

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY

UNIVERSITE BADJI MOKHTARANNABA



جامعة باجي مختار عنابة
Année 2015

Faculté des sciences de l'ingénierat
Département d'Electrotechnique

THESE

Présenté par

Allali Khaireddine

Pour l'obtention du diplôme de

Doctorat

THEME

**Modélisation et analyse de l'intégration
d'un jumelage Éolien-Diesel dans un
réseau électrique autonome**

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Qualité et Gestion de L'Énergie Électrique

DEVANT LE JURY :

Président :	Omeiri Amar	Prof	Université Annaba
Rapporteur :	Azzag El Bahi	MCA	Université Annaba
Examineur :	Ouari Ahmed	Prof	Université Annaba
Examineur :	Labar Hocine	Prof	Université Annaba
Examineur :	Rahmani Lazhar	Prof	Université Sétif
Examineur :	Radjeai Hammoud	Prof	Université Sétif

عنوان الأطروحة: نمذجة وتحليل إدماج التوأمة تربين هوائي-ديزل في شبكة كهربائية مستقلة

كاتب الأطروحة: علا لسي خير الدين

المشرف على الأطروحة: عزائف الباهي

قسم: الألكتروتقني

ملخص

في معظم المواقع المعزولة التي تقع في الجنوب الجزائري، تعتبر مولدات الديزل المصدر الرئيسي للطاقة الكهربائية، وفي الواقع فإن تموين هذه المناطق النائية لا تزال تطرح مشاكل (تقنية، اقتصادية وبيئية). إن إنتاج الكهرباء عن طريق مولدات الديزل مكلفة جداً ومسؤولة عن إنبعاث غاز ثاني أكسيد الكربون. هذه المواقع المعزولة تتمتع بإمكانيات كبيرة لطاقة الرياح، ومن تم استخدام التوأمة تربين هوائي-ديزل منصوح بها على نطاق واسع وخاصة لتقليل العجز في التشغيل.

عملنا البحثي هذا يهدف: أولاً إلى دراسة النمذجة لنموذج عن نظام هجين يتكون من: تربين هوائي، مولد ديزل، نظام تخزين الطاقة، ثانياً يهدف إلى التحليل التقني والاقتصادي لهذا النظام الهجين. هذا النموذج يستند على إستراتيجية مراقبة لتحسين سير النظام الهجين وإلى تعزيز المكاسب للتسيير الملائم لمختلف مصادر الطاقة (تربين هوائي، مولد ديزل، بطارية) وذلك حسب متطلبات الموقع المقترح. التسيير يتم بواسطة وحدة تحكم تتكفل بفتح أو غلق مختلف رموز التبديل وفقاً لظروف الأحوال الجوية (سرعة الرياح، الكتلة الهوائية، درجة الحرارة... الخ)، والغرض من ذلك التحسين الأمثل للنظام الهجين.

كلمات مفتاحية: تربين هوائي- ديزل - نظام تخزين - موقع معزول - تسيير - محاكاة.

Thesis entitled : Modelling and analysis of wind-diesel twinning integration in an autonomous electrical grid

Author : Allali Khaireddine

Thesis supervisor : Azzag El Bahi

Department : Electrical Engineering

Abstract

In most isolated sites situated in South Algerian, the diesel generators are the major source of electrical energy. Indeed, the power supply of these remote regions still poses order problems (technical, economical and ecological). The electricity produced with the help of diesel generators is very expensive and responsible for CO₂ emission. These isolated sites have significant wind energy potential; hence the use of twinning wind-diesel is widely recommended especially to reduce operating deficits. Our research work for firstly objective is to study of global model modelling of hybrid system which compound: wind turbine generator, diesel generator and storage system and secondly is the techno-economic analysis of this hybrid system. This model is based on control strategy to optimize the functioning of hybrid system and to consolidate the gains to provide proper management of energy sources (wind, diesel, battery) depending on the load curve of the proposed site. The management is controlled by a controller which ensures the opening/closing different power switches according to meteorological conditions (wind speed, air mass, temperature, etc); which the purpose of an adequate optimization of the hybrid system.

Keywords : Wind-Diesel, storage system, isolated site, management, simulation.

Titre de Thèse : Modélisation et analyse de l'intégration d'un jumelage Éolien-Diesel dans un réseau électrique autonome

Auteur : Allali Khaireddine

Directeur de Thèse : Azzag El Bahi

Département : Électrotechnique

Résumé

Dans la plupart des sites isolés situés au Sud Algérien, les générateurs diesel sont la source majeure d'énergie électrique. En effet, l'alimentation de ces régions éloignées pose toujours des problèmes d'ordre (technique, économique et écologique). L'électricité produite à l'aide de générateurs diesel est très chère et responsable de l'émission de CO₂. Ces sites isolés ont un potentiel d'énergie éolien significatif ; par conséquent on recommande largement l'utilisation du jumelage éolien-diesel particulièrement pour réduire les déficits d'exploitation. Notre travail de recherche a pour premier objectif l'étude de la modélisation d'un modèle global d'un système hybride composé: d'un générateur éolien, d'un générateur diesel et un système de stockage et en deuxième lieu l'analyse technico-économique de ce système hybride. Ce modèle est basé sur la stratégie de contrôle pour optimiser le fonctionnement du système hybride et de consolider les gains afin de prévoir une gestion adéquate de l'énergie des différentes sources (éolienne, diesel, batterie) en fonction de la courbe de charge du site envisagé. La gestion est asservie par un contrôleur qui assure l'ouverture / fermeture de différents commutateurs de puissance selon les conditions météorologiques (vitesse du vent, masse d'air, température, etc.) ; dont le but d'une optimisation adéquate du système hybride.

Mots clés : Éolien-Diesel, système de stockage, site isolé, gestion, simulation.

Je dédie cette thèse

A toute la famille

Tous mes amis

Mes enseignants

Remerciements

*Je tiens tout d'abord à exprimer mes remerciements et ma profonde reconnaissance à mon encadreur Monsieur **Azzag El-Bahi** pour ses idées et ses conseils judicieux, sa confiance, son extrême patience et son absolue disponibilité durant toute la durée de cette thèse.*

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à :

*Monsieur **Ouari Ahmed**, Professeur à l'université d'Annaba et chef de la formation doctorale.*

*Monsieur **Omeiri Amar**, Professeur à l'université d'Annaba, pour m'avoir fait l'honneur de présider le jury.*

Je remercie également tous les membres du jury :

*Monsieur **Labar Hocine** Professeur à l'université d'Annaba, Monsieur **Rahmani Lazar** Professeur à l'université de Sétif et Monsieur **Radjeai Hammoud** Professeur à l'université de Sétif, 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 Énergies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) à Adrar, pour toutes les informations requises pour l'élaboration de ma thèse.

J'adresse mes remerciements à Monsieur le chef du département, personnels administratifs, aux enseignants sans oublier les différents collègues de département d'électrotechnique.

Et enfin, qu'il me soit permis d'exprimer ici mes sentiments de profonde reconnaissance à mes parents, mes frères et ma sœur qui m'ont soutenue et encouragée durant ce travail.

Liste des tableaux

1.1	Classification des SEH par gamme de puissance	11
4.1	Coordonnées géographiques du site choisi	82
4.2	Données climatiques du site étudié	83
4.3	Relevés de la variation de la vitesse du vent pendant l'année 2011	84
4.4	Caractéristiques techniques de NORDEX N27-150	88
4.5	Caractéristiques du générateur diesel FG Wilson P150-1	90
4.6	Caractéristiques de la batterie Ni-MH	91
4.7	Puissance moyenne mensuelle du système hybride éolien-diesel	93
4.8	Comparaison économique entre les deux systèmes	97
4.9	Coût du système traditionnel	98
4.10	L'émission de CO_2 par le générateur diesel	99
4.11	Résumé de calcul des coûts économiques générés par le système étudié . . .	100

Table des figures

1.1	Architecture des SEH	7
1.2	Configuration du SEH à bus CC	9
1.3	Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA	10
1.4	Schéma du système hybride éolien-diesel	13
1.5	La ferme éolienne d'Adrar	14
1.6	Configuration du générateur diesel	15
1.7	Variation de la puissance produite par un SHED et la consommation du carburant	17
2.1	Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable	24
2.2	Éoliennes à axe vertical	25
2.3	Éoliennes à axe horizontal	26
2.4	Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne	27
2.5	Zones de fonctionnement des éoliennes	28
2.6	Conversion aérodynamique en énergie électrique	29
2.7	Vitesse du vent et vitesse tangentielle au bout des pales	30
2.8	Coefficient de puissance pour différents types de turbine	31
2.9	Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse du vent	33
2.10	Éolienne à vitesse fixe	34
2.11	Éoliennes fonctionnant à vitesse variable	35
2.12	Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe	37
2.13	Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse variable	38

2.14	Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable	39
2.15	Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur-hacheur-onduleur MLI	40
2.16	Machine synchrone à aimants permanents avec redresseur à diodes	41
2.17	Différents modes de réglage de puissance captée par la turbine	42
3.1	Schéma présentatif d'un système hybride étudié	52
3.2	Présentation d'un système éolien	52
3.3	Caractéristiques $C_p - \lambda$ d'une éolienne	55
3.4	Caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation	56
3.5	Modèle Simulink d'éolienne	57
3.6	Système éolien avec GSAP	60
3.7	Représentation de la génératrice à aimants permanents sur l'axe (d,q) . .	61
3.8	Schéma bloc la génératrice synchrone à aimants permanents	64
3.9	Chaîne de conversion d'un système éolien avec un redresseur à MLI	65
3.10	Schéma de principe d'un hacheur parallèle	66
3.11	Schéma global d'un onduleur à MLI	67
3.12	Modèle simplifié du générateur diesel	69
3.13	Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié	70
3.14	Modèle équivalent d'un enroulement	73
3.15	Modèle Simulink de la batterie Ni-MH	76
3.16	Algorithme d'optimisation du système hybride	77
4.1	Carte de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) en Algérie	81
4.2	Vitesse moyenne journalière du vent pour les mois de juin et septembre . .	85
4.3	Profil journalier de la courbe de charge	86
4.4	Éolienne type NORDEX N27-150	87
4.5	Courbe de puissance relative de l'éolienne NORDEX N27-150	89
4.6	Puissance moyenne journalière générée par chaque source pour les mois de juin et septembre	92

4.7	Puissance moyenne journalière générée par le GD et sa consommation en carburant pour les mois de juin et septembre	94
4.8	Analyse de l'effet de la consommation du carburant et son incidence sur l'émission de CO_2	95
4.9	Indice technico-économique du système étudié	96

Liste des abréviations

GWEC	: Global Wind Energy Council
CDER	: Centre de Développement des Énergies Renouvelables
GES	: Gaz à Effet de Serre
SEH	: Système d'Énergie Hybride
SHED	: Système Hybride Éolien-Diesel
TPP	: Taux de Pénétration de Puissance
TPE	: Taux de Pénétration d'Énergie
MD	: Moteur Diesel
GD	: Générateur Diesel
GS	: Générateur Synchrone
DG	: Diesel Generator
WTG	: Wind Turbine Generator
BESS	: Battery Energy Storage System
DE	: Diesel Engine
WO	: Éolien seul (Wind Only)
DO	: Diesel seul (Diesel Only)
WD	: Éolien-Diesel (Wind-Diesel)
CA	: Courant Alternatif
CC	: Courant Continu
VAWT	: Aérogénérateurs à Axe Vertical
HAWT	: Aérogénérateurs à Axe Horizontal
MSAP	: Machine Synchrone A Aimants Permanents
GSAP	: Génératrice Synchrone A Aimants Permanents
FMM	: Force Magnétomotrice
MPPT	: Maximum Power Point Tracking
MLI	: Modulation de Largeur d'Impulsion

P_L	: Puissance demandée par la charge
P_T	: Puissance produite par le générateur éolien
P_D	: Puissance produite par le générateur diesel
P_B	: Puissance emmagasinée dans la batterie
Ni-MH	: Nickel Metal Hydride
Ni-Cd	: Nickel Cadmium
SOC	: State of Charge (état de charge de la batterie)
URER.MS	: Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien
NPC	: Net Present Cost (coût net actuel)
COE	: Cost Of Energy (coût d'énergie)

Table des matières

Liste des tableaux	iii
Table des figures	iv
Introduction Générale	xiii
Chapitre 1 Conception d'un système hybride éolien-diesel	4
1.1 Introduction	5
1.2 Système d'énergie hybride SEH	5
1.3 Définition et missions des systèmes hybrides	6
1.4 Architecture des SEH	6
1.4.1 Architecture à bus à CC	8
1.4.2 Architecture mixte à bus à CC/CA	9
1.5 Classification des SEH	11
1.6 Dimensionnement des SEH	11
1.7 Système Hybride Éolien-Diesel (SHED)	12
1.7.1 Description du SHED	13
1.7.2 Principaux composants d'un SHED	14
1.8 Importance de l'hybridation entre l'éolien et le diesel	15
1.9 Régimes de fonctionnement d'un SHED	16
1.10 Nécessité du stockage d'énergie pour le SHED	18
1.11 Conclusion	19
Chapitre 2 Généralités sur les systèmes éoliens	20
2.1 Introduction	21
2.2 Description d'une éolienne	21

2.2.1	La tour	22
2.2.2	La nacelle	22
2.2.3	Le rotor	23
2.3	Différents types d'aérogénérateurs	23
2.3.1	Éoliennes à axe vertical	23
2.3.2	Éoliennes à axe horizontal	25
2.4	Les Systèmes éoliens : principes de fonctionnement	27
2.4.1	Principe de conversion	27
2.4.2	Zones de fonctionnement	28
2.5	Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique	29
2.5.1	Le coefficient de vitesse réduite (tip-speed ratio)	30
2.5.2	Le coefficient de puissance (power coefficient)	30
2.5.3	Le coefficient de couple (torque coefficient)	32
2.5.4	MPPT (Maximal Power Point Tracking)	32
2.6	Différents technologies d'éoliennes	33
2.6.1	Fonctionnement à vitesse fixe	33
2.6.2	Fonctionnement à vitesse variable	34
2.7	Les différentes chaînes de conversion d'énergie	36
2.7.1	Générateurs asynchrones	36
2.7.2	Générateurs synchrones	40
2.8	Modes de contrôle au niveau de la turbine	42
2.8.1	Contrôle par décrochage aérodynamique passif « Passive Stall »	42
2.8.2	Contrôle par décrochage aérodynamique actif « Active Stall »	43
2.8.3	Contrôle par angle de calage variable « Pitch Control »	44
2.9	Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne	44
2.10	Problèmes de la qualité de l'énergie éolienne	46
2.11	Choix d'un site éolien	46
2.12	Application des éoliennes	47
2.12.1	Systèmes isolés	47
2.12.2	Systèmes hybrides	48
2.12.3	Systèmes liés au réseau	48
2.13	Conclusion	48

Chapitre 3 Modélisation énergétique des composants du système éolien-diesel	50
3.1 Introduction	51
3.2 Dimensionnement du système hybride	51
3.3 Modélisation du système éolien	52
3.3.1 Modèle du vent	53
3.3.2 Modèle de la voilure	53
3.3.3 Transmission	57
3.3.4 Modèle de la génératrice synchrone à aimants permanents	59
3.4 Modélisation du générateur diesel	68
3.4.1 Moteur diesel et régulateur de vitesse	70
3.4.2 Modèle simplifié de la machine synchrone	72
3.4.3 Embrayage	74
3.5 Modélisation du système de stockage d'énergie	74
3.6 Contrôle et gestion de l'énergie du système hybride	76
3.7 Conclusion	78

Chapitre 4 Dimensionnement et analyse de l'intégration du SHED en Algérie	79
4.1 Introduction	80
4.2 Évaluation de l'énergie éolienne en Algérie	80
4.3 Caractéristiques du site étudié	82
4.3.1 Situation géographique	82
4.3.2 Données météorologiques de la région d'Adrar	82
4.3.3 Courbe de charge du site étudié	85
4.4 Présentation de l'installation hybride étudiée	86
4.4.1 La turbine éolienne	87
4.4.2 Le générateur diesel	89
4.4.3 Le système de stockage : Batterie	90
4.5 Bilan énergétique du système éolien-diesel	91
4.6 Analyse écologique du système hybride	93
4.7 Analyse technico-économique du système étudié	95
4.8 Comparaison entre les deux systèmes	96
4.8.1 Sur le plan économique	97
4.8.2 Sur le plan environnemental	98

4.9 Conclusion	100
Conclusion Générale et Perspectives	101
Bibliographie	105
Annexes	114
Annexe A Paramètres du système éolien	115
A.1 Données techniques de NORDEX N27-150	115
A.2 Paramètres de la GSAP	116
Annexe B Paramètres du générateur diesel	117
B.1 Données techniques du GD FG Wilson P150-1	117
B.2 Paramètres de moteur diesel	119
Annexe C Système de stockage d'énergie	120
C.1 Paramètres de la batterie Ni-MH	120

Introduction Générale

Introduction générale

La plus forte croissance de la consommation d'énergie ces dernières années sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète. Aujourd'hui, la production de l'énergie électrique dans le monde est à peu près de 80% à partir de combustibles fossiles (pétrole, gaz naturel, etc.) et fissiles (nucléaire) qui sont des ressources épuisables et polluantes à la fois [1].

L'Algérie s'est engagée depuis Kyoto aux politiques en matière de changement climatique. Le changement climatique constitue l'un des plus grands défis de notre époque et le monde entier a pris conscience du fait que les émissions de gaz à effet de serre continuent d'augmenter à l'échelle mondiale. Les problèmes des changements climatiques observés ces dernières années et l'arrivée imminente de la fin de l'ère du pétrole pousse l'Algérie à investir dans le domaine des énergies nouvelles et renouvelables.

La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leurs exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir !. Elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20% de la consommation mondiale d'électricité (en intégrant l'hydroélectricité). Ces énergies regroupent un certain nombre de filières technologiques selon la source d'énergie valorisée et l'énergie utile obtenue. La filière étudiée dans cette thèse est l'énergie éolienne associée par un groupe électrogène diesel. Actuellement, plusieurs pays sont déjà résolument tournés vers l'énergie éolienne, selon le rapport annuel publié par le GWEC (Global Wind Energy Council) pour l'année 2014 [2] : la Chine est le leader mondial avec une puissance installée de 23.351 MW, elle est suivie par l'Allemagne avec 5.279 MW, les États-Unis avec 4.854 MW en troisième position, suivis par le Brésil avec 2.472 MW et l'Inde avec 2.315 MW.

Sachant que les ressources énergétiques renouvelables de l'Algérie sont déjà estimées par le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER) depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie [3]. Le Sud Algérien possède un gisement du vent excellent, ce qui le place en bonne position pour l'exploitation de l'énergie éolienne propre et durable. Le déploiement de cette source dans les sites isolés aura un impact significatif environnemental et économique.

L'utilisation du système d'énergie hybride (éolien-diesel) est de plus en plus utilisé dans diverses applications en sites isolés telles l'éclairage, les télécommunications, la réfrigération ou le pompage. Le principe de fonctionnement de ce système hybride a des avantages techniques, économiques et écologiques on peut se fier à long terme.

Dans ce contexte, l'apport envisagé avec ce travail de recherche est de collaborer à la conception optimale d'un système d'énergie hybride comportant une éolienne, un générateur diesel et un système de stockage d'énergie pour alimenter d'une façon continu un site isolé au Sud Algérien de puissance installée de 120 kW.

Le travail présenté dans cette thèse comprend quatre chapitres :

Dans le premier chapitre après avoir présenté la définition et la mission du système d'énergie hybride (SEH), un état de l'art de ce système est réalisé. Notre travail porte sur un système hybride (éolien-diesel), les principaux composants et les régimes de fonctionnement du SHED a été présenté ainsi que le rôle primordial de l'hybridation entre l'éolien et le diesel pour l'alimentation des sites isolés et éloignés.

Le deuxième chapitre présente une généralité sur les systèmes éoliens, des notions de bases du système éolien ont été données, un aperçu sur les différents composants constituant l'aérogénérateur, les différents types d'éoliennes (à axe vertical, à axe horizontal), 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 leurs domaines d'applications.

Le troisième chapitre est consacré à la modélisation énergétique de chaque composant du système éolien-diesel. La turbine éolienne de type tripale à axe horizontal est modélisée à partir d'un modèle aérodynamique simplifié, la chaîne de conversion éolienne basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents parce qu'elle est très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes. Ensuite, la modélisation du générateur diesel avec ses éléments ainsi que le système de stockage d'énergie. Enfin, un algorithme pour l'optimisation de notre système étudié a été proposé.

Le quatrième chapitre est réservé au dimensionnement et l'analyse de l'intégration du SHED en Algérie, selon les caractéristiques du site choisi, le profil de charge et les données météorologiques fournit par l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) à Adrar. Nous avons fait une étude approfondie sur l'intégration du système éolien-diesel dans ce site en tenant compte des critères techniques, économiques et écologiques. Les résultats de simulation de ce travail de recherche seront aussi présentés dans ce chapitre.

Le travail est clôturé par une conclusion générale et perspectives.

Chapitre 1

Conception d'un système hybride éolien-diesel

1.1 Introduction

La production d'électricité au moyen d'un système hybride combinant plusieurs sources d'énergies renouvelables est d'un grand intérêt pour les pays en voie de développement, comme les pays du Maghreb. Ces pays possèdent de nombreuses régions isolées et éloignées des réseaux classiques de distribution d'électricité. Ainsi, leurs alimentation en énergie électrique aura un coût financier exorbitant. Pour résoudre ce problème, l'exploitation du potentiel en énergies renouvelables dont dispose ces pays doit être une priorité.

Le jumelage « Éolien - Diesel » ou plus simplement l'hybridation, représente une technique de génération d'énergie électrique utilisant en parallèle une ou plusieurs éoliennes avec un ou plusieurs groupes diesel. Le but du système hybride est d'assurer une alimentation à la charge continue sans interruption, en plus les systèmes hybrides permettent la réduction la plus importante de la consommation de diesel et des émissions de Gaz à Effet de Serre (GES) ainsi que la réduction du coût de production de l'électricité, notamment dans les sites isolés [8].

1.2 Système d'énergie hybride SEH

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 inter-connectés et sont souvent utilisés dans les régions isolées mais la présence du générateur diesel dans ce type de système hybride autonome suscite certaines discussions quand aux notions de propreté et de durabilité [9],[10].

Les principaux avantages d'un système hybride sont :

- La possibilité de combiner deux ou plusieurs sources d'énergie renouvelables basée sur les ressources naturelles.

- Protection de l'environnement, notamment en termes de la réduction des émissions de CO_2 .
- Faible coût de l'énergie éolienne.
- La diversité et la sécurité d'approvisionnement.
- Les ressources solaires et éoliennes sont gratuites et inépuisables [11].

1.3 Définition et missions des systèmes hybrides

Un système d'énergie hybride (SEH) est défini comme une installation utilisant deux ou plus des technologies de la génération d'énergies : une ou plusieurs sources de production d'énergie classique (groupe diesel en général) et au moins une source de production d'énergies renouvelables. L'objectif d'utiliser des technologies multiples est de réunir les avantages et les meilleures caractéristiques opérationnelles de chaque système [12],[13].

