement d'une éolienne à vitesse variable et à pas fixe dans le cadre d'un système de jumelage éolien-diesel à haute pénétration. Université du Québec à Rimouski, 2010.
- [53] MULTON, B. et AHMED, H. Ben. Energies. Energie électrique: les enjeux. 2002.
- [54] C.D. Barley and C.B. Winn, "Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems", Solar Energy ,Vol. 58,(1996) No.4-6,pp 284-289.
- [55] M. Ashari,C.V.Nayar, "An optimum dispatch strategy using set points for a photovoltaic (PV)-diesel-battery hybrid power system", Renewable Energy.Vol 66, No.1 ,(1999) pp.1-9.
- [56] T. Burton, et al., Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons Ltd, 2001.
- [57] I. Kamwa, B. Saulier, "Modélisation, simulation et régulation d'un réseau éolien/diesel autonome", Raport N°IREQ4340, Varennes, Canada, 1989.
- [58] B. Sedaghat, A. Jalilvand, R. Noroozin," Desgin of a multileved control strategy for integration of stand-alond wind/diesel system" Electrical power and Energy Systems, 35 (2012) pp.123-137.
- [59] IVECHIU, Ionel. Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome. 2005. Thèse de doctorat. Université du Havre.
- [60] WÉKIPIDA . [http://fr.wikipedia.org/wiki/ Fichier:Schema _eolienne.svg](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Schema_eolienne.svg). 1juin 2016
- [61] Harris, R. I. 2008. « The macrometeorological spectrum-a preliminary study ». Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 96, no12, p. 2294-2307.
- [62] Y-P.Yang, C-P. Lo, « Current distribution control of dual directly driven wheel motors for electric vehicles», Control Engineering Practice, 2008, pp. 1285-1292.
- [63] L. Mihet-Popa, Frede Blaabjerg, I. Boldea, " Wind Turbine Generator Modeling and Simulation Where Rotational Speed is the Controlled Variable", IEEE Tranactions on Industry Applications, Vol. 40, No. 1, January/ February 2004.

- [64] M.S. Ismail, M. Moghavvemi, T.M.I. Mahlia, “Techno-economic analysis of an optimized photovoltaic and diesel generator hybrid power system for remote houses in a tropical climate”, *Energy Convers Manage*, 69(2013)pp.163-173.
- [65] Sigma Engineering, “Etude générale des questions énergétiques dans les collectivités éloignées du Canada “ préparé pour le programme de démonstration dans les collectivités éloignées. Énergie, Mines et ressources Canada, Mars 1985.
- [66] F. Delfosse, “Détermination de l’Etat de Charge des Batteries d’un Véhicule Electrique”, Travail de fin d’études, Université de Liège, 1998.
- [67] M. Thele, S. Buller, D. U. Sauer, R. W. De Donckcker, E. Karden, “Hybrid Modelling of Lead-Acid Batteries in Frequency and Time Domain”, *Journal of Power Sources*, Vol. 144, Pages 461-466, 2005.
- [68] A. Jossen, J. Garche, H. Doering, M. Goetz, W. Knaupp, L. Joerissen, “Hybrid systems with lead–acid battery and proton-exchange membrane fuel cell”, *Journal of Power Sources*, Vol. 144, pp. 395-401, 2005.
- [69] A. D. Hansen. P. Sørensen, L. H. Hansen, H. Bindner, “Models for Stand-Alone PV System”, Risø-R-1219(EN)/SEC-R-12, 2000.
- [70] BASBOUS, Tammam. Étude de faisabilité d'un jumelage éolien-diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé. Université du Québec à Chicoutimi, 2009.
- [71] J. Sun and H. Grotstollen, “Averaged modelling of switching power converters: Reformulation and theoretical basis”, *IEEE PESC’92*, 1166–1172, 1992.
- [72] BASBOUS, Tammam. Étude de faisabilité d'un jumelage éolien-diesel avec stockage d'énergie sous forme d'air comprimé. Université du Québec à Chicoutimi, 2009.

Annexe A

Paramètres de l'éolienne choisie

Technical Data : Wind World A/S W2080 / 120 kW



Parameter of machine synchronous (GSAP)

<i>Parameters</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>
Nominal speed	1500	tr /min
Number of pole pairs p	3	-
Stator resistance R_s	0.895	Ω
Inductance L_d	0.012	H
Inductance L_q	0.0211	H
Φ_f	0.9	Wb
Friction coefficient f	0.001	Nm.s/rad

Annexe B

Paramètres du générateur diesel choisie

Data sheet of the generator of 150KVA / 120kW volvo.diesel



Détails de Produit

Info de Base

N° de Modèle: AV165

Type: Génératrice Diesel Automatique Contrôlée par Micro-Ordinateur

Méthode d'installation: Mobile

Coup: 4 Courses

Méthode de refroidissement: Refroidissement par Eau

Type de sortie: Triphase CA

Info Supplémentaire

Marque Déposée: AOSIF

Emballage: Foam and PE Film Package, Plywood Package, Plastic

Origine: China(Mainland)

Capacité de Production: 200 PCS / Month

Settings MD

parameters	values	parameters	values
T_1	0.01sec	T_6	0.0384sec
T_2	0.02sec	K	40
T_3	0.2sec	T_D	0.024sec
T_4	0.25sec	T_{\min}	1.1 pu
T_5	0.009sec	T_{\max}	0pu
Diesel fuel cost	14.2 DA/l		
Cost of Energy(COE)	6.123DA/kWh		
Quantity of CO ₂ produced	2.71kg/l		

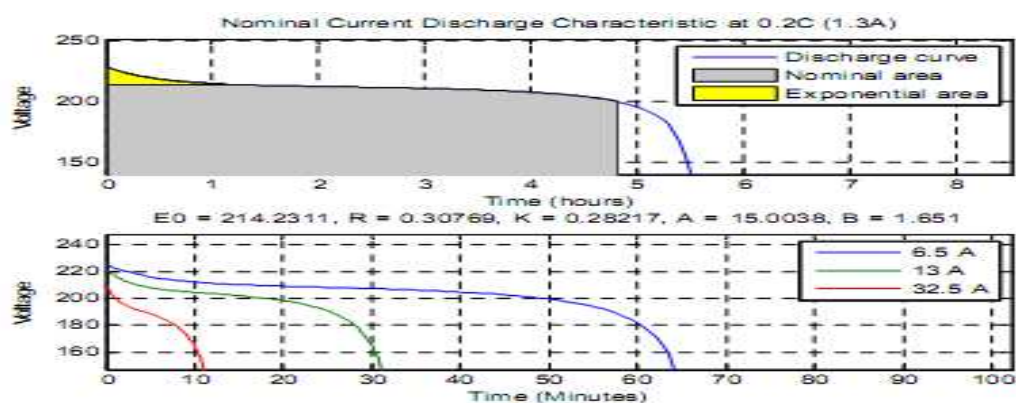
Annexe C

Système de stockage (Ni-Cd)

Parameter battery

parameters	values	parameters	values
E_0	214.2311V	B	1.651 Ah ⁻¹
K	0.28217V	R	0.30769 Ω
Q	410.16Ah	C	8mf
A	15.0038V	L	2.5 μ H

Typical discharge characteristics



Travaux Scientifiques à cette thèse

PUBLICATIONS INTERNATIONALES:

- [1] **Abdelhamid ksentini**, Ahmed bensalem “Management and control of a wind-diesel hybrid system for isolated site electrification” *Journal of Electrical Engineering(JEE)*,ISSN:1582-4594, Vol 15, Edition 2, N°: 327, 2015(**Scopus**).

- [2] **Abdelhamid ksentini**, Ahmed bensalem , El.Bahi azzag “Management and technical economic analysis of a hybrid system (Wind / Diesel) in southern Algeria” *Int. J. of Energy Technology and Policy* ,ISSN: 14728923, 1741508X, Vol.12,N°:1,pp:60-83,2015 (**Scopus –Elsevier**).