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

1.4 Architecture des SEH

En plus d'un ou plusieurs générateurs diesels (GD) et d'au moins une source d'énergie renouvelable, un SEH peut aussi incorporer un système de distribution à courant alternatif (CA), un système de distribution à courant continu (CC), un système de stockage, des convertisseurs, des charges, des charges de délestage et une option de gestion des charges ou un système de supervision. Tous ces composants peuvent être connectés en différentes architectures ; celles-ci sont résumées dans la Figure 1.1. Dans la plupart des cas, les systèmes hybrides classiques contiennent deux bus [14] : un bus à CC pour les sources, les charges à CC et les batteries et un bus à CA pour les générateurs à CA et

le système de distribution. Les sources d'énergie renouvelable peuvent être connectées au bus à CA ou à CC en fonction de la dimension et la configuration du système. L'interconnexion entre les deux bus peut être réalisée par l'intermédiaire de l'électronique de puissance : onduleurs/redresseurs ou convertisseurs bidirectionnels. Sachant qu'à part la charge principale, un système hybride peut contenir aussi des charges auxiliaires (charge différée, charge optionnelle, charge de délestage) pour réaliser l'équilibre énergétique. Si la charge principale est alimentée sans interruption, les charges auxiliaires sont alimentées en énergie par ordre de priorité, seulement quand il existe un surplus d'énergie. Ainsi, dans un SEH avec des batteries de stockage et charges auxiliaires, s'il existe un excès d'énergie (venant des sources d'énergie renouvelable et des diesels), celui-ci passera d'abord dans les batteries et ensuite il sera utilisé pour alimenter les autres charges auxiliaires en fonction de leur priorité. Dans un tel système, les batteries de stockage jouent un double rôle : charge et source.

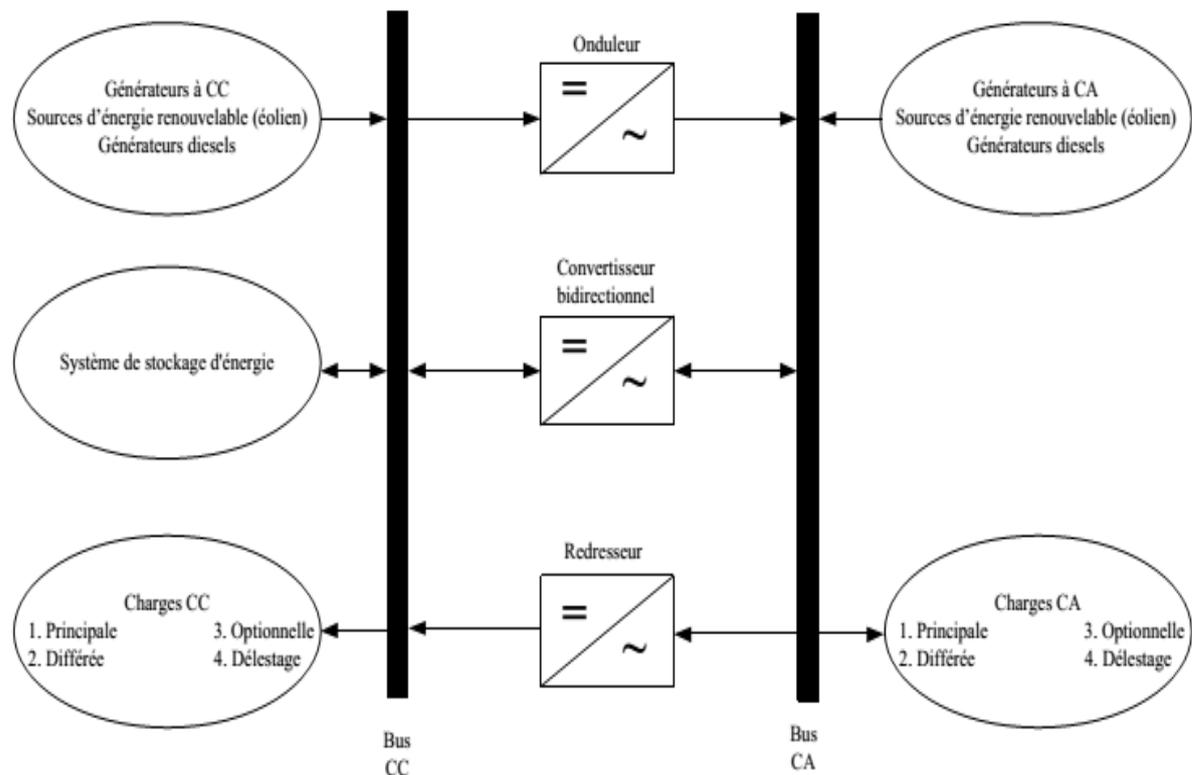


Figure 1.1 – Architecture des SEH

Les générateurs électriques d'un SEH peuvent être connectés en différentes configurations : deux configurations s'imposent parmi les systèmes d'énergie hybrides constitués par des sources d'énergie renouvelable, des batteries et des générateurs diesels qui sont : une architecture à bus à CC et une architecture mixte à bus à CC-CA [15].

1.4.1 Architecture à bus à CC

Dans le système hybride présenté dans la Figure 1.2, la puissance fournie par chaque source est centralisée sur un bus à CC. Ainsi, les systèmes de conversion d'énergie à CA fournissent d'abord leur puissance à un redresseur pour être convertie en CC. Le ou les générateur(s) diesel(s) sont connectés en série avec l'onduleur pour alimenter les charges à CA, sachant que les générateurs diesels ne peuvent donc pas alimenter les charges à CA directement. L'onduleur doit alimenter les charges à CA à partir du bus à CC et doit suivre la consigne fixée pour l'amplitude et la fréquence [16]. Les batteries et l'onduleur sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge, alors que le générateur diesel est dimensionné pour alimenter les pics de charge et les batteries en même temps. La puissance délivrée peut être contrôlée par la commande du courant d'excitation de la partie électrique du générateur diesel ou en incorporant un régulateur de charge dans les sources d'énergie renouvelable. Les avantages et les inconvénients 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.

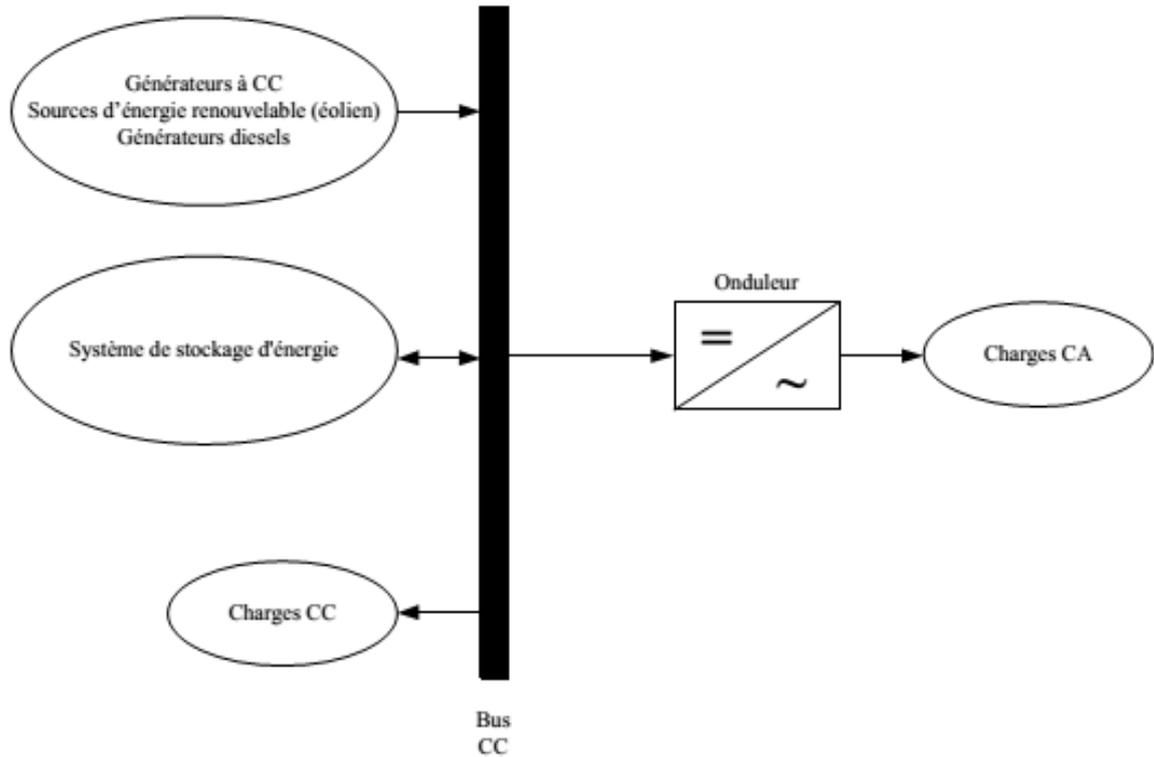


Figure 1.2 – Configuration du SEH à bus CC

1.4.2 Architecture mixte à bus à CC/CA

La configuration à deux bus à CC et à CA est présentée dans la Figure 1.3 ; celle-ci a des performances supérieures par rapport à la configuration antérieure. Dans cette configuration, les sources d'énergie renouvelable et les générateurs diesels peuvent alimenter une partie de la charge à CA directement, ce qui permet d'augmenter le rendement du système et de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur. Le ou les générateur(s) diesel(s) et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle en synchronisant leurs tensions de sortie. Les convertisseurs situés entre les deux bus (le redresseur et l'onduleur) peuvent être remplacés par un convertisseur bidirectionnel, qui en fonctionnement normal réalise la conversion CC/CA (fonctionnement onduleur) [15],[16]. Quand il y a un surplus d'énergie de la part du générateur diesel, il peut aussi charger les batteries (fonctionner en redresseur). L'onduleur bidirectionnel peut alimenter les pics de charge quand le générateur diesel est surchargé. Les avantages et les inconvénients d'un tel système sont

présentés ci-après :

Avantages

- Le GD et l'onduleur peuvent fonctionner en autonome ou en parallèle. Quand le niveau de la charge est bas, l'un ou l'autre peut générer le nécessaire d'énergie. Cependant, les deux sources peuvent fonctionner en parallèle pendant les pics de charge.
- La possibilité de réduire la puissance nominale du GD et de l'onduleur sans affecter la capacité du système d'alimenter les pics de charge.

Inconvénients

- La réalisation de ce système est relativement compliquée à cause du fonctionnement parallèle (l'onduleur doit être capable de fonctionner en autonome et non-autonome en synchronisant les tensions de sortie avec les tensions de sortie du GD).

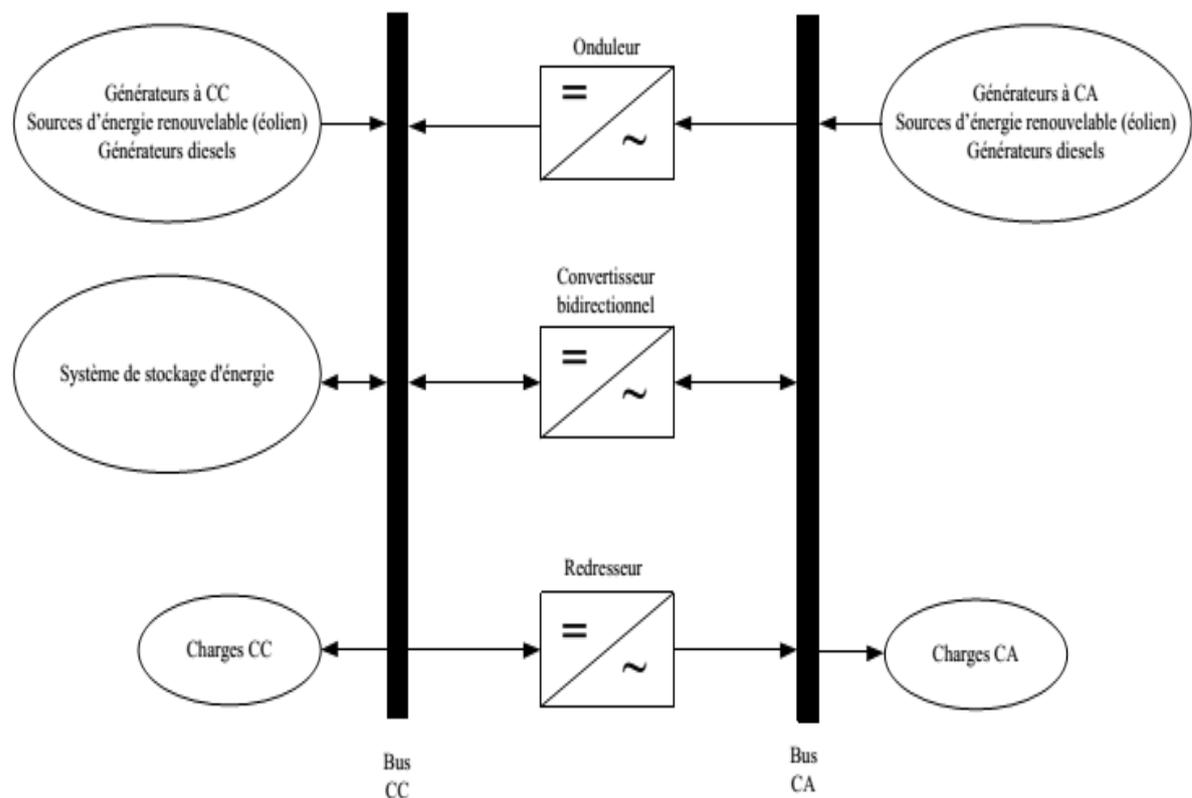


Figure 1.3 – Configuration du SEH à deux bus à CC et à CA

1.5 Classification des SEH

Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent, il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance (Tableau 1.1).

Tableau 1.1 – Classification des SEH par gamme de puissance

Puissance du SEH [kW]	Application
Faible : < 5	Systèmes autonome : stations de télécommunications, pompage d'eau, autres applications isolées
Moyenne : 10-250	Micro réseaux isolés : alimentation d'un village isolé, des zones rurales...
Grande : > 500	Grands réseaux isolés (ex : réseaux insulaires)

Les sites isolés peuvent être classifiés en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable [17].

Le Taux de pénétration en puissance (TPP) est défini comme le rapport entre la puissance éolienne installée et la puissance maximum de la charge. Tandis que le taux de pénétration en énergie (TPE) est défini comme le rapport entre l'énergie éolienne annuelle produite et l'énergie consommée par la charge. Le SHED est dit à haute pénétration si le $TPP > 1$.

1.6 Dimensionnement des SEH

La conception des SEH exige la sélection et le dimensionnement de la combinaison la plus appropriée des sources d'énergie, des convertisseurs et du système de stockage, ainsi que l'implantation d'une stratégie de fonctionnement efficace [18],[20]. De plus, pour

obtenir un taux de pénétration important des sources d'énergie renouvelable, sans la dégradation de la qualité de l'énergie fournie, une étude de dimensionnement du système hybride s'impose [19].

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

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

Il existe plusieurs logiciels de dimensionnement et de simulation des SEH [21],[22] : HOMER, SOMES, RAPSIM, SOLSIM, INSEL....Tous ces logiciels ont pour but d'optimiser les systèmes hybrides, mais les stratégies d'optimisation sont différentes.

1.7 Système Hybride Éolien-Diesel (SHED)

Dans les systèmes isolés qui associent des turbines éoliennes et des machines génératrices diesel la distribution est faite en CA. Cette association de système de génération est nommée (wind-diesel). Ces systèmes produisent de l'énergie avec une ou plusieurs sources éoliennes afin de réduire la consommation du carburant tout en gardant une qualité de l'énergie acceptable. Sachant que économiquement la justification de l'investissement du choix de l'équipement nécessaire pour en profiter du maximum de l'énergie du vent doit influencer sur la récupération de l'économie réalisée sur le carburant. A cause de la grande quantité de mini-réseaux isolés dont l'énergie primaire est le pétrole, dans les pays développés ou dans les pays en voie de développement, le marché pourra réadapter ces systèmes en systèmes hybrides avec des sources renouvelables de faible coût, comme l'éolien, est substantiel [11].

1.7.1 Description du SHED

En générale, la conception préliminaire du SHED prévoit la génération de l'électricité en utilisant en parallèle une source d'énergie classique (groupe électrogène diesel) déjà existante et une source d'énergie renouvelable (éolienne) comportant un seul modèle de turbines. En plus de ces deux principaux éléments, le SHED peut aussi incorporer des convertisseurs statiques et dynamiques, un système de stockage, des charges principales et de délestages et un système de surveillance, etc. Tous ces composants peuvent être connectés selon différentes architectures, l'architecture de notre étude est présentée dans la Figure 1.4 [23].

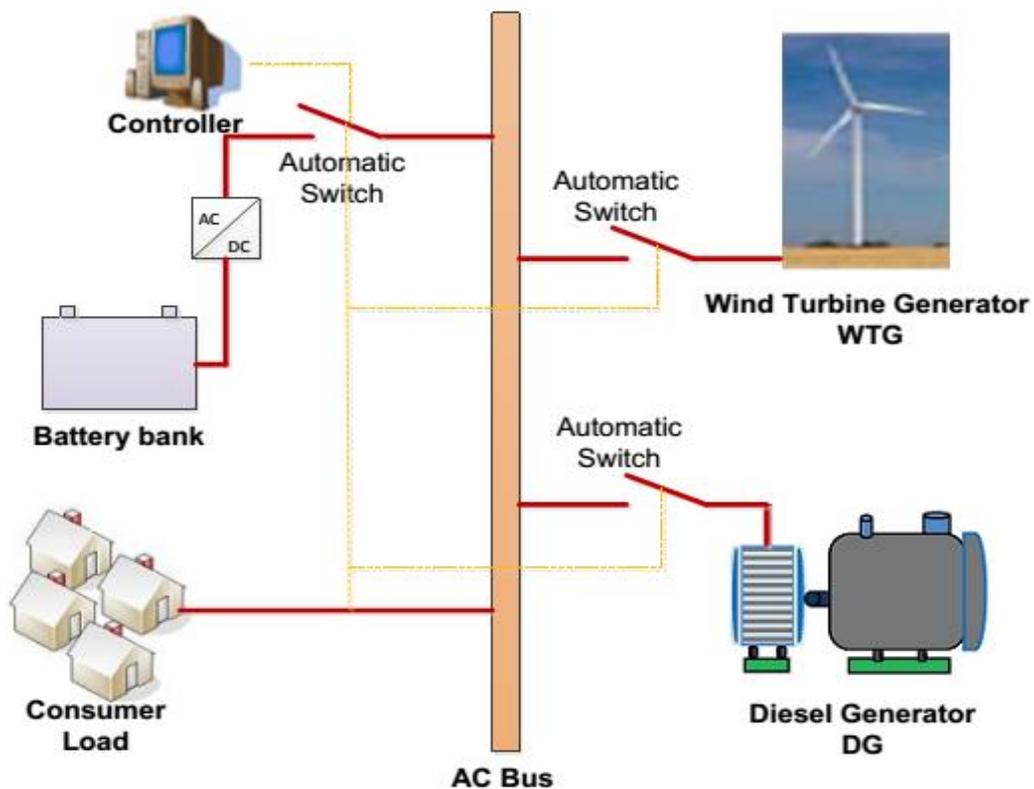


Figure 1.4 – Schéma du système hybride éolien-diesel

1.7.2 Principaux composants d'un SHED

1. Éolienne

L'éolienne, fiable et rentable représente la source d'énergie idéale pour de nombreuses applications. Les éoliennes existent en plusieurs dimensions, la technologie largement dominante aujourd'hui est celle à axe horizontal, à turbine tripale, 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 les machines asynchrones et synchrones sous leurs diverses variantes. La Figure 1.5 c'est l'exemple de la ferme éolienne d'Adrar qui dispose désormais d'une capacité de 10 MW [25].



Figure 1.5 – La ferme éolienne d'Adrar

2. Groupe électrogène diesel

Les groupes électrogènes utilisés actuellement pour assurer les besoins en électricité des communautés vivant dans les régions éloignées sont des moteurs fonctionnant au diesel et

couplés directement à des générateurs synchrones à rotor bobiné, (Figure 1.6). Pour pouvoir assurer en tout temps la qualité de l'électricité fournie (tension et fréquence stables), un régulateur de tension triphasé agit sur l'excitation des alternateurs synchrones pour s'opposer aux variations de tension. De même, la fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse sur le moteur diesel [26]. Le gouverneur fonctionne en ajustant la quantité de carburant injectée dans les moteurs diesel, pour s'opposer aux variations de la vitesse du moteur et du générateur afin de les garder constantes. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré. L'embrayage découple le GS au MD dans le cas des vents forts.

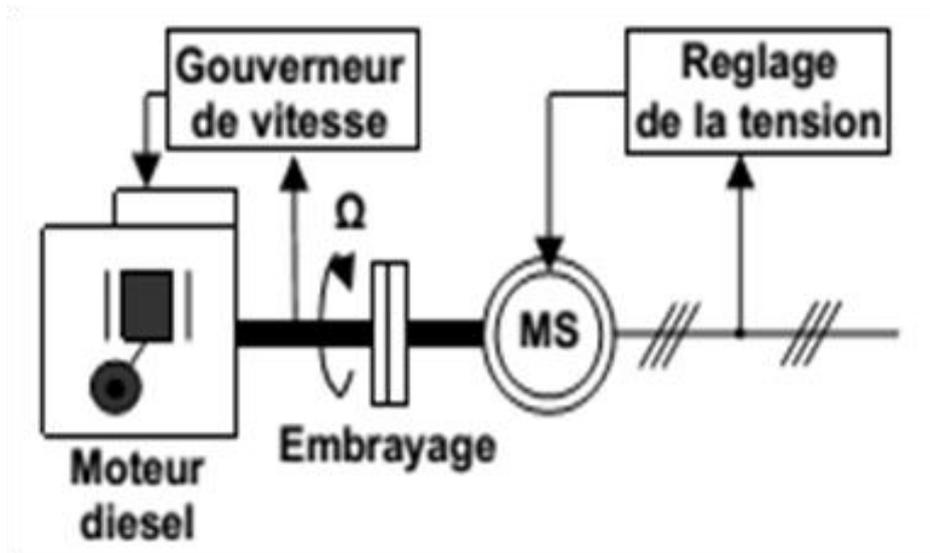


Figure 1.6 – Configuration du générateur diesel

1.8 Importance de l'hybridation entre l'éolien et le diesel

Le SHED (Figure 1.4) représente une solution intéressante pour l'électrification des consommateurs dans les sites isolés même s'il est très complexe comparativement aux

solutions courantes mono-source. Le SHED présente par contre un intérêt évident considérable par sa flexibilité incomparable, sa souplesse de fonctionnement et son prix de revient vraiment attractif [12],[13],[14]. Ceci permet d'optimiser au maximum le système de production d'électricité, aussi bien du point de vue technique et économique.

Cette façon de concevoir l'intégration éolienne :

1. génère des économies de carburant beaucoup plus intéressantes qu'une génératrice diesel fonctionnant seule.
2. permet de réduire les déficits d'exploitation des réseaux autonomes en apportant des économies sur l'entretien et sur le coût de remplacement des groupes diesels.
3. assurant en tout temps l'énergie suffisante demandée par la charge et c'est possible produisant le maximum d'énergie à partir des éoliennes, tout en maintenant une qualité déterminée d'énergie fournie [12],[27].
4. permet de palier pendant une durée limitée une indisponibilité partielle ou totale de la source d'énergie (vent).

Un système hybride éolien-diesel doit notamment :

1. obéir à des règles d'exploitation en temps réel basées sur une priorité économique des ressources énergétiques disponibles.
2. compter sur une gestion automatisée des composants du système afin de garantir la stabilité du système en tout temps en incluant les transitions entre les différents modes d'opération du système.

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

1.9 Régimes de fonctionnement d'un SHED

Suivant l'intensité du vent, trois modes de fonctionnement peuvent être distingués pour les systèmes à haute pénétration (Figure 1.7), [28].

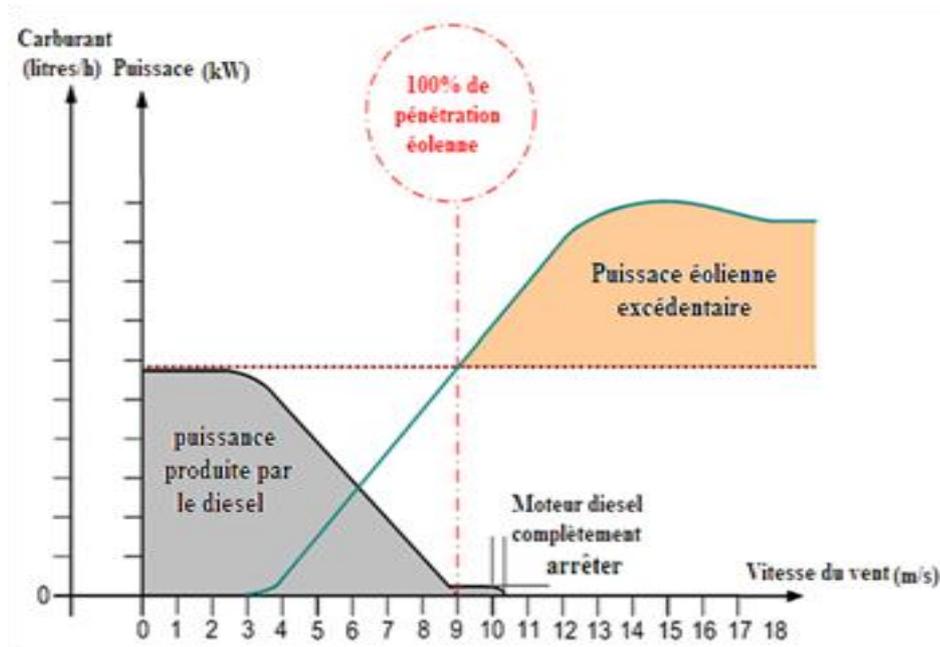


Figure 1.7 – Variation de la puissance produite par un SHED et la consommation du carburant

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

2. Vents moyens ($3\text{m/s} < v_w \leq 10\text{m/s}$) : diesels et éoliennes en service (Wind-Diesel WD) : Lorsque les vents sont d'intensité moyenne la puissance de l'éolienne n'est généralement pas suffisante pour fournir à elle seule la totalité de la demande. Les éoliennes contribuent à fournir une partie de la puissance demandée par la charge et le groupe électrogène fournit alors la différence. Ceci permet de diminuer l'apport des diesels et par conséquent de réaliser des économies. Dans ce mode de fonctionnement, les régulations de tension et de fréquence sont réalisées par le groupe électrogène.

3. Vents forts ($v_w > 10\text{m/s}$) : éoliennes seules (Wind Only WO) : Avec des vents suffisamment forts pour que la production éolienne soit supérieure à la demande, il est alors possible d'arrêter complètement les groupes diesels. Une configuration connue mais

non unique consiste à utiliser un embrayage unidirectionnel entre les diesels et les génératrices synchrones afin de découpler ces dispositifs [29],[30]. Les diesels étant arrêtés et découplés des machines synchrones, ces dernières n'entraînent aucune charge. Dans le cas où l'éolienne satisfait la demande de la charge, le surplus de l'énergie doit être stocké dans les batteries pour l'utilisation de secours.

1.10 Nécessité du stockage d'énergie pour le SHED

La puissance produite au fil du temps par les éoliennes est caractérisée par sa fluctuation due au fait que le vent est une source primaire difficilement prévisible et très fluctuante; ceci augmente les problèmes induits par l'intégration en grand nombre d'éoliennes dans les réseaux et rend difficile leur participation à la gestion du système (réglage de la tension et de la fréquence, fonctionnement en îlotage, etc.).

La demande d'énergie par les consommateurs n'a pas la même répartition dans le temps et des problèmes de déphasage de l'énergie produite et de l'énergie consommée surgissent. Or, la stabilité du réseau repose sur l'équilibre entre production et consommation; l'augmentation du taux de pénétration des éoliennes sera donc conditionnée par leur participation à ces différents services ce qui sera favorisé par l'association à ces éoliennes et des systèmes de stockage de l'énergie électrique.

Le stockage représente alors la clé de la pénétration de l'énergie éolienne sur le réseau électrique. Il fournit non seulement une solution technique au gestionnaire du réseau pour assurer en temps réel l'équilibre production consommation mais il permet également d'utiliser au mieux les ressources renouvelables en évitant un délestage en cas de surproduction. Associé à une production locale d'origine renouvelable, un stockage décentralisé présenterait également l'avantage d'améliorer la robustesse du réseau électrique en permettant un fonctionnement en îlotage de la zone alimentée par cette ressource [31].

1.11 Conclusion

Les systèmes d'énergie hybrides (SEH) associent au moins deux technologies complémentaires : une ou plusieurs sources d'énergie classiques, généralement des générateurs diesels, et au moins une source d'énergie renouvelable [12],[13]. Les sources d'énergie comme l'éolienne, le photovoltaïque, la biomasse, la géothermie, l'hydraulique, etc. sont des sources d'énergie renouvelable propres et durables, c'est dans cet objectif que vient s'insérer notre étude sur l'énergie éolienne dans le chapitre suivant.

Chapitre 2

Généralités sur les systèmes éoliens

2.1 Introduction

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent, elle est en partie d'origine de l'énergie solaire. En effet, les grands flux de circulation atmosphérique sont en grande partie provoqués par la différence de température entre l'équateur et les pôles. Du fait de cette différence de pression, un flot d'air s'établit entre ces régions. La rotation de la terre provoque également des circulations d'air. Des différences locales de pressions et de températures sont à l'origine des circulations particulières comme les brises de mer et les tornades.

L'énergie éolienne est une énergie propre et renouvelable qui ne produit ni pollution, ni déchet. De plus, l'intérêt actuel pour l'énergie éolienne provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergies propres durables où on peut se fier à long terme. L'aérodynamique et l'ingénierie moderne ont permis d'améliorer les éoliennes. Maintenant, elles offrent une énergie fiable, rentable, non polluante pour les applications particulières telles que des communautés isolées et pour les applications nationales [32].

2.2 Description d'une éolienne

Une éolienne est constituée par une tour au sommet de laquelle se trouve la nacelle. Étant donné que la vitesse du vent augmente lorsque l'on s'éloigne du sol, une tour peut mesurer entre 50 et 80 m de hauteur. Typiquement une éolienne de 1 MW a une hauteur de 80 mètres, la tour a la forme d'un tronc en cône où à l'intérieur sont disposés les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, les appareillages de connexion au réseau de distribution ainsi que l'échelle d'accès à la nacelle regroupant tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande [33].

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux qui sont :

2.2.1 La tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble (rotor, nacelle) pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle) de manière à s'adapter à différents sites d'implantation [34].

2.2.2 La nacelle

Elle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbre lent et rapide, multiplicateur ainsi que le frein qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau [35]. [34] présente les différents composants d'une nacelle :

- Le multiplicateur de vitesse : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 3 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor, nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

2.2.3 Le rotor

Formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre des pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire.

Les pales se caractérisent principalement par leur géométrie dont dépendront les performances aérodynamiques et les matériaux dont elles sont constituées [35].

2.3 Différents types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées, deux familles de voilure existent : les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT).

2.3.1 Éoliennes à axe vertical

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

Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivants :

- Elle vous permet de placer la génératrice, le multiplicateur, etc. à terre.
- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne.

De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

Le rotor de « Savonius » dont le fonctionnement est basé sur le principe de traînée différentielle utilisé dans les anémomètres : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure 2.1.a), [35].

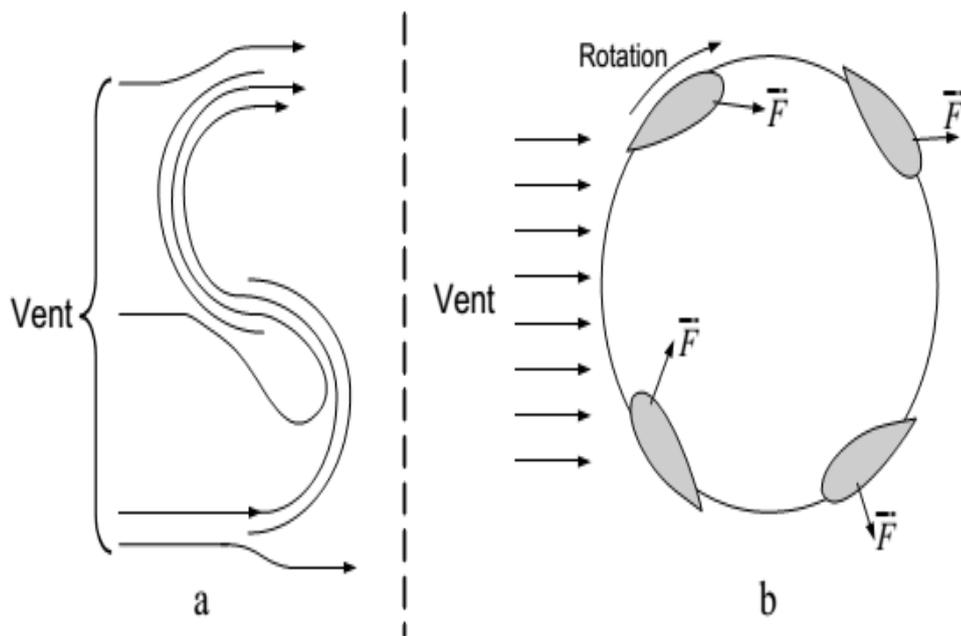


Figure 2.1 – Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable

Les éoliennes à variation cyclique d'incidence dont la structure la plus répandue est celle de « Darrieus ». Leur fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles (Figure 2.1.b) est soumis à des forces de direction et d'intensité variables. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela signifie que la rotation du dispositif ne peut pas s'amorcer d'elle-même. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation de la génératrice en moteur).

Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. En effet la présence du capteur d'énergie près du sol l'expose aux turbulences et au gradient de vent ce qui réduit son efficacité. Elles sont de plus exposées à des problèmes d'aéroélasticité dus aux fortes contraintes qu'elles subissent. Enfin la surface qu'elles occupent au sol est très importante pour les puissances élevées [35],[37].

Dés 1988 Naqra et Dubé étudient dans [36] le cas des turbines pour les éoliennes à axe vertical associés à des machines à rotor bobiné. Les simulations montrent que l'ondulation de la puissance électrique est sensiblement réduite et que le fonctionnement est stable lorsque la vitesse du vent varie.



Figure 2.2 – Éoliennes à axe vertical

2.3.2 Éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent [37]. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiques de la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en

vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et la position du récepteur à plusieurs dizaines de mètres du sol privilégie leur efficacité. Notons cependant que certains travaux défendent la viabilité du rotor vertical en réalisant des études multicritères [35].

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais leur faible rendement aérodynamique ainsi que les fluctuations élevées de la puissance électrique générée les ont écartées du marché [38].



Figure 2.3 – Éoliennes à axe horizontal

2.4 Les Systèmes éoliens : principes de fonctionnement

2.4.1 Principe de conversion

Un système éolien, quelque soit sa technologie convertit l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [39] :

- Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

Suivant la technologie utilisée la connexion de la génératrice au réseau se fait soit directement, soit par l'intermédiaire total ou partiel d'une interface d'électronique de puissance. Une transmission mécanique assure la liaison entre la turbine et le rotor de la génératrice. Ce principe général de conversion est illustré sur la Figure 2.4.

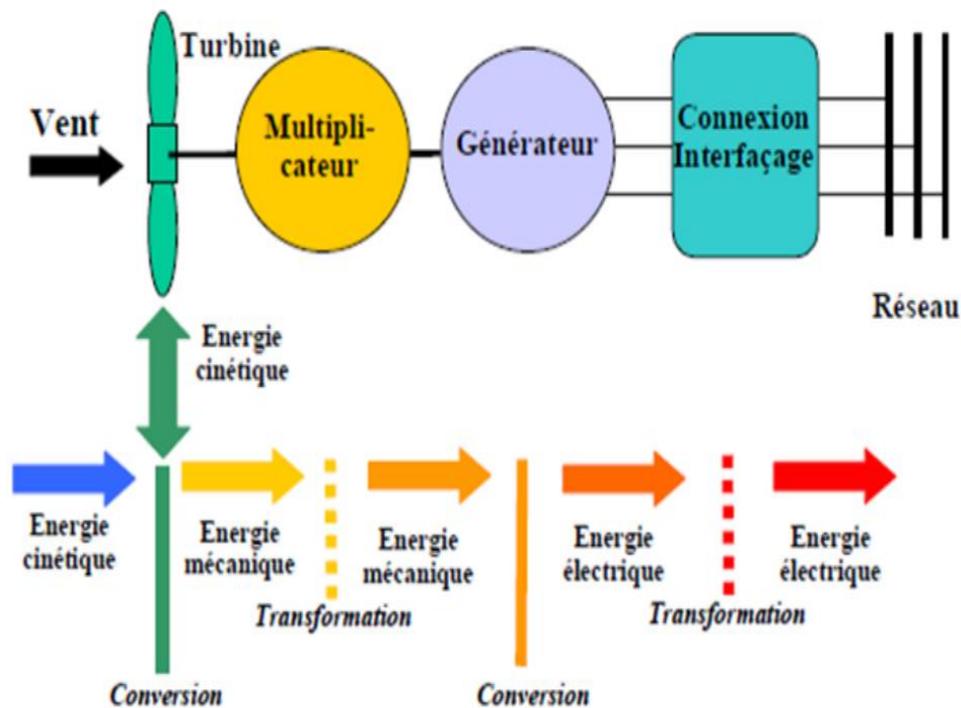


Figure 2.4 – Principe de la conversion d'énergie d'une éolienne

2.4.2 Zones de fonctionnement

Suite à la conversion réalisée par la turbine on va distinguer quatre zones de fonctionnement en fonction de la vitesse du vent (Figure 2.5), [40] :

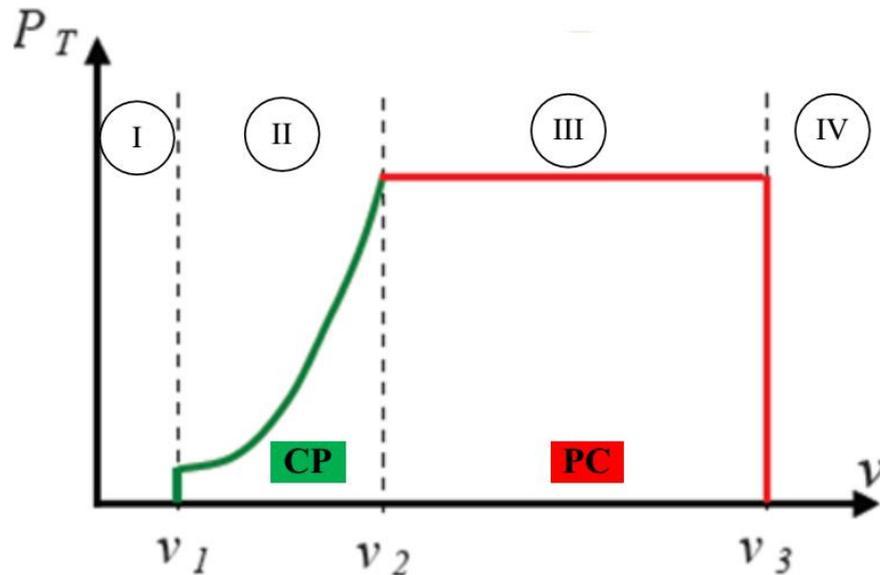


Figure 2.5 – Zones de fonctionnement des éoliennes

v_1 : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs, v_1 varie entre 2.5 m/s et 4 m/s pour les éoliennes de forte puissance.

v_2 : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs, v_2 varie entre 11.5 m/s et 15 m/s en fonction des technologies.

v_3 : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes, v_3 vaut 25 m/s.

Zone I ($v < v_1$) :

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

Zone II ($v_1 < v < v_2$) : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle (CP).

Zone III ($v_2 < v < v_3$) : La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de puissance nominale (P_n). Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge (PC).

Zone IV ($v > v_3$) :

La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

2.5 Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur. L'énergie cinétique dE d'une colonne d'air de longueur dl , de section S , de masse volumique ρ animée d'une vitesse v_v (voir Figure 2.6) peut s'écrire [41] :

$$dE = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot dl \cdot v_v^2 \quad (2.1)$$

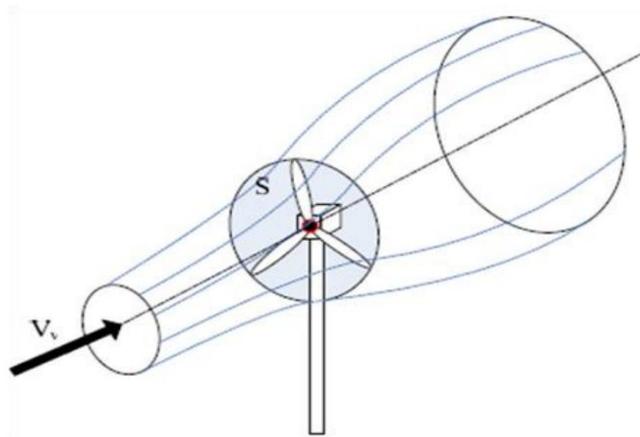


Figure 2.6 – Conversion aérodynamique en énergie électrique

En supposant que $dl = v_v \cdot dt$, on tire l'expression de la puissance P de la masse d'air traversant la section S et se déplaçant à la vitesse v_v :

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_v^3 \quad (2.2)$$

En réalité, la puissance récupérée par une voilure éolienne est seulement un pourcentage de cette puissance. Pour cela, nous allons présenter des notions fondamentales sur la conversion aérodynamique dans les parties suivantes :

2.5.1 Le coefficient de vitesse réduite (tip-speed ratio)

Le coefficient de vitesse réduite λ est un facteur spécifique des aérogénérateurs, il est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales $\Omega \cdot R_v$ sur la vitesse instantanée du vent v_v (voir Figure 2.7). Alors :

$$\lambda = \frac{\Omega \cdot R_v}{v_v} \quad (2.3)$$

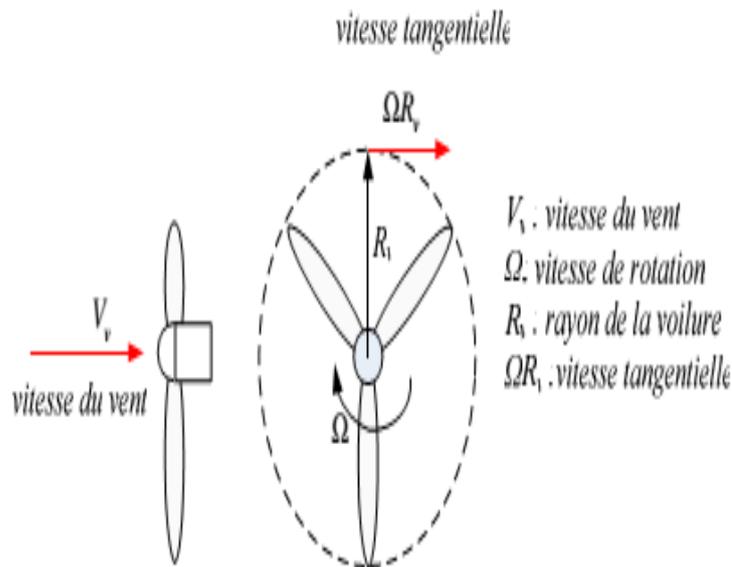


Figure 2.7 – Vitesse du vent et vitesse tangentielle au bout des pales

2.5.2 Le coefficient de puissance (power coefficient)

Comme nous l'avons souligné précédemment, on ne peut pas capter en totalité la puissance fournie par la masse d'air (P), cela supposerait une vitesse de vent nulle après

l'organe capteur. On définit le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p = \frac{P_{eol}}{P} = \frac{P_{eol}}{\frac{1}{2}\rho.S.v_v^3} \quad (2.4)$$

Avec :

P_{eol} : Puissance captée par la turbine éolienne (W).

S : Surface balayée par la turbine éolienne (m^2).

ρ : Masse volumique de l'air ($kg.m^{-3}$), dont la valeur dépend de la hauteur où est installée la turbine.

Ainsi, la puissance éolienne est déterminée analytiquement par formule suivante :

$$P_{eol} = \frac{1}{2}\rho.C_p.S.v_v^3 \quad (2.5)$$

Le coefficient C_p est une grandeur variable en fonction de λ et l'angle de calage β , la valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz [42], est de $16/27 \approx 0.5926$.

Le coefficient de puissance est différent pour chaque type de turbine comme indiqué sur la Figure 2.8, [43].

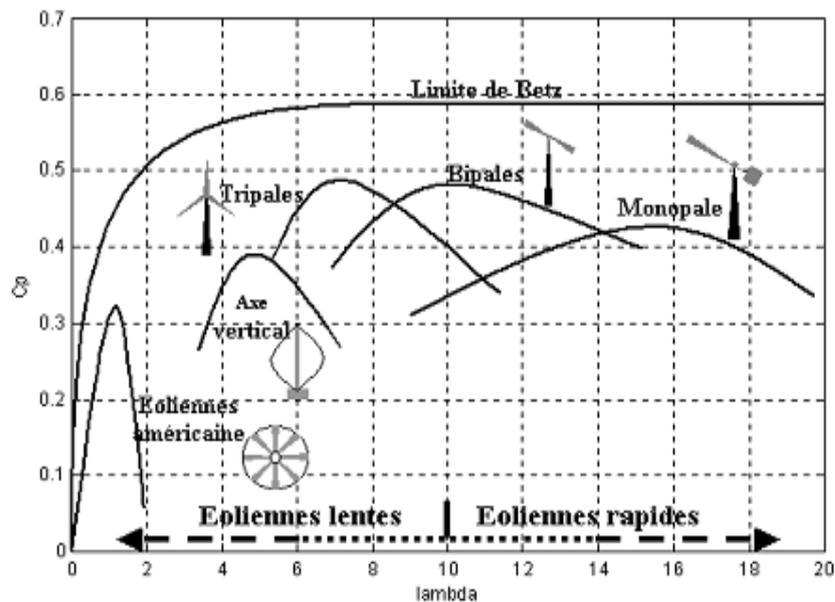


Figure 2.8 – Coefficient de puissance pour différents types de turbine

2.5.3 Le coefficient de couple (torque coefficient)

Le coefficient de couple est fort utile afin de calculer la valeur des couples produits pour différents points de fonctionnement notamment à vitesse de rotation Ω nulle. En effet, au démarrage il y a bien un couple sur l'arbre dû à la force du vent sur les pales tandis que la puissance est nulle ce qui correspond à une valeur de C_p nulle. L'expression du couple est la suivante :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega} = \frac{P_{eol} \cdot R_v}{\lambda \cdot v_v} = \frac{C_p}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R_v^3 \cdot v_v^2 \quad (2.6)$$

Alors, la valeur du coefficient de couple C_T est déterminée par la formule suivante :

$$C_T = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{C_{eol}}{\frac{1}{2} \rho \cdot \pi \cdot R_v^3 \cdot v_v^2} \quad (2.7)$$

Le coefficient C_T s'exprime comme le coefficient C_p en fonction de la vitesse du vent v_v et de la vitesse de rotation de la turbine Ω , donc en fonction du ratio de vitesse λ [42], [43].