- [3] **Abdelhamid ksentini**, Ahmed bensalem , El.Bahi azzag, Chadel M “Variation and the influence of the pitch angle of the rotational speed of the wind turbine” *Journal of Engineering and Applied Sciences* (2015 Volume 10), (**Scopus_ Accepted**).

- [4] **Abdelhamid ksentini**, El.Bahi azzag, Ahmed bensalem , Imene.Touaïbia, Nardjés Ouahab “Analysis and Control of a wind-diesel system twinning powering a local charge” *Proceedings of Engineering & Technology (PET) –CIER’14 e-ISSN: 2356-5608, Volume 9, special Issue 5(2014), Sousse, Tunisia.*

- [5] **Abdelhamid ksentini**, El.Bahi azzag, Ahmed bensalem , « Management and Optimization of multiple sources to power an autonomous grid », *International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET)*, Vol .2, Issue 2 (ISSN :2356-5608),Id61, Décembre 15 – 17, 2013 – **Sousse, Tunisia.**

COMMUNICATIONS INTERNATIONALES :

- [1] **Abdelhamid ksentini**, El.Bahi azzag, Ahmed bensalem , Imene.Touaïbia, Nardjés Ouahab “Analysis and Control of a wind-diesel system twinning powering a local charge” *Proceedings of Engineering & Technology (PET) –CIER’14 e-ISSN: 2356-5608, Volume 9, special Issue 5(2014).*

- [2] **Abdelhamid Ksentini**, El.Bahi azzag, A Bensalem,K Allali « Management and control of multiple sources for the supply of an electrical network to the Algerian South», 2nd international conference on electrical energy and systems ICEES, October 28-30, 2014, **Annaba, ALGERIA .**

- [3] K Allali, El.Bahi azzag, **Abdelhamid Ksentini**,« Study of Wind-Diesel Hybrid Power System for Remotely Located Region in the South Algerian », 2nd international conference on electrical energy and systems ICEES, October 28-30, 2014, **Annaba, ALGERIA .**

- [4] **Abdelhamid Ksentini** ,El-Bahi Azzag , Ahmed Bensalem,« Variation and the influence of the pitch angle of the rotational speed of the wind turbine», The Second International Conference on Electrical Engineering and Control Applications (ICEECA’2014), November 18-20, 2014,**Constantine,ALGERIA.**

- [5] **Abdelhamid Ksentini**, Ahmed Bensalem, El-Bahi Azzag,K Allali « Management of a system multi-source energy to power an electrical network in southern Algeria», 2nd international conference on Electrical Engineering (CEE’2014), November 16-17, 2014, **Batna, ALGERIA.**

- [6] **Abdelhamid Ksentini**, El.Bahi azzag, A Bensalem, « Analyse de la gestion des sources multiples pour un réseau électrique autonome », 3^{ème} Conférence Internationale sur la Maintenance, la Gestion, la Logistique et l’Electrotechnique CIMGLE’2013, Novembre 13 – 15, 2013 **Paris, France.**

- [7] **Abdelhamid ksentini**, El.Bahi azzag, Ahmed bensalem , « Management and Optimization of multiple sources to power an autonomous grid », Conférence Internationale des Energies

- [8] El.Bahi Azzag, K Allali and **Abdelhamid Ksentini**, « Modélisation d'un Système Hybride Éolien-Diesel pour un Réseau Electrique Autonome », 3^{ème} Conférence Internationale sur la Maintenance, la Gestion, la Logistique et l'Electrotechnique CIMGLE'2013, Novembre 13 – 15, **2013 Paris, France.**
- [9] K. Allali, El.Bahi Azzag, **Abdelhamid. Ksentini**, « Optimisation de L'exploitation d'un Jumelage Eolien-Diesel pour L'alimentation d'un Site Isolé », 1ST international conference on electrical energy and systems ICEES, October 22-24, 2013, **Annaba, ALGERIA.**
- [10] I.Touaïbia , El.Bahi Azzag, **Abdelhamid Ksentini**, « Influence de l'angle de calage sur la puissance mécanique de l'éolienne », 1ST international conference on Electrical energy and systems ICEES, October 22-24, 2013, **Annaba, ALGERIA.**