2.5.4 MPPT (Maximal Power Point Tracking)

Un dispositif « MPPT » de l'anglais Maximum Power Point Tracking correspond à une stratégie de gestion permettant de suivre le point de puissance maximale d'un générateur électrique non linéaire. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens à travers une électronique de puissance permettant de maximiser l'efficacité énergétique du système à travers la variation de la vitesse du vent [41].

Par exemple, la Figure 2.9 montre que la MPPT d'une éolienne de type tripale à vitesse du vent variable : la courbe de puissance en forme de cloche, typique des éoliennes et donnée pour chaque vitesse du vent, présente un point de puissance maximale. De plus en plus souvent les génératrices sont donc reliées à un convertisseur électronique de puissance contrôlé qui permet de réaliser cette fonction.

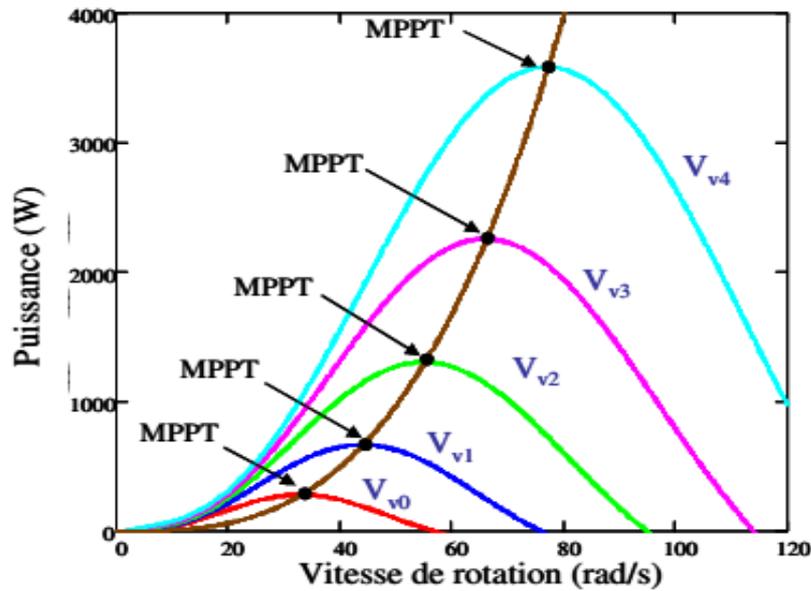


Figure 2.9 – Points de MPPT d'une éolienne tripale avec la vitesse du vent

2.6 Différents technologies d'éoliennes

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est fixe et celles dont la vitesse variable.

2.6.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un faible coût. Cela permet une installation rapide de centaines de kW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éoliennes dont la puissance est supérieure au MW ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir pour cette gamme de puissance. La configuration à vitesse fixe peut être représentée d'une manière simplifiée par le schéma de la Figure 2.10. La chaîne de conversion de l'énergie éolienne est composée de la turbine, le multiplicateur de vitesse et de la génératrice [44].

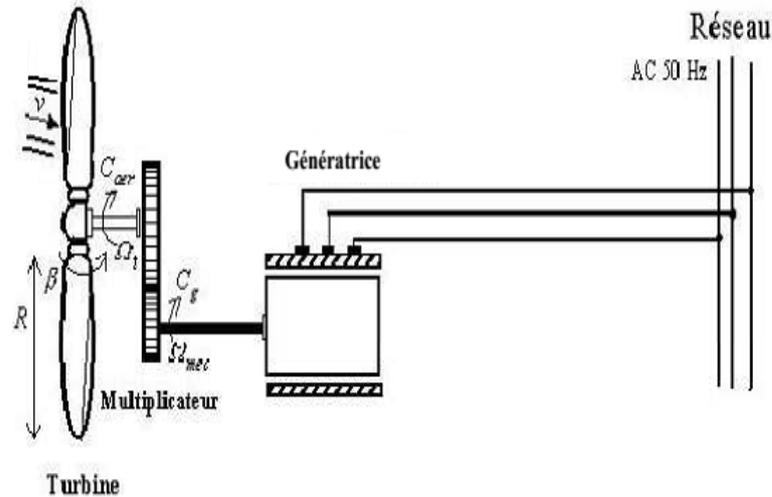


Figure 2.10 – Éolienne à vitesse fixe

Les avantages de la vitesse fixe

- Simplicité d'implantation.
- Plus grande fiabilité.
- Absence du système électronique de commande.
- Peu onéreuse [33],[38].

Les inconvénients de la vitesse fixe

- En vitesse fixe le maximum théorique de puissance n'est pas atteint [45].
- Le coût de maintenance essentiellement imputé au multiplicateur est élevé et on ne peut pas contrôler l'énergie réactive.

2.6.2 Fonctionnement à vitesse variable

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la Figure 2.11. La configuration de la Figure 2.11.a est basée sur une machine asynchrone à cage pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable par des convertisseurs statiques. La configuration de la Figure 2.11.b est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance qui est situés au circuit rotorique [44].

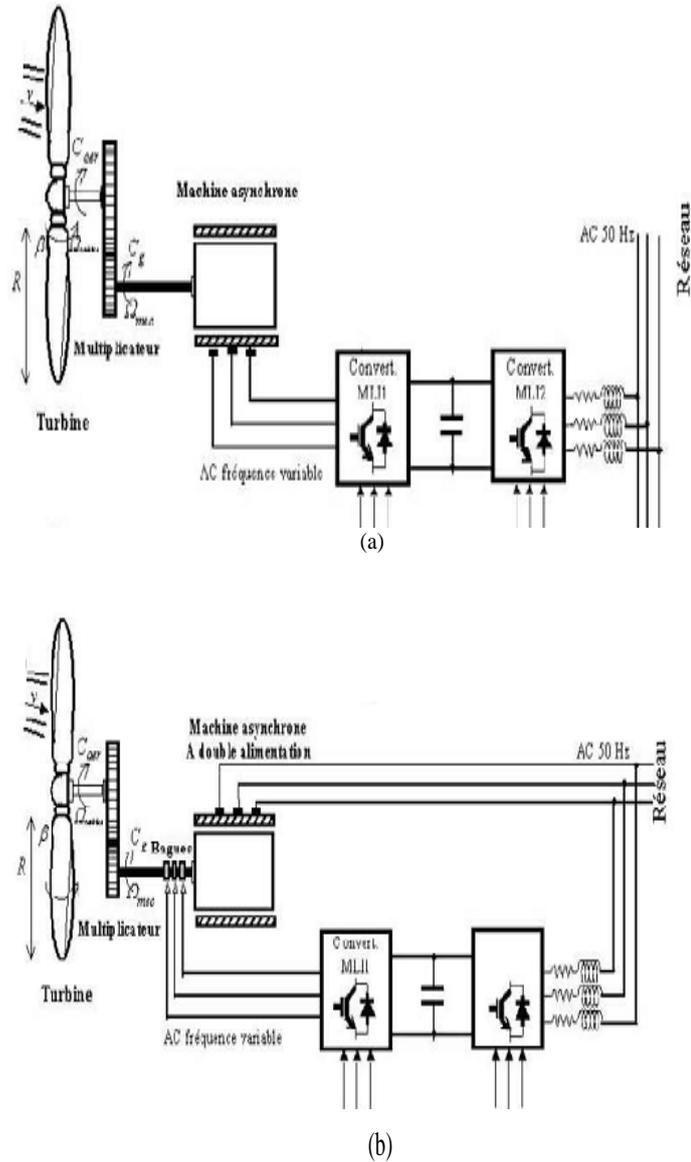


Figure 2.11 – Éoliennes fonctionnant à vitesse variable

Les avantages de la vitesse variable

- Une meilleure exploitation de l'énergie du vent.
- La réduction des oscillations du couple et des efforts mécaniques [33].

Les inconvénients de la vitesse variable

- L'inconvénient principal du raccordement indirect au réseau est son coût.
- Convertisseur de puissance « complexe » [45].
- Perte énergétique lors du processus de conversion CA-CC-CA.

2.7 Les différentes chaînes de conversion d'énergie

On peut regrouper les générateurs éoliens selon différentes catégories, ils peuvent être classés selon :

- La nature du convertisseur électromécanique (machine synchrone, asynchrone, à courant continu, etc.).
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- Le type de fonctionnement (vitesse fixe ou variable).
- Le type de capteur (à axe vertical ou horizontal).
- Ces différentes catégories peuvent se croiser par exemple, une éolienne peut être à vitesse variable, posséder un multiplicateur de vitesse et une génératrice asynchrone [46].

2.7.1 Générateurs asynchrones

Dans le domaine de la génération d'énergie éolienne, les machines asynchrones à cage dominent encore car elles offrent des performances attractives en termes de coût d'investissement, tout particulièrement dans les solutions de base où elles sont directement connectées au réseau. Mais lorsqu'il s'agit de réaliser un entraînement à vitesse variable, on leur préfère plutôt des machines à rotor bobiné doublement alimentées qui offrent d'excellents compromis (performances/coût), [47].

1. Machine asynchrone à cage d'écureuil

Les premières éoliennes de grande puissance mises en œuvre reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique. Grâce à ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues les rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que représente l'énergie éolienne. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales. La machine fonctionne alors en hypersynchronisme. La rotation des pales par des actionneurs électriques ou hydrauliques, per-

met l'augmentation de l'angle de calage. La puissance peut alors être limitée à la puissance nominale de la génératrice.

En cas d'un vent fort, cette technique permet la mise en drapeau des pales ($\beta = 90^\circ$). Ce type de convertisseurs électromécaniques est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau. Celui-ci peut-être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités représentées sur la Figure 2.12, [48], qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne [33],[35],[46].

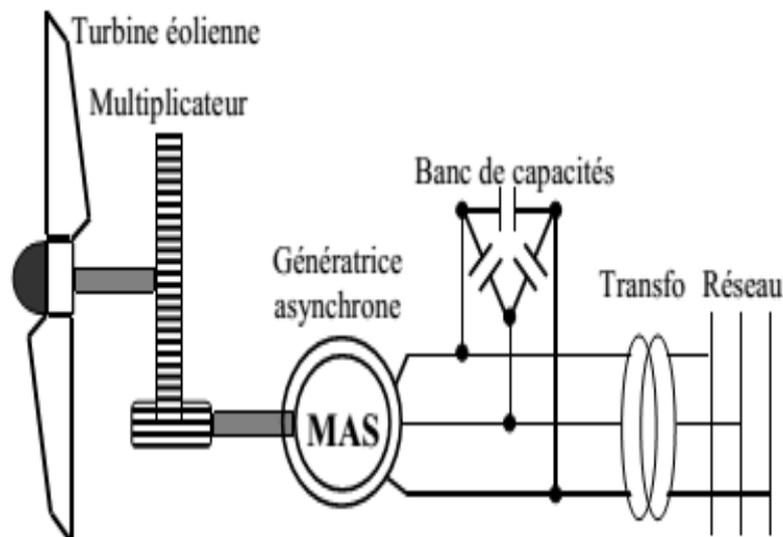


Figure 2.12 – Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe

La génératrice asynchrone à cage peut fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance et peut générer une production de puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse de vent. L'emploi de deux convertisseurs de puissance permet de découpler la fréquence du réseau de la fréquence variable des courants de la machine par la création d'un bus continu intermédiaire. Avec une telle structure, les fluctuations rapides de la puissance générée peuvent être filtrées par le condensateur en autorisant une variation de la tension du bus continu sur une plage donnée. Ces convertisseurs sont dimensionnés pour 100% de la puissance nominale de la génératrice ceci augmente significativement le coût de l'installation et les pertes.

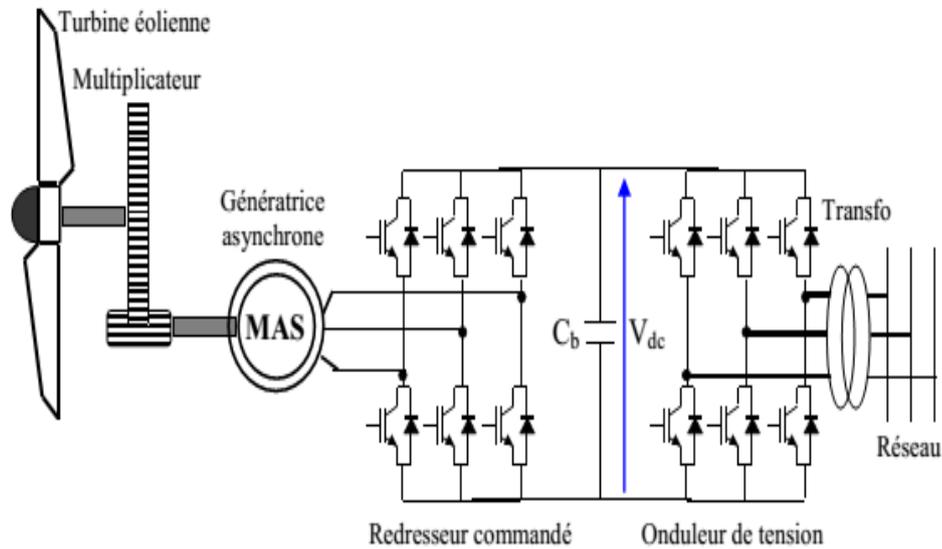


Figure 2.13 – Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse variable

Avantages des génératrices asynchrones

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.

Inconvénients des génératrices asynchrones

- Électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale.

2. Machine asynchrone à rotor bobiné

Les machines asynchrones à rotor bobiné offrent un potentiel économique très attractif pour la variation de vitesse. Malgré un sur-coût (machines non standards et construction plus complexe) par rapport à une machine à cage et la présence d'un système bagues-balais triphasé, elles permettent d'exploiter des variateurs électroniques de puissance réduite. Notons que l'usure des contacts tournants occasionne une maintenance plus importante (environ 1 à 2 ans pour les balais et 10 ans pour les bagues) que celle des machines à cage, ce qui constitue un inconvénient, en particulier pour les systèmes offshore.

Actuellement, la majorité des projets éoliens supérieurs à 1 MW reposent sur l'utilisation de la machine asynchrone pilotée par le rotor, son circuit statorique est connecté directement au réseau électrique.

Un second circuit placé au rotor est également relié au réseau mais par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance. Étant donné que la puissance rotorique transitée est moindre, le coût des convertisseurs s'en trouve réduit en comparaison avec une éolienne à vitesse variable alimentée au stator par des convertisseurs de puissance. C'est la raison principale pour laquelle on trouve cette génératrice pour la production en forte puissance.

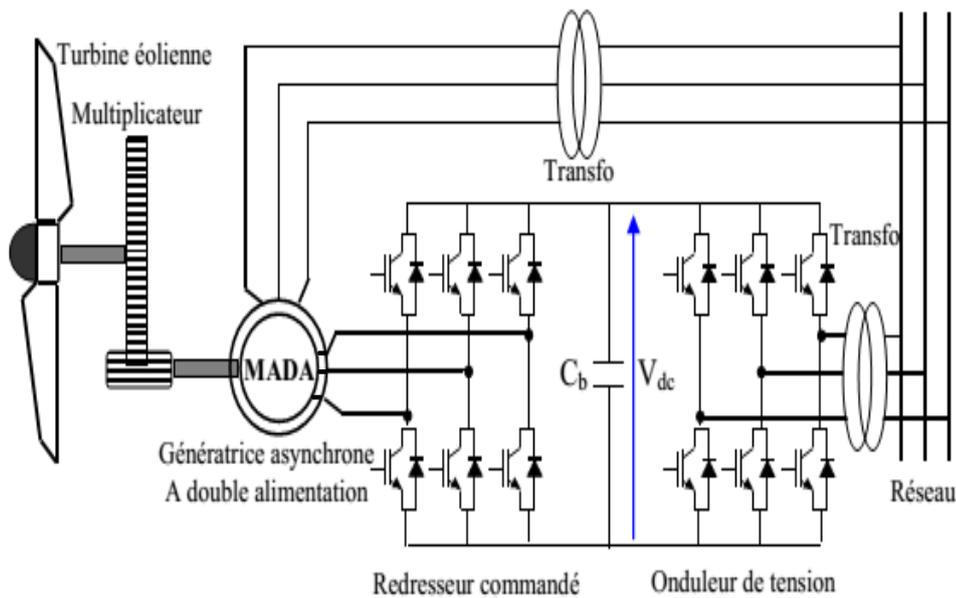


Figure 2.14 – Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable

L'éolienne dans cette configuration entraîne une génératrice asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur de puissance situé sur le circuit statorique. Contrairement à une éolienne à vitesse fixe, les tensions et les fréquences à la sortie de la génératrice ne sont plus imposées par le réseau, ce qui permet de réguler la vitesse de l'éolienne [32].

Avantages de la génératrice asynchrone à double alimentation :

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.
- Électronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale.
- Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse nominale).

Inconvénients de la génératrice asynchrone à double alimentation :

- Maintenance du multiplicateur.
- Commande complexe.
- Oscillations mécaniques.

2.7.2 Générateurs synchrones

1. Machine synchrone à rotor bobiné

Ce type de machines fait appel le plus souvent à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante [35],[49].

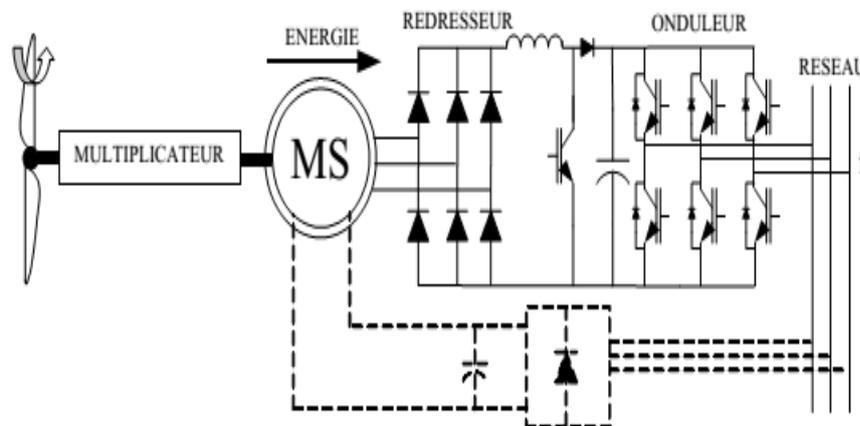


Figure 2.15 – Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur-hacheur-onduleur MLI

2. Machines synchrones à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications pour les éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (un bon rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le

circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, les différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentent des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance [48].

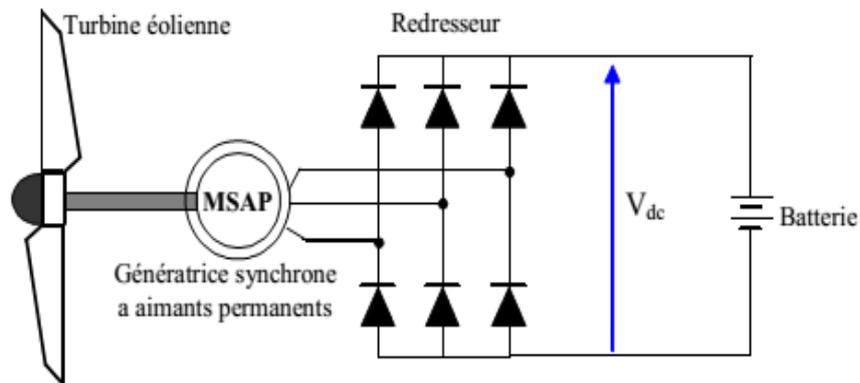


Figure 2.16 – Machine synchrone à aimants permanents avec redresseur à diodes

Avantages des génératrices synchrones

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.
- Absence de boîte de vitesse.
- Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.

Inconvénients des génératrices synchrones

- Machine spécifique.
- Prix de l'électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale.
- Grand diamètre de la machine.

Même si elles ne sont pas utilisées dans l'industrie éolienne, d'autres types de machines auraient techniquement la possibilité d'être utilisées dans notamment les aérogénérateurs à vitesse variable. Les machines à courant continu présentent une excellente marge de variation de la vitesse de rotation, une bonne réponse dynamique et une excellente capacité de surcharge mais elles sont onéreuses et de grande masse volumique . Les générateurs à

réductances variables sont des machines mécaniquement robustes, ils ont de plus un bon rendement à toutes les vitesses et une large marge de variation de la vitesse de rotation et de commande simple. Ce type de machine serait utile pour les futures éoliennes [38].

2.8 Modes de contrôle au niveau de la turbine

Il existe trois méthodes de contrôle qui sont décrites sur la Figure 2.17. Elles servent principalement à limiter la puissance captée pour les vents forts mais certaines peuvent également intervenir pour faciliter la mise en rotation de la turbine [40],[50].

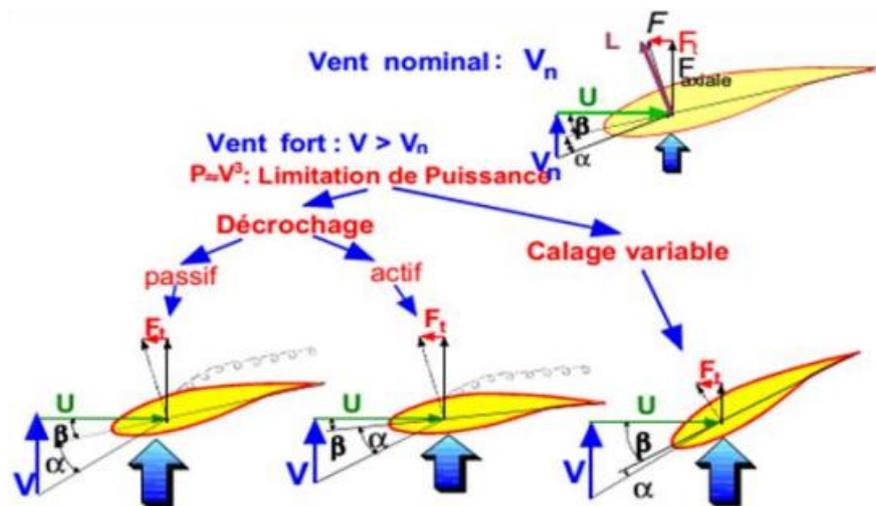


Figure 2.17 – Différents modes de réglage de puissance captée par la turbine

2.8.1 Contrôle par décrochage aérodynamique passif « Passive Stall »

L'angle de calage β est fixe, l'angle d'incidence α augmente naturellement avec la vitesse du vent incident V si la vitesse de rotation est pratiquement constante. Cette augmentation provoque l'augmentation de la traînée et un décrochage progressif de la pale, le couple est maintenu à peu près constant ($\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$) jusqu'au décrochage ($\alpha < \alpha_3$); la puissance est donc bien limitée.

- Avantages : Ce concept simple et normalement robuste ne fait intervenir aucun système mécanique ou électrique auxiliaire.
- Inconvénients : La puissance captée par la turbine est seulement fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation, il n'y a donc aucune possibilité d'adaptation. En cas de défaut sur le réseau, si l'énergie captée ne peut pas être transmise, il est nécessaire de disposer de freins dimensionnés pour absorber l'énergie cinétique de la turbine ainsi que l'énergie captée pendant le freinage même en cas de problème sur la transmission, ce qui suppose un système de freinage sur l'arbre de la turbine (couple de freinage très élevé). Généralement, les constructeurs prévoient de pouvoir utiliser les extrémités des pales comme aérofreins en les faisant pivoter de 90° en cas d'urgence. Dans ce cas, le système de freinage mécanique peut être monté derrière le multiplicateur de vitesse où le couple est plus faible et il n'est utilisé que comme frein de « parking ». Un freinage d'urgence peut également être assuré par le générateur à condition de prévoir un circuit électrique résistif de récupération d'énergie connectant le freinage rhéostatique. Par ailleurs en fonctionnement normal, le générateur doit être capable de freiner la turbine et d'imposer le décrochage alors que la vitesse du vent est en croissance, ce qui peut nécessiter un dimensionnement supérieur à celui correspondant aux conditions nominales [40].

2.8.2 Contrôle par décrochage aérodynamique actif « Active Stall »

L'angle α peut être augmenté (ou diminué) légèrement par diminution (ou augmentation) de l'angle de calage β de quelques degrés (3° à 5° généralement). Le décrochage peut être légèrement avancé (ou retardé). Le couple est maintenu pratiquement constant jusqu'au décrochage total où il chute rapidement, la puissance peut être donc limitée à sa valeur nominale.

- Avantages : Il y a la possibilité d'adaptation de la turbine aux conditions d'exploitation. Les actionneurs électriques ou hydrauliques nécessaires sont de taille réduite, les mouvements de rotation des pales restant de faible amplitude. La possibilité de provoquer un décrochage volontairement facilite les conditions de freinage. Le frein mécanique peut être

monté derrière le multiplicateur de vitesse où le couple est plus faible et il n'est utilisé que comme frein de « parking ».

- Inconvénients : L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine. Si les actionneurs sont électriques cela nécessite des contacts glissants (bagues/charbons) sujets à l'usure et nécessitant un entretien.

2.8.3 Contrôle par angle de calage variable « Pitch Control »

L'angle α peut être diminué (ou augmenté) fortement par augmentation (ou diminution) de l'angle de calage β de quelques dizaines de degrés (20° à 30° généralement). Les forces aérodynamiques s'exerçant sur les pales sont donc ainsi réduites (à la fois pour la portance et pour la traînée). Le couple est maintenu pratiquement constant et peut être annulé par « mise en drapeau » des pales ($\beta = 90^\circ$), la puissance est donc limitée.

- Avantages : La diminution de l'angle d'incidence α jusqu'à une valeur nulle ou négative limite toutes les forces aérodynamiques sur les pales, ce qui réduit considérablement les efforts à vitesse de vent élevée. Comme la force de poussée axiale est également diminuée, les efforts sur la tour sont réduits. Cet avantage est encore amplifié à vitesse variable puisque l'excès d'énergie pendant une rafale (dont la variation est trop brutale pour que le mécanisme d'orientation puisse compenser les effets) peut être stocké dans l'inertie du rotor par variation de sa vitesse (si le générateur l'accepte) alors que la puissance transmise reste pratiquement constante. Le frein mécanique n'est alors qu'un frein de « parking ».

- Inconvénients : Les actionneurs nécessaires sont de puissance supérieure à celle du cas précédent.

2.9 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable c'est une énergie qui respecte l'environnement [51].
- Bien qu'on ne peut pas d'envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO_2 [34].
- L'énergie éolienne n'est pas une énergie à risque comme l'énergie nucléaire car elle ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs [38].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires [38].
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [52].
- C'est l'énergie la moins onéreuse pour les énergies renouvelables [38].
- Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant [38].

Inconvénients

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques lacunes :

- L'impact visuel : ça reste néanmoins un thème subjectif [38].
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques [52].
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.
- La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante, la qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne [38].
- Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique qui demandent peu d'entretien [38].

Sachant, il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques

et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses [53].

2.10 Problèmes de la qualité de l'énergie éolienne

Le problème majeur dans l'éolienne est les harmoniques générés par certains appareils contenant en général des éléments d'électronique de puissance (les différents convertisseurs sont vus comme étant des charges non linéaires qui injectent des courants harmoniques sur le réseau électrique) pour se raccorder au réseau, absorbant un courant qui n'est pas sinusoïdal. Ces charges sont connues sous le nom de charges non linéaires et sont principalement à l'origine de la distorsion harmonique présente sur le réseau. L'utilisation des convertisseurs de l'électronique de puissance dans les systèmes éoliens à vitesse variable induit la génération des harmoniques qui à leurs tours provoquent plusieurs problèmes dans l'aérogénérateur comme [38] :

- Risque de coïncider avec la résonance et dysfonctionnement des appareils de système.
- Échauffement dû aux pertes supplémentaires des machines.
- Vibrations et bruits acoustiques, principalement dans les appareils électromagnétiques (génératrice).

Par conséquent pour la résolution de ce problème certaines littératures s'intéressent aux plusieurs techniques comme la méthode de filtrage (passive et active), cette méthode consiste d'insérer un système de l'électronique de puissance qui génère les harmoniques inverse de celle générer par les convertisseurs pour les éliminer.

2.11 Choix d'un site éolien

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. En effet, pour implanter un parc éolien la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués [54].

Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle sont les

vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s.

La première étape consiste à s'assurer que le site d'implantation envisagé convient à un projet de parc éolien, il doit en particulier :

- être suffisamment venté. Dans l'idéal, les vents doivent être réguliers et suffisamment forts, sans trop de turbulences tout au long de l'année. Des études des vents sur le site sont indispensables.
- être facile à l'accès.
- ne pas être soumis à certaines contraintes ou servitudes (aéronautiques, radars, etc.)
- prendre en compte le patrimoine naturel et en particulier l'avifaune, éviter les zones protégées.
- ne pas prendre place dans des secteurs architecturaux ou paysagers sensibles.
- être d'une taille suffisante pour accueillir le projet.

2.12 Application des éoliennes

Un système éolien peut être utilisé en trois applications distinctes, [55] :

- Systèmes isolés.
- Systèmes hybrides.
- Systèmes reliés au réseau.

Les systèmes obéissent à une configuration de base : ils ont besoin d'une unité de contrôle de puissance et dans certains cas d'une unité de stockage.

2.12.1 Systèmes isolés

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans les îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises.

Les systèmes isolés en général utilisent quelque forme de stockage d'énergie. Ce stockage peut être fait par des batteries : il faut alors un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Le contrôleur de charge a comme principal objectif d'éviter qu'il y ait des dommages au système de batterie par des surcharges ou des décharges profondes.

2.12.2 Systèmes hybrides

Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie comme par exemple : les turbines éoliennes, les génératrices diesel, les modules photovoltaïques, sachant qu'entre eux ; l'utilisation de plusieurs formes de génération d'énergie électrique augmente la complexité du système et exige l'optimisation de l'utilisation de chacune des sources. Dans ces systèmes, il faut réaliser un contrôle de toutes les sources pour maximiser la livraison de l'énergie à l'utilisateur.

2.12.3 Systèmes liés au réseau

Les systèmes liés au réseau n'ont pas besoin de systèmes de stockage d'énergie ; par conséquent toute la génération est livrée directement au réseau électrique. Les systèmes éoliens liés au réseau nécessitent un convertisseur statique.

2.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à une étude plutôt descriptive de l'ensemble des composants d'un système éolien. Cette étude nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale et nous a donné une idée sur les techniques de contrôle des différentes structures.

Nous avons donné une vue d'ensemble des différentes turbines éoliennes utilisées dans l'industrie moderne pour la production d'énergie électrique. Afin d'arriver à une meilleure compréhension du fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine (Loi de Betz), nous avons décrit de façon explicite les différents chaînes de conversion d'énergie, les différents technologies d'éoliennes, ainsi que les modes de régulation de la vitesse de rotation. Enfin nous avons cité les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne, leurs problèmes sur la qualité de l'énergie et leurs différents domaines d'application.

Il est à 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 composants du système éolien-diesel.

Chapitre 3

Modélisation énergétique des composants du système éolien-diesel

3.1 Introduction

La Modélisation est particulièrement importante pour la conception des systèmes hybride ayant des composants dans différents domaines et qui de plus sont couplés dans le but de réaliser des performances optimales. La simulation est caractérisée par la conception des systèmes basés sur les diagrammes blocs. L'environnement MATLAB/Simulink a retenu notre intérêt de part la maturité et la richesse de ses outils de développement et de vérification. L'approche de modélisation et de simulation adoptée est réalisée sous cet environnement en exploitant les différents outils existants, notamment la SimPowerSystems toolbox [56].

Dans ce contexte, un dimensionnement correct et rentable du système hybride ainsi que l'étude du comportement dynamique et électrique du système sont très important. Afin de concevoir le contrôle et la gestion du système. La modélisation d'un système va dépendre de l'usage pour lequel il est envisagé (simulation, dimensionnement, etc.), de l'objet (phénomènes étudiés), de la précision souhaitée et de la complexité acceptée.

3.2 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. Pour notre étude nous avons développé un modèle de base proposé est montré dans la Figure 3.1. Il est formé de deux sources d'énergies principales : l'éolienne et le générateur diesel ainsi un système de stockage d'énergie par batterie (BESS) pour emmagasiner l'excès énergétique lorsqu'il existe et de le restituer lors des périodes de manque d'apport et pour assurer l'alimentation de la charge du consommateur.

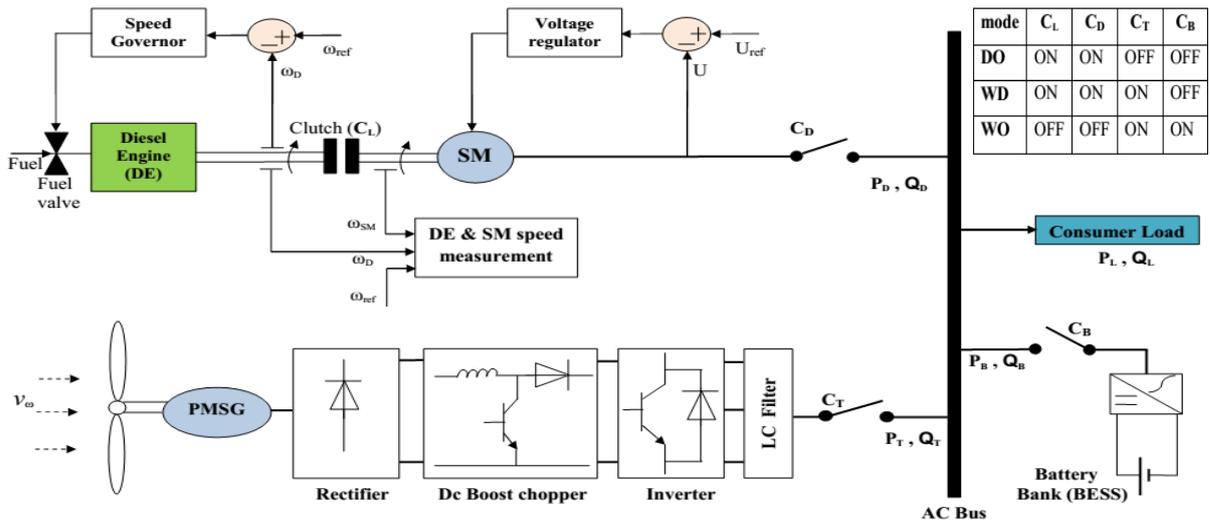


Figure 3.1 – Schéma représentatif d'un système hybride étudié

3.3 Modélisation du système éolien

Les éoliennes convertissent l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en électricité. Les pales du rotor éolien captent une partie de l'énergie contenue dans le vent et la transfèrent au moyeu qui est fixé sur l'arbre de l'éolienne. Celui-ci transmet ensuite l'énergie mécanique au générateur électrique qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Le schéma bloc de l'éolienne étudiée dans ce travail est présenté dans la Figure 3.2, [6].

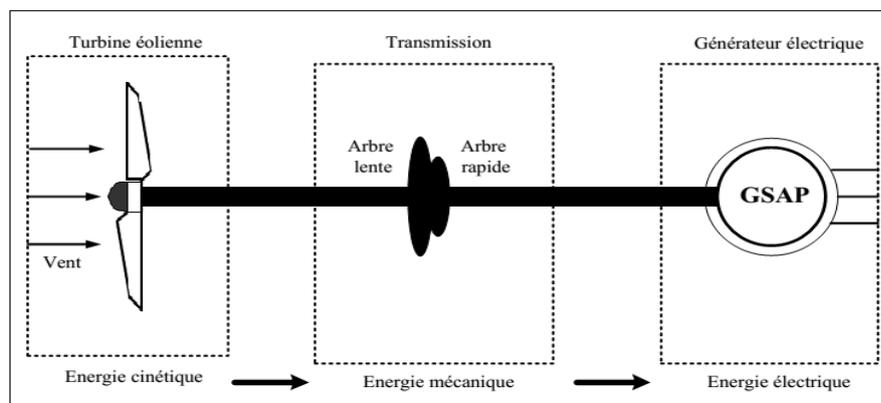


Figure 3.2 – Présentation d'un système éolien

3.3.1 Modèle du vent

Le vent est la source principale d'énergie pour faire fonctionner une éolienne, c'est pourquoi il est nécessaire de connaître son modèle mathématique. Celui-ci peut être une simple loi exponentielle où bien utilisant des distributions spectrales et spatiales très complexes qui rendent compte de sa phénoménologie turbulente [57].

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.
- définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales.
- développer et affiner la modélisation du rotor.
- évaluer le potentiel d'énergie utilisable.
- fournir une aide pour l'implantation des machines.

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de « Fourier » qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques, il est donné par l'équation (3.1), [57].

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i a_k \cdot \sin(\omega_k t) \quad (3.1)$$

Avec :

A : la valeur moyenne de la vitesse du vent.

a_k : amplitude de l'harmonique de l'ordre k .

ω_k : pulsation de l'harmonique de l'ordre k .

i : le rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

3.3.2 Modèle de la voilure

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor : la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent du site [58].

La puissance mécanique récupérée par une turbine éolienne peut s'écrire sous la forme, [59] :

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

Où :

ρ : La densité de l'air (1.22 kg/m^3).

S : La surface circulaire balayée par la turbine, d'où $S = \pi \cdot R^2$.

R : Rayon des pales [m].

v : La vitesse du vent [m/s].

C_p : Le coefficient aérodynamique de puissance de la turbine.

λ : Vitesse spécifique de l'éolienne.

β : Angle d'orientation des pales [°].

La vitesse spécifique λ de l'équation (3.3) est une relation entre la vitesse de la turbine au bout des pales et la vitesse du vent [59], soit :

$$\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \quad (3.3)$$

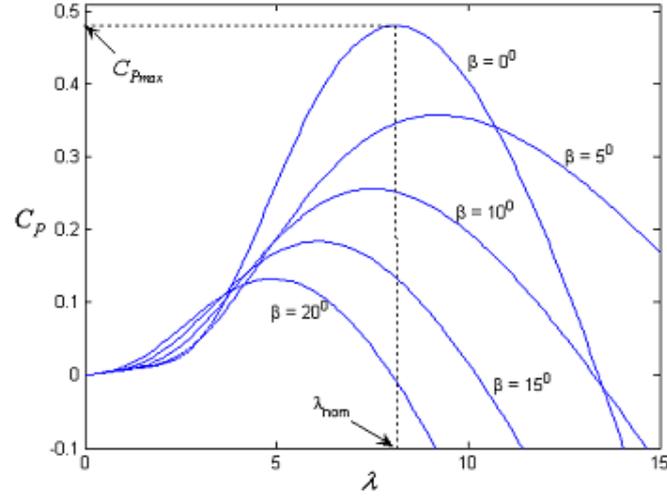
Avec Ω_t : Vitesse de rotation de la turbine [rad/s].

Le coefficient de puissance $C_p(\lambda, \beta)$ est directement lié aux caractéristiques aérodynamiques des pales et dépend de la vitesse spécifique λ et de l'angle d'orientation des pales β [60],[61]. Il traduit la proportion de puissance captée par la turbine. Théoriquement, il est limité à $16/27$ (limite de Betz). Cela veut dire qu'il est possible d'extraire au maximum 59% de l'énergie cinétique contenue dans le vent.

La Figure 3.3 , montre les caractéristiques $C_p - \lambda$ d'une éolienne pour différentes valeurs de l'angle de calage β . On constate que lorsque l'angle de calage augmente le coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ diminue. Cela se traduit en une réduction de l'énergie cinétique du vent captée par la turbine. La valeur maximale de $C_p^{max} = 0.48$ est obtenu pour $\beta = 0$ degré et pour $\lambda = 8.1$; cette valeur particulière de λ est définie comme étant la valeur nominale de λ_{nom} [62].

Le coefficient $C_p(\lambda, \beta)$ de la turbine que nous avons utilisé est [60],[61] :

$$C_p = (0.44 - 0.0167\beta) \cdot \sin \left[\frac{\pi(\lambda - 3)}{7.5 - 0.15\beta} \right] - (\lambda - 3) \cdot (0.00184\beta) \quad (3.4)$$


 Figure 3.3 – Caractéristiques $C_p - \lambda$ d'une éolienne

Si le rapport de vitesse λ est maintenu à sa valeur optimale (λ_{opt}), le coefficient de puissance est toujours à sa valeur maximale (C_p^{max}) donc la puissance mécanique récupérée par la turbine éolienne est aussi à sa valeur maximale :

$$P_{mec}^{opt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_p^{max} (\lambda^{opt}) \cdot v^3 \quad (3.5)$$

D'autre part, si de l'équation du rapport de vitesse supposé maintenu à la valeur optimale on isole la vitesse du vent équation(3.6) pour la remplacer dans l'équation de la puissance mécanique maximale équation(3.5) et on obtient l'équation (3.7) :

$$\lambda^{opt} = \frac{\Omega_t \cdot R}{v} \Rightarrow v = \frac{R}{\lambda^{opt}} \cdot \Omega_t \quad (3.6)$$

$$P_{mec}^{opt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_p^{max} \cdot \left(\frac{R}{\lambda^{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_t^3 \quad (3.7)$$

On obtient donc une forme analytique de la puissance mécanique maximale de la turbine éolienne en fonction de sa vitesse de rotation Ω_t uniquement.

En considérant que les conditions sont optimales (à puissance optimale) alors l'équation (3.7) permet le calcul de la valeur du couple optimal :

$$C_{mec}^{opt} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot C_p^{max} \cdot \left(\frac{R}{\lambda^{opt}} \right)^3 \cdot \Omega_t^2 \quad (3.8)$$

La Figure 3.4 présente un réseau de caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation où la courbe noire représente les lieux de la puissance optimale, ce qui correspond à l'équation (3.7), [6].

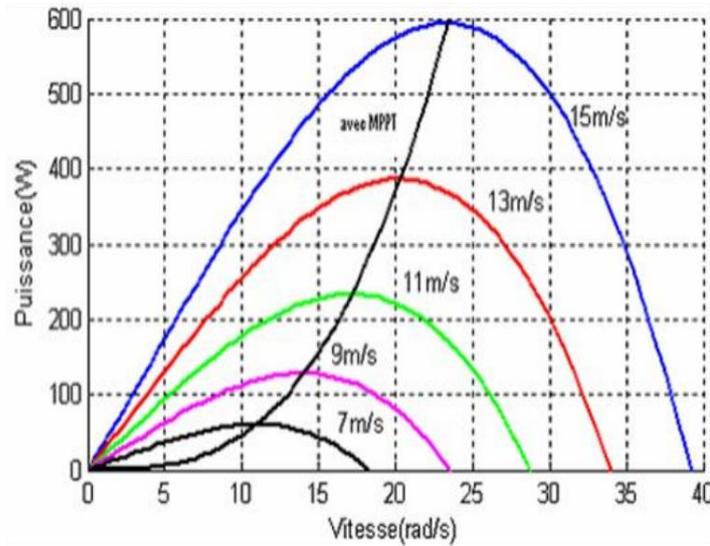


Figure 3.4 – Caractéristiques de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation

La Figure 3.5 représente le modèle mathématique d'éolienne développé dans MATLAB/Simulink, les équations de (3.2) à (3.8) ont été utilisées dans le développement de ce modèle.

La fonction $f(u)$ sur la Figure 3.5 est exprimée ci-dessous [62] :

$$f(u) = \frac{\lambda^{opt} \cdot u}{R} \quad (3.9)$$

Pour la turbine utilisée dans la simulation, la valeur maximale de C_p ($C_p^{max} = 0.48$) atteint pour l'extrémité optimale de ration de vitesse $\lambda_{opt} = 8.1$ et $\beta = 0$ degré.

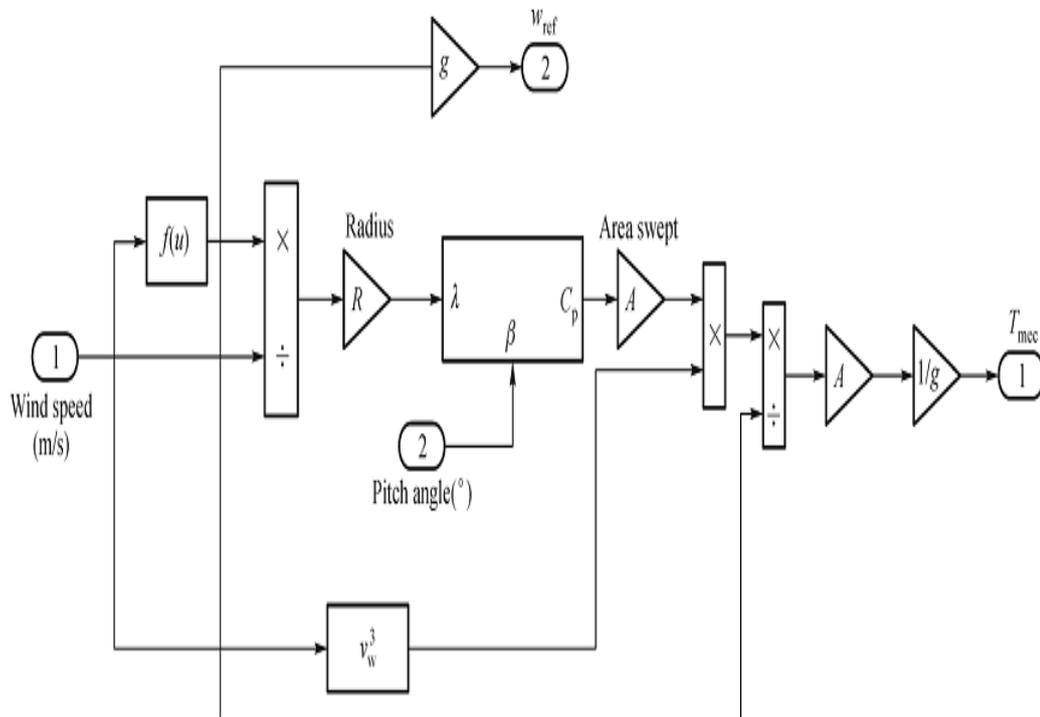


Figure 3.5 – Modèle Simulink d'éolienne

3.3.3 Transmission

Tous les éléments de la transmission, c'est-à-dire l'arbre lent côté rotor éolien, le multiplicateur et l'arbre rapide côté générateur, sont inclus dans le bloc « Transmission » (Figure 3.2). Le multiplicateur transforme la vitesse lente de l'arbre du rotor éolien en une vitesse beaucoup plus élevée compatible avec la plage de vitesse de fonctionnement du générateur électrique [63].

1. Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement du multiplicateur sont négligés. Les pertes énergétiques dans le multiplicateur sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par l'équation suivante [33].

$$\Omega_t = \frac{\Omega_{gen}}{G} \quad (3.10)$$

Avec :

Ω_t : Vitesse angulaire de la turbine (rad/s).

Ω_{gen} : Vitesse angulaire de la génératrice (rad/s).

G : Gain du multiplicateur de vitesse.

Le couple mécanique de la turbine éolienne (C_{mec}) est divisé par le rapport de multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur :

$$C_{gen} = \frac{C_{mec}}{G} \quad (3.11)$$

2. Équation dynamique de l'arbre

Plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre sont proposés dans la littérature. Nous avons adopté un modèle simplifié qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne dans son ensemble [64]. L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega_t}{dt} = C_{eol} - C_{em} - (f_m + f_t) \cdot \Omega_t \quad (3.12)$$

Avec :

J_m : inertie de la machine.

f_m : coefficient de frottement de la machine.

J_t : inertie de la turbine.

f_t : frottement des pales.

C_{eol} : le couple statique fournie par l'éolienne.

C_{em} : le couple électromagnétique.

Nous disposons uniquement des paramètres mécaniques de la machine et de l'inertie de la voilure. C'est pour cela que dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure n'est pas pris en compte).

$$\begin{cases} J = J_t + J_m \approx J_t \\ f = f_t + f_m \approx f_m \end{cases} \quad (3.13)$$

Par suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par l'équation différentielle suivante :

$$C_{eol} = J_t \frac{d\Omega_t}{dt} + C_{em} + f_m \cdot \Omega_t \quad (3.14)$$

3.3.4 Modèle 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 une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes.

La machine synchrone à aimants permanents est utilisée largement dans plusieurs applications comme les machines outils, la robotique, les générateurs aérospatiaux, la traction électrique [65], avec un large gamme de puissance, allant de centaines de Watts (servomoteur) à plusieurs méga Watts (système de propulsion des navires), dans des applications aussi diverses que le positionnement, la synchronisation, l'entraînement à vitesse variable et la traction [66].

- Elle fonctionne comme compensateur synchrone.
- Elle est utilisée pour les entraînements qui nécessitent une vitesse de rotation constante, tels que les grands ventilateurs, les compresseurs et les pompes centrifuges et grâce au développement de l'électronique de puissance. L'association machine à aimants convertisseur de puissance a trouvé de nombreuses applications dans les domaines très divers tels que la robotique, la technologie de l'espace et dans d'autres applications plus particulières (domestique, etc.), [66].

La génératrice synchrone à aimants permanents offre un grand nombre d'avantages, [37] :

- Une haute efficacité énergétique.
- Une grande fiabilité.
- Une simplicité de mise en œuvre.

Le schéma bloc de l'éolienne étudiée avec génératrice synchrone à aimants permanents

(GSAP) est présenté dans la Figure 3.6, la GSAP connectée à un redresseur à MLI, un hacheur survolteur et puis l'onduleur à MLI. Nous allons présenter le modèle mathématique de chacun qui permet de le simuler sous MATLAB.

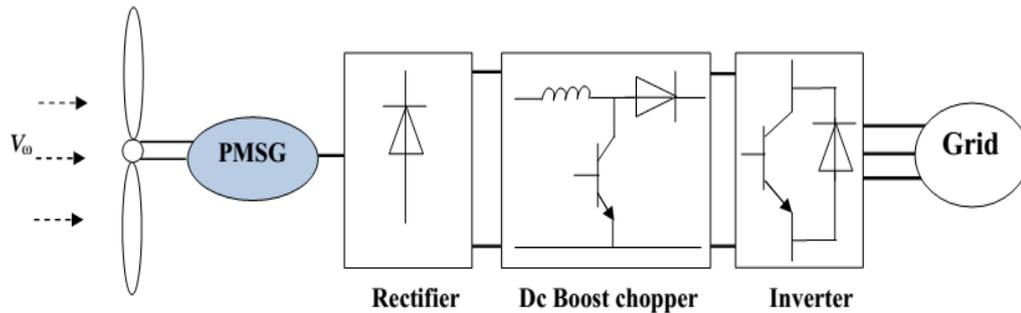


Figure 3.6 – Système éolien avec GSAP

1. Hypothèses simplificatrices

Le modèle mathématique de la machine synchrone à aimants permanents (MSAP) obéit à certaines hypothèses simplificatrices :

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

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

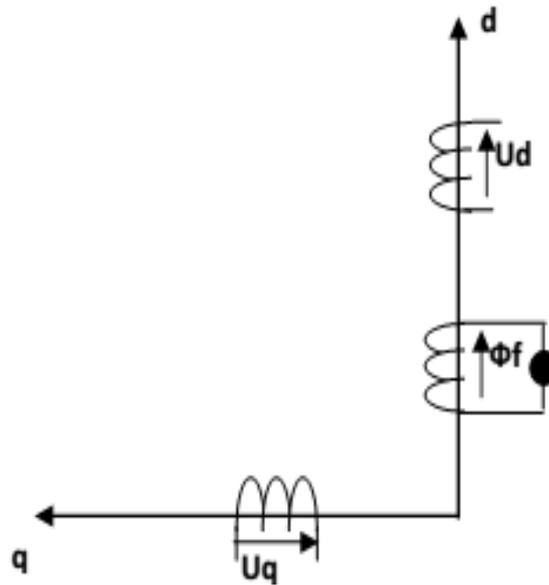


Figure 3.7 – Représentation de la génératrice à aimants permanents sur l'axe (d,q)

2. Mise en équations de la GSAP

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de Park, qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à un système cartésien d'axes (d et q) [67],[68].

a- Équations des tensions :

$$\begin{cases} U_d = -R_s \cdot i_d - \frac{d\varphi_d}{dt} - \omega_r \cdot \varphi_q \\ U_q = -R_s \cdot i_q - \frac{d\varphi_q}{dt} + \omega_r \cdot \varphi_d \end{cases} \quad (3.15)$$

b- Équations des flux :

$$\begin{cases} \varphi_d = L_d \cdot i_d + \varphi_f \\ \varphi_q = L_q \cdot i_q \end{cases} \quad (3.16)$$

Où :

- U_d : Tension selon l'axe d.
 U_q : Tension selon l'axe q.
 i_d : Courant selon l'axe d.
 i_q : Courant selon l'axe q.
 L_d : L'inductance statorique sur l'axe d.
 L_q : L'inductance statorique sur l'axe q.
 φ_d : Flux selon l'axe d.
 φ_q : Flux selon l'axe q.
 φ_f : Flux des aimants permanents.
 ω_r : Vitesse de rotation électrique.
 R_s : Résistance de chaque enroulement du stator.

Si on remplace les équations des flux (3.16) dans le système (3.15) on obtient le système suivant :

$$\begin{cases} U_d = -R_s \cdot i_d - L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r \cdot L_q \cdot i_q \\ U_q = -R_s \cdot i_q - L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r \cdot L_d \cdot i_d + \omega_r \cdot \varphi_f \end{cases} \quad (3.17)$$

c- Équation de couple :

Le couple électromagnétique C_{em} est exprimé par la dérivée de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique du rotation du rotor, [33].

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} = p \cdot \frac{dW_e}{d\theta_r} \quad (3.18)$$

- dW_e : Énergie emmagasinée dans le circuit magnétique.
 θ_{geo} : Écart angulaire géométrique de la partie mobile (rotor par rapport au stator).
 θ_r : Écart angulaire électrique du rotor par rapport au stator ($\theta_r = p \cdot \theta_{geo}$).
 p : Nombre de paire de pôle.

L'expression de la puissance transmise dans le repère de Park est donnée par [33] :

$$P(t) = \frac{3}{2} \cdot [U_d \cdot i_d + U_q \cdot i_q] \quad (3.19)$$

En remplaçant U_d, U_q par leurs expression, on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \cdot [-R_s(i_d^2 + i_q^2) - (i_d \cdot \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \cdot \frac{d\varphi_q}{dt}) + \frac{d\theta_r}{dt}(\varphi_d \cdot i_q - \varphi_q \cdot i_d)] \quad (3.20)$$

Le terme $\frac{3}{2} \cdot [-R_s \cdot (i_d^2 + i_q^2)]$: Représente la puissance dissipée en pertes joule dans les enroulements du stator.

Le terme $\frac{3}{2} \cdot [i_d \cdot \frac{d\varphi_d}{dt} + i_q \cdot \frac{d\varphi_q}{dt}]$: Représente la variation de l'énergie magnétique emmagasinée dans les enroulements du stator.

Le terme $\frac{3}{2} \cdot [\frac{d\theta_r}{dt} (\varphi_d \cdot i_q - \varphi_q \cdot i_d)]$: Représente la puissance électromagnétique.

Sachant que :

$$p \cdot \Omega_r = \omega_r \text{ et } P_{em} = C_{em} \cdot \Omega_r$$

Ω_r : vitesse mécanique du rotor.

L'expression du couple électromagnétique peut être exprimée par :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(\varphi_d \cdot i_q - \varphi_q \cdot i_d)] \quad (3.21)$$

Après affectation des opérations nécessaires, on peut écrire, [33] :

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_d \cdot i_q + \varphi_f \cdot i_q] \quad (3.22)$$

d- Équation mécanique :

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

$$C_m - C_{em} - \Omega_r \cdot F = J_r \frac{d\Omega_r}{dt} \quad (3.23)$$

C_m : Le couple moteur appliqué sur la génératrice.

C_{em} : Le couple électromagnétique.

$\Omega_r \cdot F$: Le couple de frottement.

J_r : Moment d'inertie total de la machine.

F : Coefficient de frottement visqueux.

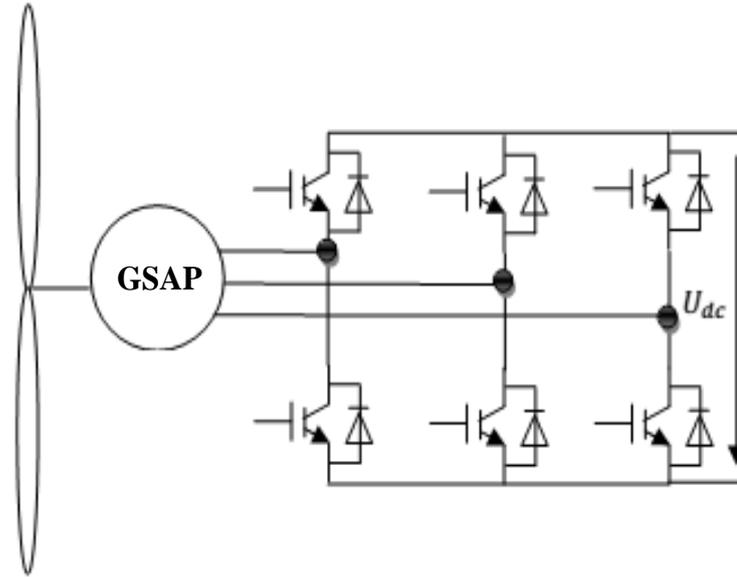


Figure 3.9 – Chaîne de conversion d’un système éolien avec un redresseur à MLI

Pour le modèle dynamique du système, on va diviser l’étude du convertisseur en trois parties : le côté alternatif, la partie discontinue composée par les interrupteurs et le côté continu. Dans ce contexte, la fonction des interrupteurs est d’établir une liaison entre le côté alternatif et le bus continu. Ces interrupteurs étant complémentaires, leur état est défini par la fonction suivante :

$$S = \begin{cases} +1 & \text{si } i_j = -1, j \in \{a, b, c\} \\ -1 & \text{si } i_j = +1, j \in \{a, b, c\} \end{cases} \quad (3.24)$$

Les tensions de phase d’entrée et le courant de sortie peuvent être écrits en fonction des fonctions S_j , de la tension redressée U_{dc} et des courants d’entrée i_a, i_b, i_c .

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (3.25)$$

Les tensions d’entrée entre phases du redresseur à MLI peuvent être décrites par :

$$\begin{cases} U_{ab} = (S_a - S_b).U_{dc} \\ U_{bc} = (S_b - S_c).U_{dc} \\ U_{ca} = (S_c - S_a).U_{dc} \end{cases} \quad (3.26)$$

4. Modèle du hacheur survolteur (ou parallèle)

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie U_s est supérieure à celle de l'entrée U_e . Pour un rapport cyclique α de commande du thyristor H donné et en régime de conduction continu, la tension moyenne à la sortie est donnée par [70] :

$$U_s = \frac{1}{1 - \alpha} \cdot U_e \quad (3.27)$$

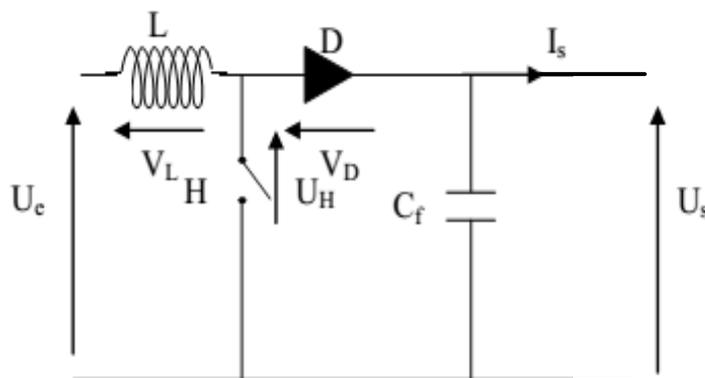


Figure 3.10 – Schéma de principe d'un hacheur parallèle

5. Modélisation de l'onduleur de tension

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet de transformer un signal d'entrée continu en un signal de sortie alternatif. Il a la même structure que le redresseur à MLI. La commande des états passants et bloqués des transistors permet d'obtenir une tension alternative caractérisée par la fréquence nécessaire pour la charge alimentée. Le signal de commande de ces derniers est fourni par la commande MLI [69].

Pour modéliser l'onduleur de tension (Figure 3.11) on considère son alimentation comme une source parfaite et supposée être constituée de deux générateurs de f.é.m égale à $U_0/2$ connectés entre eux par un point noté n_0 , [71].

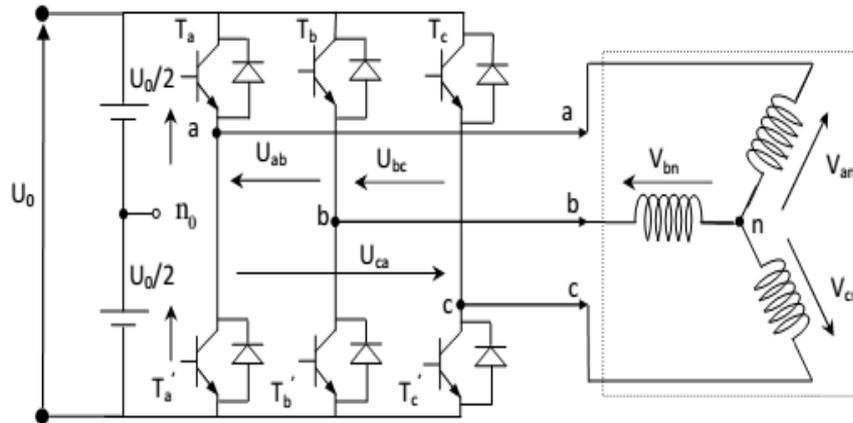


Figure 3.11 – Schéma global d'un onduleur à MLI

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an} , V_{bn} et V_{cn} . L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques S_i . On appelle T_i et T'_i les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux), on a :

- si $S_i = 1$, alors T_i est fermé et T'_i est ouvert.
- si $S_i = 0$, alors T_i est ouvert et T'_i est fermé.

Les tensions composées sont obtenues à partir des sorties de l'onduleur :

$$\begin{cases} U_{ab} = V_{an0} - V_{bn0} \\ U_{bc} = V_{bn0} - V_{cn0} \\ U_{ca} = V_{cn0} - V_{an0} \end{cases} \quad (3.28)$$

Les tensions simples des phases de la charge issues des tensions composées ont une somme nulle, donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (1/3)[U_{ab} - U_{ca}] \\ V_{bn0} = (1/3)[U_{bc} - U_{ab}] \\ V_{cn0} = (1/3)[U_{ca} - U_{bc}] \end{cases} \quad (3.29)$$

Elles peuvent s'écrire à partir des tensions de sorties de l'onduleur en introduisant la

tension du neutre de la charge par rapport au point de référence n_0 :

$$\begin{cases} V_{an} + V_{nn0} = V_{an0} \\ V_{bn} + V_{nn0} = V_{bn0} \\ V_{cn} + V_{nn0} = V_{cn0} \end{cases} \quad (3.30)$$

Donc, on peut déduire que :

$$V_{nn0} = \frac{1}{3}[V_{an0} + V_{bn0} + V_{cn0}] \quad (3.31)$$

L'état des interrupteurs supposés parfaits $\iff S_i$ (1 ou 0) $\{i = a, b, c\}$ on a :

$$V_{in0} = S_i \cdot U_0 \cdot \frac{U_0}{2} \quad (3.32)$$

On a donc :

$$\begin{cases} V_{an0} = (S_a - 0.5) \cdot U_0 \\ V_{bn0} = (S_b - 0.5) \cdot U_0 \\ V_{cn0} = (S_c - 0.5) \cdot U_0 \end{cases} \quad (3.33)$$

En remplaçant (3.31) dans (3.30), on obtient :

$$\begin{cases} V_{an0} = \frac{2}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{bn0} = -\frac{1}{3}V_{an0} + \frac{2}{3}V_{bn0} - \frac{1}{3}V_{cn0} \\ V_{cn0} = -\frac{1}{3}V_{an0} - \frac{1}{3}V_{bn0} + \frac{2}{3}V_{cn0} \end{cases} \quad (3.34)$$

En remplaçant (3.33) dans (3.34), on obtient :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_0 \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad (3.35)$$

3.4 Modélisation du générateur diesel

Le générateur diesel (GD) est constitué d'un moteur diesel (MD), un générateur synchrone (GS) et un embrayage à friction est représenté sur la Figure 3.12. Le MD fournit

une puissance mécanique à la GS et son régulateur de vitesse (régulateur de vitesse + actionneur) contrôle la vitesse MD. Dans cette étude, la commande de vitesse MD est isochrone, de sorte que le régulateur de vitesse diesel commandera le débit de carburant nécessaire afin de faire le MD fonctionner à vitesse constante ($\omega_D = \omega_{SM}$), [72].

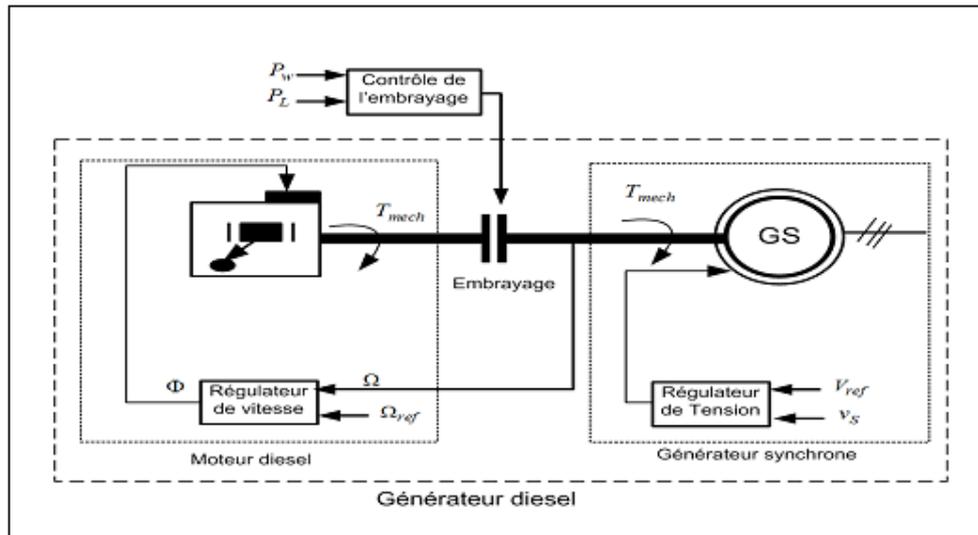


Figure 3.12 – Modèle simplifié du générateur diesel

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.

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

3.4.1 Moteur diesel et régulateur de vitesse

La vitesse de rotation d'un tel moteur dépend de la quantité de carburant injecté et de la charge appliquée au vilebrequin du moteur. Le moteur diesel est un système non linéaire. Il présente des temps morts et des retards, ce qui rend difficile son contrôle [73]. 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.

De nombreux ouvrages proposent des modèles plus ou moins complexe du moteur diesel en fonction de la disponibilité des données constructeurs. Cependant, dans notre étude on a utilisé le modèle proposé par [74]. Le bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié et celui du régulateur de vitesse respectivement sont illustrés dans la Figure 3.13, et les paramètres sont fournis dans le tableau 2 (Annexe B).

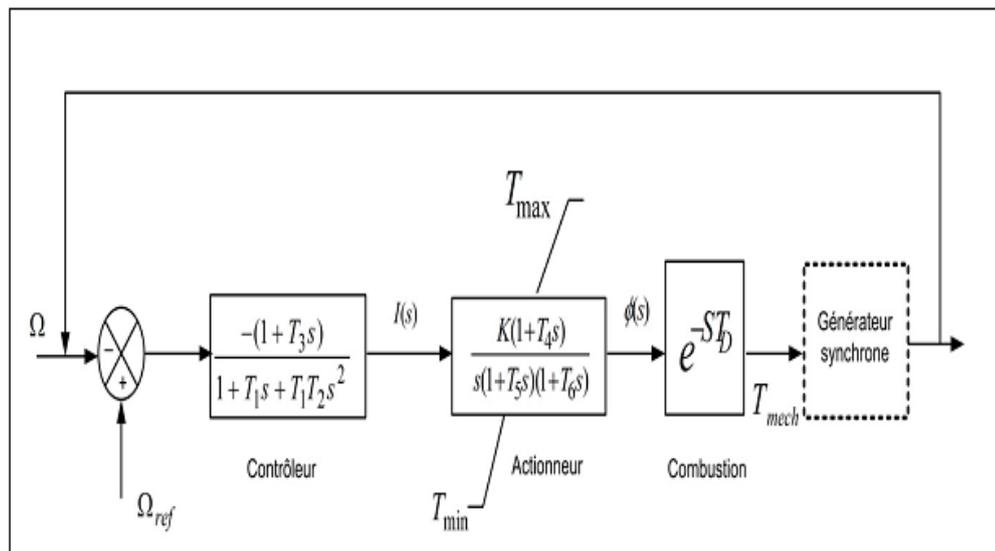


Figure 3.13 – Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié

Où :

T_1, \dots, T_6 : Constantes du temps, seconde.

T_D : Temps mort, seconde.

L'entrée du contrôleur de vitesse est l'erreur de vitesse de rotation et la sortie est le signal de commande de l'actionneur $I(s)$. 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 [75].

$$G(s) = \frac{K.(1 + sT_4)}{s(1 + sT_5).(1 + sT_6)}.I(s) \quad (3.36)$$

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 plusieurs cylindres qui ne sont pas tous dans la position permettant d'accepter plus 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. Le couple produit par le moteur diesel $T_{mech}(s)$ est une fonction du débit de carburant $\Phi(s)$:

$$T_{mech} = exp(-sT_D).\Phi(s) \quad (3.37)$$

La consommation horaire de carburant du générateur diesel $Q(t)[l/h]$ peut être modélisée par la loi linéaire en fonction de la puissance de sortie requise par la charge [76] :

$$Q(t) = \alpha_D.P_D(t)_{gen} + \beta_D.P_D(t)_{rat} \quad (3.38)$$

Où :

$\alpha_D [l/kWh]$ et $\beta_D [l/kWh]$ sont les coefficients de la courbe de consommation fournies par le fabricant.

$P_D(t)_{gen} [kW]$: la puissance générée par le GD.

$P_D(t)_{rat} [kW]$: la puissance nominale de GD.

α_D et β_D sont des constantes qui sont égales à $0.246 l/kWh$, $0.08145 l/kWh$ respectivement [76].

L'efficacité du DG (kWh/l) est exprimée par [77] :

$$\eta_D = \left[\frac{P_D(t)_{gen}}{Q(t)} \right] \quad (3.39)$$

Le rendement en pourcentage (%) de la valeur calorifique inférieur (LHV) du gas-oil peut être défini comme suit :

$$\eta_D(\%) = \left[\frac{P_D(t)_{gen}(kW)}{Q(t)(l/h) \cdot LHV_{Gas-oil}(kWh/l)} \right] \cdot 100 \quad (3.40)$$

La gamme du LHV du gas-oil variée entre (10 et 11.6 kWh/l).

3.4.2 Modèle simplifié de la machine synchrone

Comme indiqué au le chapitre 1, le GD est en général constitué d'un MD couplé directement à un générateur synchrone à rotor bobiné. La puissance mécanique fournie en sortie du bloc « moteur diesel » est convertie en puissance électrique par un modèle simplifié [78] 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_e continu qui créant un champ magnétique. Il possède donc p paires de pôles sachant que le même nombre de pôles se retrouve dans le stator. Ses enroulements sont le siège de courants alternatifs triphasés d'où la liaison entre la pulsation ω_g du champ magnétique tournant et la vitesse de rotation est :

$$\Omega_s = \frac{\omega_g}{p} \quad (3.41)$$

Avec $\omega_g = 2\pi \cdot f$, 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 :

$$E = K \cdot N \cdot \Phi \cdot f = K \cdot N \cdot \Phi \cdot p \cdot n_s = K' \cdot \Phi \cdot n_s \quad (3.42)$$

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 montré dans la Figure 3.14 :

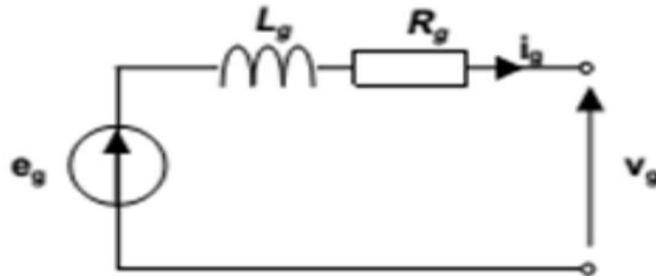


Figure 3.14 – Modèle équivalent d'un enroulement

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 [Ω].

L_g : inductance synchrone [H].

La loi des mailles pour le schéma présenté dans la Figure 3.14 avec les grandeurs instantanées est :

$$e_g = v_g + L_g \frac{di_g}{dt} + R_g \cdot i_g \quad (3.43)$$

En triphasé, le stator comporte trois enroulements et donc trois forces électromotrices $eg_1(t)$, $eg_2(t)$ et $eg_3(t)$ 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 :

$$J_{ds} \frac{d\Omega_s}{dt} = T_d - T_{em} \quad (3.44)$$

Où :

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

Ω_s est la vitesse de rotation.

T_d est le couple mécanique sur l'arbre.

T_{em} est le couple électromagnétique.

3.4.3 Embrayage

Le système hybride éolien-diesel a trois modes de fonctionnements. Le passage du mode DO au mode WO est assuré par la mise hors service du moteur diesel. La mise en place d'un embrayage entre le moteur diesel et le générateur synchrone assure cette fonction. L'ouverture et la fermeture sont basées sur la comparaison entre la puissance de la charge principale (P_L) et la puissance débitée par la GSAP (P_T). Si ($P_T > P_L$) l'embrayage est ouvert et la charge sera alimentée par éolienne seule si non l'embrayage restera toujours fermé [8].

3.5 Modélisation du système de stockage d'énergie

Le stockage d'électricité présente plusieurs attraits importants pour la génération, la distribution et l'utilisation de l'énergie électrique. Pour le réseau public, par exemple une installation de stockage d'énergie est utile pour conserver l'électricité générée durant les périodes creuses de consommation afin de la restituer lors des fortes demandes. Le stockage d'énergie permet de fournir de l'énergie de soutien (back-up) en cas de panne de réseau ; le stockage d'énergie est la seule réponse possible à une perte du réseau d'alimentation électrique. Le stockage d'énergie joue aussi un rôle important dans la génération d'électricité à partir de sources renouvelables [11]. La nature intermittente des sources renouvelables comme le solaire, l'éolien et les marées rendent nécessaire une forme de stockage.

Pour les systèmes isolés de petite puissance qui utilisent des énergies renouvelables, le moyen de stockage habituellement utilisé repose sur la mise en œuvre de batteries.

Les batteries Ni-MH ont des propriétés très similaires aux batteries Ni-Cd, en utilisant l'alliage absorbant l'hydrogène par l'électrode négative au lieu du cadmium. Les batteries Ni-MH ont une plus courte durée de vie mais elles ont une capacité de puissance plus élevées que le type Ni-Cd [79]. Le cadmium est un métal lourd toxique aux dispositions obligatoires dont l'élimination n'est pas aussi facile à remplir dans les régions éloignées. Par conséquent, cet aspect environnemental recommande l'utilisation des batteries Ni-MH qu'on a proposé dans cette étude. Le modèle de la batterie Ni-MH 240 V [80] consiste en une fonction de source de tension continue où l'état de charge (SOC) est basé sur la

caractéristique de décharge de la batterie avec une résistance interne de valeur constante. Le modèle de la batterie Ni-MH a été pris à partir de [80] et son schéma de Simulink est illustré dans la Figure 3.15. Le modèle est constitué d'une source de tension variable commandée de la valeur E en série avec une résistance interne constante R . E dépend de la capacité extraite de la batterie $\int idt$ (Ah) et la capacité maximale de la batterie théorique Q (Ah) (en général égale à 105% de la capacité nominale) :

$$E = E_0 - K \frac{Q}{Q - \int idt} + A \exp(-B \int idt) \quad (3.45)$$

Où :

E_0 : la tension constante.

K : la constante de la résistance de polarisation ou polarisation.

i : le courant de la batterie.

Q : la capacité maximale de la batterie.

Les valeurs des paramètres E_0 , K , A et B de l'équation (3.45) sont obtenus à partir de la caractéristique de décharge de la batterie (voir Annexe C).

L'état de charge SOC (State of Charge) de la batterie est égale à zéro lorsque la batterie est vide et lorsqu'elle est complètement chargée à 100%, elle est calculée comme suit :

$$SOC(\%) = 100. \left(1 - \frac{1}{Q} \int idt \right) \quad (3.46)$$

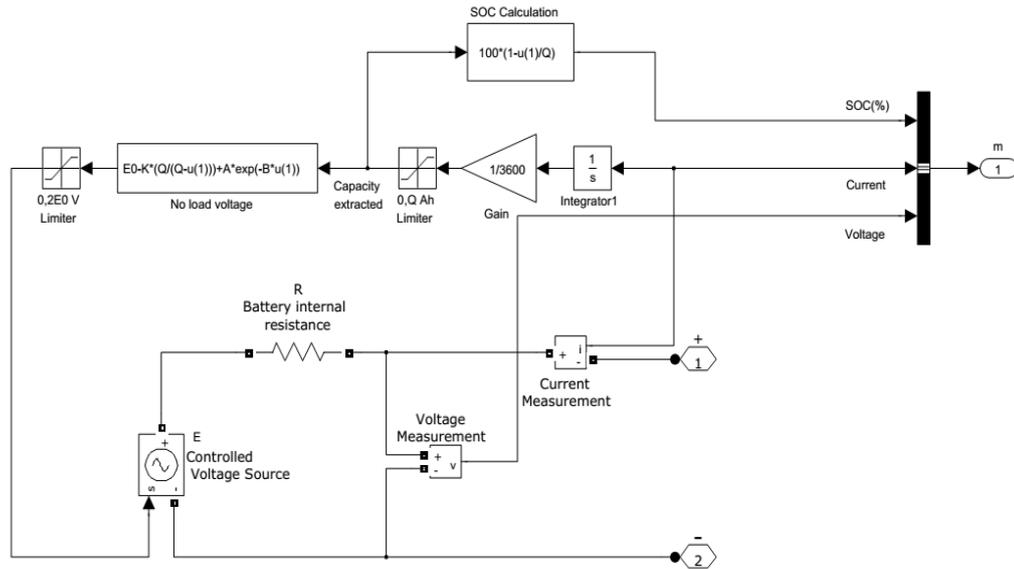


Figure 3.15 – Modèle Simulink de la batterie Ni-MH

Selon la Figure 3.1, entre le bus CA et la batterie de stockage on trouve un convertisseur bidirectionnel. Un convertisseur bidirectionnel (AC/DC redresseur, DC/AC onduleur) est nécessaire pour assurer la conversion du courant DC délivré par la batterie au courant AC pour alimenter la charge (fonction onduleur) et inversement pour la recharge de batterie à partir des bus AC (fonction redresseur).

3.6 Contrôle et gestion de l'énergie du système hybride

La gestion d'énergie 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 [59]. La stratégie de gestion de l'énergie utilisée dans cette étude est conforme à l'organigramme représenté sur la Figure 3.16, ce qui permet au système de supervision de décider combien et quels générateurs il faut mettre en marche, comment utiliser le stockage si c'est disponible [16],[81].

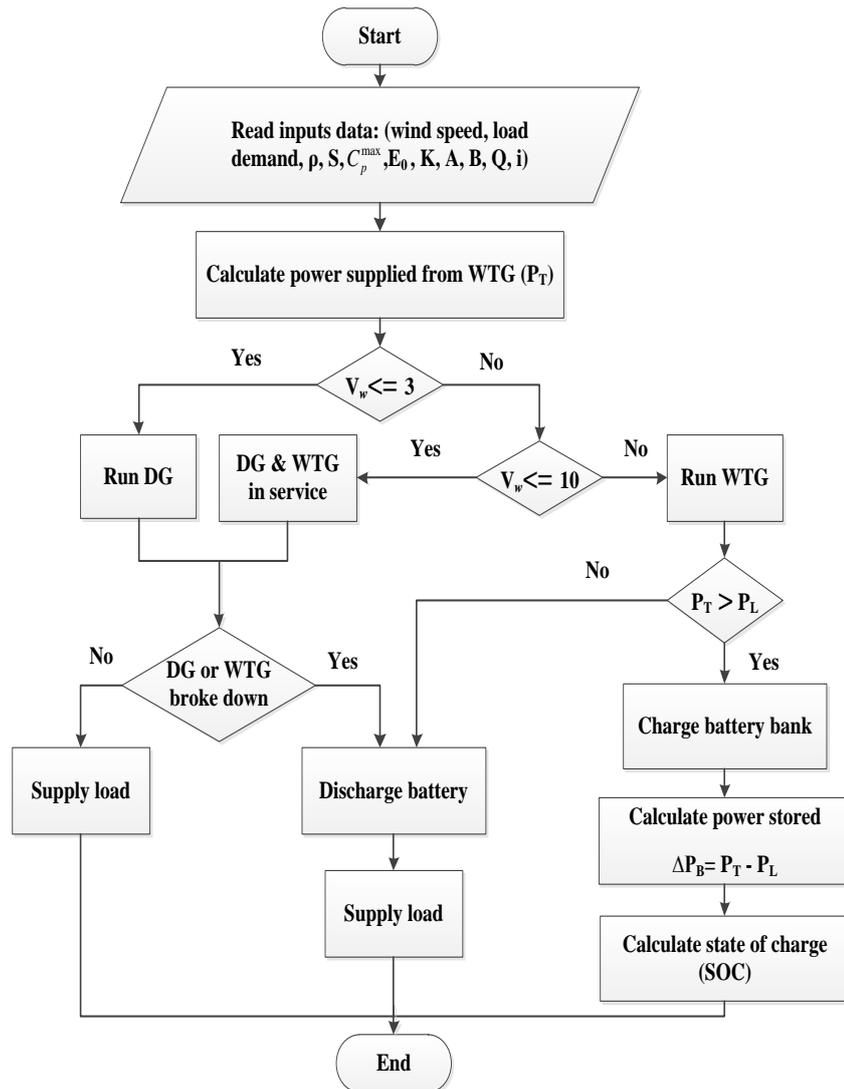


Figure 3.16 – Algorithme d'optimisation du système hybride

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons dimensionné et modélisé un système d'énergie hybride constitué par une éolienne, un générateur diesel et un système de stockage. Ce type de système peut représenter une solution pour les régions éloignées qui ne sont pas connectées au réseau public de distribution d'électricité.

La modélisation de chaque composant du système hybride a été élaborée à partir des modèles de la littérature (éolienne, diesel, batterie de stockage); cette modélisation est une étape essentielle car elle permet d'introduire le modèle de chaque sous-système puis évaluer la caractéristique de chaque élément de l'installation ainsi que les paramètres constituants.

Le chapitre suivant, sera consacré au dimensionnement et l'analyse de l'intégration du système éolien-diesel dans les sites isolés notamment au Sud Algérien.

Chapitre 4

Dimensionnement et analyse de l'intégration du SHED en Algérie

4.1 Introduction

Les ressources énergétiques de l'Algérie ont déjà été estimées par le CDER depuis les années 90 à travers la production des atlas de la vitesse du vent et du potentiel énergétique éolien disponible en Algérie [3].

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des grands vents (Alger) conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démonté et installé en Algérie [82].

Des nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. Cependant, la technologie des éoliennes n'étant pas encore mature, ces expériences n'étaient pas toujours concluantes. Ce constat était également valable même à l'échelle internationale. Mais après le premier choc pétrolier, d'importants investissements ont été consacrés à la recherche et au développement des éoliennes.

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance sera implantée à Adrar. Cette ferme est fonctionnelle depuis 2012. Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté dans son programme de développement des énergies renouvelables, d'installer sept autres centrales éoliennes d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme [83], pour atteindre 1700 MW à l'horizon 2030 [84].

4.2 Évaluation de l'énergie éolienne en Algérie

La carte des vents de l'Algérie estimée à 10 m du sol est présentée en Figure 4.1, [85] elle montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la

valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Béjaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au Nord et Biskra au Sud. Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. La réalisation d'une carte saisonnière a montré clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventés que le reste des saisons et que le printemps en est le plus venté. Néanmoins, il faut remarquer que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver. D'un autre côté, des régions telles que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année [86].

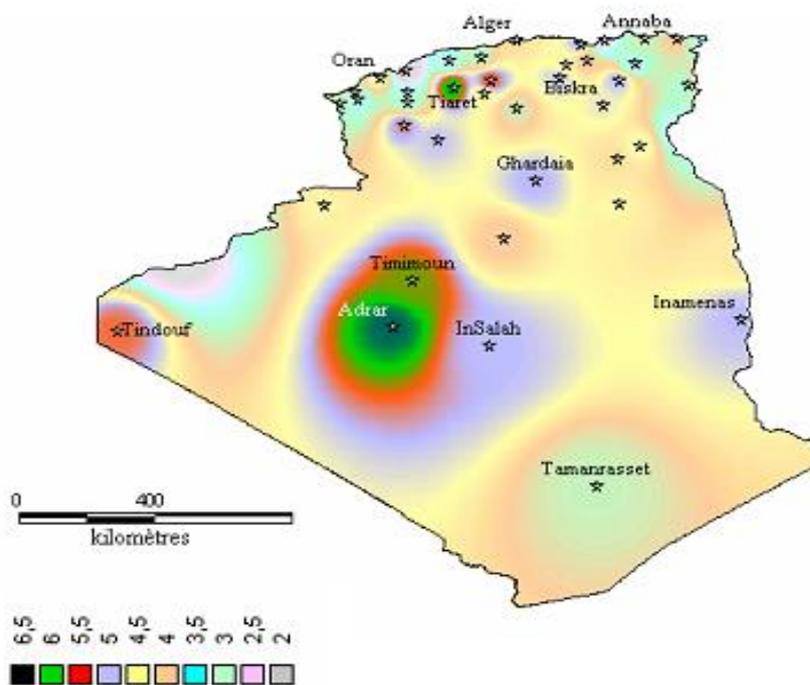


Figure 4.1 – Carte de la vitesse moyenne du vent à 10 m du sol (m/s) en Algérie

4.3 Caractéristiques du site étudié

4.3.1 Situation géographique

La wilaya d'Adrar s'étend sur une superficie considérable de 427.968 km^2 , soit près d'un cinquième (1/5) du territoire national. L'espace utile demeurant toutefois réduit, la wilaya d'Adrar située à l'extrême Sud-ouest du pays, compte onze (11) daïras et vingt huit (28) communes. Sa population est estimée à 336 046 habitants dont 76% de population rurale.

La majorité des sites situés à la wilaya d'Adrar pourraient être considérés comme des sites isolés vu que leur superficie est immense et leur éloignement par rapport à la ville et les uns par rapport aux autres.

Le Tableau 4.1 suivant représente les informations relatives du site choisi.

Tableau 4.1 – Coordonnées géographiques du site choisi

Site	Latitude	Longitude	Altitude
Adrar	27°88'N	-0°28'E	263 m

4.3.2 Données météorologiques de la région d'Adrar

La région d'Adrar a climat caractérisant un type continental désertique, une pluviométrie très faible avec des précipitations rares et irrégulières d'une année à une autre et par un régime thermique qui présente lui aussi de grandes variations avec des hivers rigoureusement froids et des étés très chaud. La fréquence des vents est très grande durant toute l'année. Les vitesses sont très élevées puisque la fréquence des vents de vitesses supérieure à 5 m/s est de l'ordre de 20 à 40 % (voir Tableau 4.2 ci-dessous), [87].

Tableau 4.2 – Données climatiques du site étudié

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

Notre étude dépend essentiellement sur la vitesse du vent. Le Tableau 4.3 illustre les vitesses moyennes journalières du vent de chaque mois de l'année 2011, qui ont été mesurées à la station météorologique de l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) à Adrar [87].

Tableau 4.3 – Relevés de la variation de la vitesse du vent pendant l'année 2011

Jours	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
1	3.7500	7.9722	6.1667	7.8333	7.8611	5.8056	7.4167	5.1944	2.8889	4.1667	3.9167	6.4722
2	3.9722	6.1667	7.7222	7.0000	7.6667	9.1111	5.9722	3.8056	3.4444	4.7778	2.5833	5.7500
3	3.9167	6.3889	9.5278	4.6944	6.0833	6.9444	4.1667	4.3611	3.6389	7.3611	6.4444	5.7500
4	4.6389	6.4444	6.0833	8.4444	4.6944	8.3333	3.8611	6.2778	5.0278	6.8333	7.6667	8.5278
5	4.0000	7.1389	5.5556	8.8611	4.7222	9.2222	2.8333	5.3889	6.7500	8.2778	5.1944	7.3056
6	4.4722	6.6944	5.3889	5.5556	5.0833	8.5000	3.5556	5.1389	5.1944	8.4444	4.2222	6.7778
7	4.1111	6.5278	3.7500	5.8611	5.2500	4.9444	6.0833	4.2222	6.0833	7.0000	3.6111	6.5833
8	4.1667	5.5556	7.0000	7.3611	3.2500	3.0833	6.8889	2.4722	6.4444	5.9167	5.0278	6.5833
9	3.9722	5.3889	2.9722	6.1111	5.1389	2.9444	7.3611	4.2222	6.0278	7.0000	5.5000	6.0833
10	4.0556	7.4167	3.3333	3.3333	11.7222	3.4444	8.0833	6.5278	4.5833	8.0278	6.5833	4.9444
11	5.8611	8.2222	6.8333	1.2222	10.6111	7.5000	6.7778	7.1111	4.2778	6.6944	6.7778	4.3611
12	4.6389	7.9167	7.7778	3.8056	9.0000	10.6944	6.8889	7.0000	4.5833	7.4722	6.0833	5.0278
13	5.5000	6.9444	3.0833	8.8056	5.0000	8.0278	7.1111	6.0833	4.0556	7.1111	4.1111	6.9444
14	7.1944	3.8056	6.5833	3.5556	4.8333	5.0278	6.4444	6.6944	5.7222	6.5278	2.8889	6.1111
15	5.1389	7.3056	6.7778	4.8889	3.3056	5.2500	5.0278	6.2222	3.3333	4.1111	3.4444	6.7778
16	5.0833	7.3611	3.2500	4.7778	5.8056	8.3333	4.2222	4.6944	3.5000	4.3333	7.1944	6.5278
17	5.1944	5.3889	3.0278	4.6944	8.0833	8.5278	3.9167	6.8333	6.3889	8.2222	6.6944	3.6389
18	5.0278	6.9444	6.8333	6.0278	6.3333	6.6389	3.9167	7.6667	5.1944	8.7500	5.1389	2.8889
19	5.7222	5.6667	7.1944	4.2222	5.0833	7.8333	4.2222	6.2222	4.2222	8.5000	4.5833	6.8333
20	4.9444	3.6389	6.8889	6.1667	7.2500	7.9167	3.0833	6.4444	2.7222	8.3333	8.4444	5.9722
21	3.4444	5.8056	7.1389	10.6389	6.6389	7.7778	5.3611	6.3333	3.5000	7.3611	3.7500	5.0000
22	2.8333	3.3889	7.1389	5.0000	7.1944	5.4444	3.6111	5.9722	2.5278	4.9444	3.1944	3.8611
23	6.8333	3.4444	6.8889	5.4444	7.3611	8.4444	2.4167	5.8056	3.2500	5.3611	5.7222	4.5278
24	4.3611	6.4722	9.3611	8.3333	7.3611	9.9167	2.9722	6.0278	3.3056	4.7778	5.1389	5.6667
25	5.0278	6.7778	8.2778	4.5278	7.3611	8.5278	3.5556	5.6111	5.3056	6.0278	4.4167	7.4722
26	8.1667	7.1389	7.7778	6.4722	7.1944	7.8611	3.3889	4.3611	4.1667	4.1667	6.2778	7.1111
27	8.6944	4.6944	6.0833	4.5278	7.4167	9.0000	5.9722	7.7778	5.9722	4.5833	3.6389	6.2222
28	6.4444	6.1667	6.7500	7.5000	6.1667	10.8056	4.6389	6.7778	5.9167	5.3889	1.6944	5.7222
29	6.2778	-	5.3889	12.3889	4.7222	8.5000	4.9444	4.8333	4.8333	4.8333	3.6389	6.3333
30	8.3889	-	6.1111	7.3056	5.0833	8.2778	7.1944	3.8611	7.1389	3.5556	5.7500	5.4444
31	4.1667	-	6.5278	-	4.3333	-	5.0000	2.5833	-	3.1389	-	5.6111

D'après le Tableau 4.2 la vitesse moyenne mensuelle du vent varie entre 4.7 m/s et 7.4 m/s; on remarque que la vitesse du vent la plus élevée se trouve au mois de juin (7.4 m/s) et la vitesse la plus basse se trouve au mois de septembre (4.7 m/s).

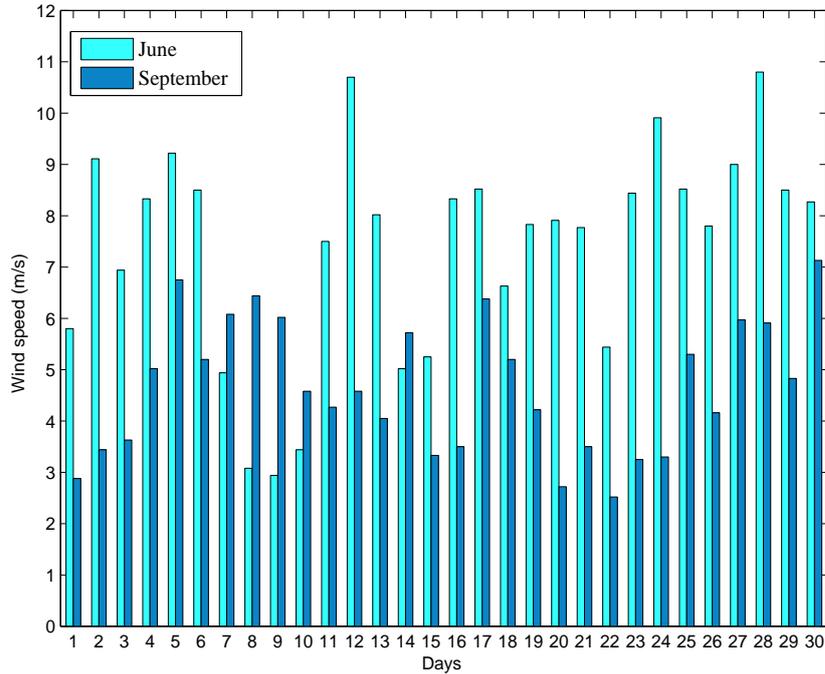


Figure 4.2 – Vitesse moyenne journalière du vent pour les mois de juin et septembre

4.3.3 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 4.3 représente un profil "prototype" de l'évolution journalière de la charge [87]. Ce profil est considéré le même durant tous les jours de l'année. La consommation d'énergie quotidienne de la charge est de 1500 $kWh/jour$, ce qui équivaut à 547.5 MWh/an .

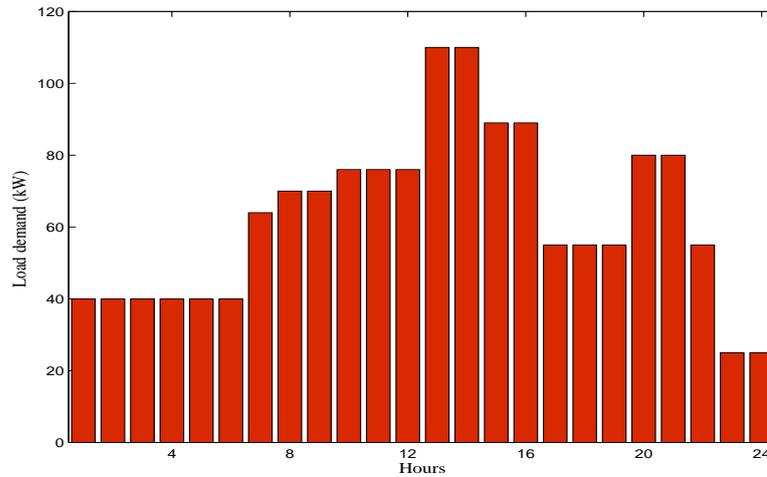


Figure 4.3 – Profil journalier de la courbe de charge

4.4 Présentation de l'installation hybride étudiée

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. L'électricité provenant de ces sources est intermittente, dépendante des conditions climatiques [56].

Aspects techniques des technologies :

- Le niveau de commercialisation
- La précision
- La flexibilité et la disponibilité
- La durée de vie
- L'efficacité
- L'exigence pour opération d'entretien et de remise en place
- La disponibilité des ressources correspondantes

Notre système de production appelé système hybride, Il 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 et d'une sécurité d'appro-

visionnement maximale.

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

- Un générateur éolien (WTG)
- Un générateur diesel (DG)
- Un système de stockage d'énergie par batterie (BESS)

4.4.1 La turbine 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 marque NORDEX N27-150, c'est une turbine à axe horizontal de puissance nominale 150 kW, 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 entretien), de flexibilité et de disponibilité. Selon sa courbe de puissance (donnée ci-dessous), NORDEX N27-150 peut développer de l'énergie même à très bas régime du vent (3 m/s), [88].



Figure 4.4 – Éolienne type NORDEX N27-150

L'éolienne NORDEX N27-150 considérée est caractérisée par les données présentées dans le Tableau 4.4 (voir Annexe A). Selon le constructeur, la caractéristique de la puissance d'éolienne est illustrée sur la Figure 4.5.

Tableau 4.4 – Caractéristiques techniques de NORDEX N27-150

Spécifications	NORDEX N27-150	Unité
Puissance nominale	150	kW
Vitesse nominale du vent	15.5	m/s
Vitesse min du vent	3	m/s
Vitesse max du vent	25	m/s
Diamètre du rotor	27	m
Surface balayée par le rotor	573	m ²
Hauteur de la tour	30	m
Vitesse de rotation maximale	1500	tr/min
Nombre de pale	3	
Fréquence nominale	50	Hz
Durée de vie	25	ans

Une éolienne est caractérisée par sa courbe de puissance qui donne la variation de puissance disponible en fonction de la vitesse du vent. La puissance nominale (de projet) est la puissance donnée pour un vent déterminé, appelé vent nominal. Au-delà de cette vitesse du vent, la puissance est maintenue constante grâce au dispositif de régulation.

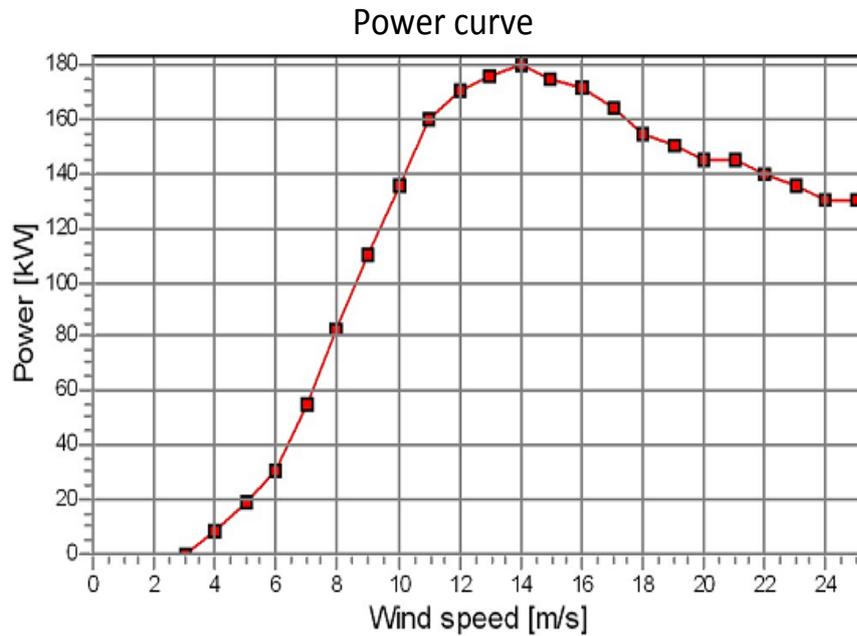


Figure 4.5 – Courbe de puissance relative de l'éolienne NORDEX N27-150

4.4.2 Le générateur diesel

En vue du caractère non régulier des ressources renouvelables, un générateur diesel est nécessaire comme un système d'appoint. Le générateur choisi est de type FG Wilson P150-1 du constructeur Leroy Somer (voir Annexe B), il développe une puissance maximale de 120 kW [89].

Tableau 4.5 – Caractéristiques du générateur diesel FG Wilson P150-1

Moteur Diesel	
Constructeur	Leroy Somer
Pays	Northern Ireland
Modèle	Perkins1006TAG
Vitesse de rotation	1500 tr/min
Puissance nominale	120 kW
Facteur de puissance	0.8
Nombre de cylindres	6 en ligne
Capacité du réservoir de carburant	349 litres
Aspiration	Naturelle (sans suralimentation)
Refroidissement	à eau
Circuit électrique (DC)	12 V
Consommation du carburant	34.2 l/h 100% de la charge
	26.2 l/h 75% de la charge
	18.4 l/h 50% de la charge
Capacité d'huile de lubrification	19 litres

4.4.3 Le système de stockage : Batterie

Il est possible d'assurer la fourniture de toute l'énergie nécessaire au site directement par les deux 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. Cela nous permet d'exploiter au maximum les ressources renouvelables disponibles en rechargeant les batteries par ces dernières (éolienne). Enfin, dans le cas d'une brusque demande d'électricité, le stockage remplit la fonction de source de secours, en attendant que le groupe démarre et prenne le relais de la fourniture. Les caractéristiques de la batterie Ni-MH sont données dans le Tableau 4.6, [80].

Tableau 4.6 – Caractéristiques de la batterie Ni-MH

Spécifications	Valeurs	Unités
Type de courant délivré	DC	
Tension nominale	240	V
Capacité nominale	390.624	Ah
Etat de charge minimale permise	50	% de la charge max
Durée de vie minimale	10	ans

4.5 Bilan énergétique du système éolien-diesel

La Figure 4.6 représente la puissance moyenne journalière délivrée par chaque générateur, ainsi que la puissance excédentaire. On constate que le 9 juin : l'alimentation des consommateurs a été assurée par le générateur diesel (DG), cela est dû à l'insuffisance de la vitesse du vent qui était inférieure à 3 m/s. Par contre pour le 12^{ième} et le 28^{ième} jour du même mois le générateur éolien (WTG) a assuré tout seul l'alimentation de la charge concernée, sachant que la vitesse du vent était supérieure à 10 m/s (voir Figure 4.2). Pour ces mêmes jours on constate qu'on a un surplus d'énergie éolien qu'on peut stocker dans la batterie pour une utilisation future (secours). Pour le mois de septembre et précisément pour les jours (1^{er}, 20^{ième} et 22^{ième}) seul le diesel a fonctionné mais pour les autres jours on a eu l'hybridation E-D.

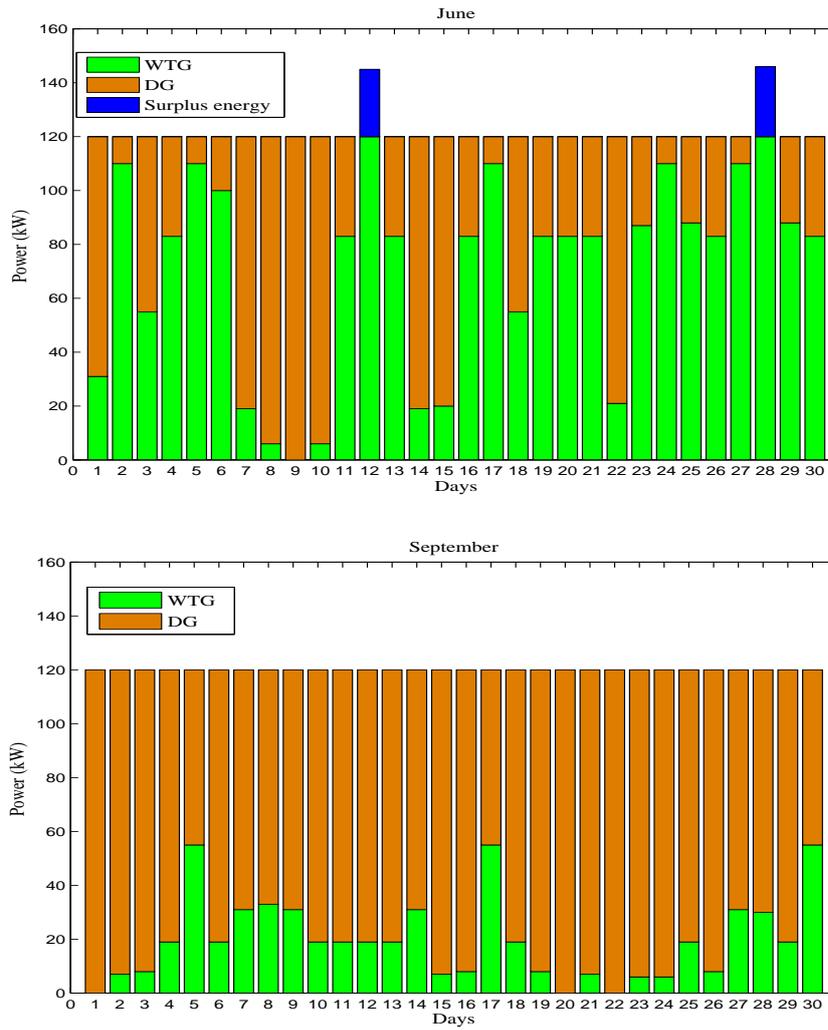


Figure 4.6 – Puissance moyenne journalière générée par chaque source pour les mois de juin et septembre

Les puissances mensuelles moyennes pour chaque mois de l'année sont représentées dans le Tableau 4.7 :

Tableau 4.7 – Puissance moyenne mensuelle du système hybride éolien-diesel

Mois	Puissance générée par WTG (kW)	Puissance générée par DG (kW)
Janvier	784	2936
Février	836	2474
Mars	1165	2455
Avril	1118	2262
Mai	1147	2343
Juin	2132	1468
Juillet	775	2945
Août	761	2959
Septembre	588	3012
Octobre	873	2847
Novembre	747	2853
Décembre	762	2958
Total (année)	11688	31512

4.6 Analyse écologique du système hybride

La consommation du carburant pour une puissance générée par le générateur diesel (DG) pour les mois de juin et septembre est représentée sur la Figure 4.7 :

Pour le mois de juin on a une consommation du carburant plus importante et particulièrement au 9^{ième} jour où la moyenne est de 39.29 l/h, cela est dû au déficit éolien. Suivant nos relevés on constate que pendant le 12^{ième} et 18^{ième} jour du même mois la vitesse du vent est suffisante donc la consommation du carburant est nulle.

Pour le mois de septembre la consommation atteint le maximum (39.29 l/h) pendant les jours suivants (1^{er}, 20^{ième} et 22^{ième}).

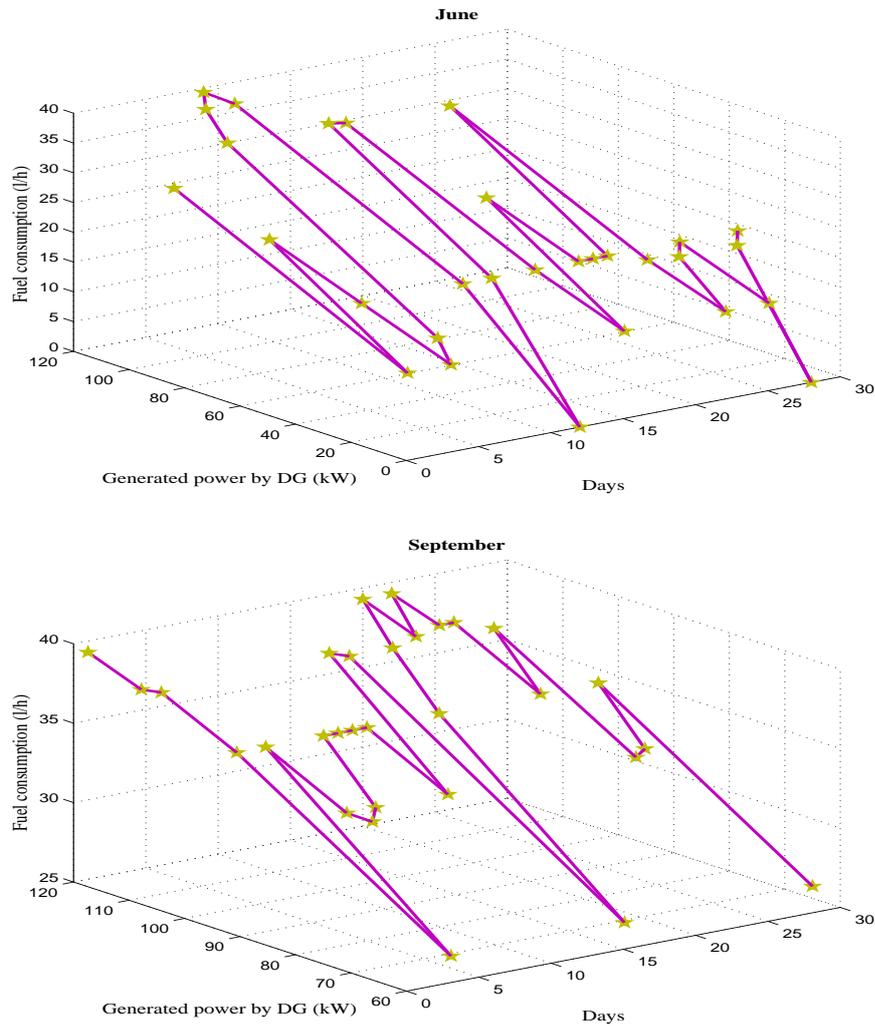


Figure 4.7 – Puissance moyenne journalière générée par le GD et sa consommation en carburant pour les mois de juin et septembre

La relation entre la consommation du carburant du DG et leur émission de CO_2 pour les mois étudiés est représentée sur la Figure 4.8. On remarque que le seuil de pollution est maximal le 9 juin car l'émission de CO_2 atteint 98.23 kg/jour parce qu'on a uniquement la marche du diesel. Par contre en septembre ce pic se répète pendant 3 jours suivant la courbe représentée sur la Figure 4.8 :



Figure 4.8 – Analyse de l’effet de la consommation du carburant et son incidence sur l’émission de CO_2

4.7 Analyse technico-économique du système étudié

L’analyse de l’histogramme de la Figure 4.9 nous donne une idée sur le coût du kWh fournit par le diesel et l’éolien pendant ces deux mois. Sachant qu’au mois de juin l’énergie fournie par l’éolienne est plus importante que celle du diesel ce qui correspond aux coûts de 12792 $DA/mois$ pour l’éolienne et 8808 $DA/mois$ pour le diesel cela est dû au nombre de fonctionnement de chacun qui aura une incidence sur l’émission de CO_2 qui sera moins importante que le mois de septembre, sachant qu’on aura un effet bénéfique sur l’envi-

ronnement, vu que l'Algérie est signataire du traité Kyoto aux politiques de changement climatique.

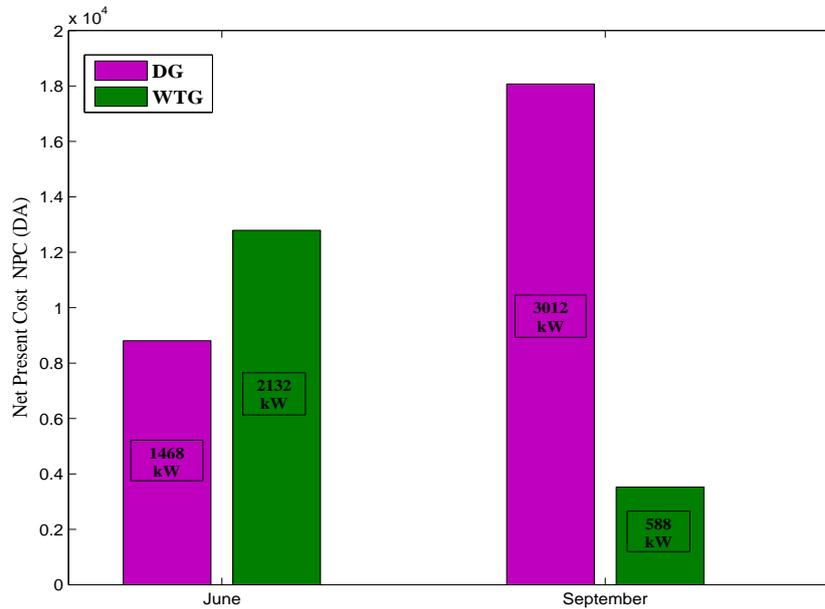


Figure 4.9 – Indice technico-économique du système étudié

Le GD présente le coût le plus élevé (plus de cinq fois du générateur éolien) en mois de septembre, cela est dû au nombre de marche/arrêt de chacun.

4.8 Comparaison entre les deux systèmes

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

4.8.1 Sur le plan économique

Le Tableau 4.8 résume la comparaison des principaux paramètres économiques des deux configurations. On remarque que durant toute l'année le GD présente le coût le plus élevé (plus de deux fois du générateur éolien).

Tableau 4.8 – Comparaison économique entre les deux systèmes

Mois	Coût net actuel (NPC) (6DA/kWh) (DA)	
	WTG	DG
Janvier	4704	17616
Février	5016	14844
Mars	6990	14730
Avril	6708	13572
Mai	6882	14058
Juin	12792	8808
Juillet	4650	17670
Août	4566	17754
Septembre	3528	18072
Octobre	5238	17082
Novembre	4482	17118
Décembre	4572	17748
Total (année)	70128	189072

Le Tableau 4.9 représente la consommation du carburant de générateur diesel et leur coût.

Tableau 4.9 – Coût du système traditionnel

Mois	Consommation du fuel (l)	Coût du carburant (13.7 DA/l) (DA)
Janvier	1018.04	13947.148
Février	882.27	12087.099
Mars	906.92	12424.804
Avril	849.67	11640.479
Mai	879.37	12047.369
Juin	634.66	8694.842
Juillet	989.46	13555.602
Août	1016.70	13928.790
Septembre	1034.01	14165.937
Octobre	993.35	13608.895
Novembre	995.05	13632.185
Décembre	1010.57	13844.809
Total (année)	11210.07	153577.959

4.8.2 Sur le plan environnemental

L'énergie éolienne est une énergie qui n'émet aucun gaz nocif à effet de serre c'est-à-dire aucune émission de CO_2 . Le Tableau 4.10 représente les émissions de CO_2 par le générateur diesel.

Tableau 4.10 – L'émission de CO_2 par le générateur diesel

Mois	Consommation du fuel (l)	Emissions de CO_2 (2.5 kg/l) (kg)
Janvier	1018.04	2545.100
Février	882.27	2205.675
Mars	906.92	2267.300
Avril	849.67	2124.175
Mai	879.37	2198.425
Juin	634.66	1586.650
Juillet	989.46	2473,650
Août	1016.7	2541.750
Septembre	1034.01	2585.025
Octobre	993.35	2483.375
Novembre	995.05	2487.625
Décembre	1010.57	2526.425
Total (année)	11210.07	28025.175

Le taux de l'émission de $CO_2 = 28025.175 \text{ kg/an}$ 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.

On a récapitulé les différents coûts économiques suivant les indices énergétiques de la Sonelgaz au Tableau 4.11. Sachant que la consommation du carburant est plus importante au mois de septembre cela va se répercuter sur le coût du carburant et entrainera une émission de CO_2 considérable que le mois de juin. En plus le coût du kWh fournit par l'éolien pendant l'année est moins cher que le diesel. Donc notre étude nous a permis de voir l'effet sur l'impact économique et écologique, bien que cette énergie éolienne soit plus chère actuellement mais les efforts du gouvernement Algérien nous encourage à utiliser les

énergies renouvelables dont les indices économiques sont réduits avec le développement technologique.

Tableau 4.11 – Résumé de calcul des coûts économiques générés par le système étudié

Months	Fuel consumption (l)	Diesel fuel cost (13.7 DA/l) (DA)	CO ₂ emission (kg)	DG operating hours (h)	Generated power (kW)		Net Present Cost NPC (6 DA/kWh) (DA)	
					DG	WTG	DG	WTG
June	634.66	8694.84	1586.94	672	1468	2132	8808	12792
September	1034.01	14165.94	2585.38	720	3012	588	18072	3528
Year	11210.07	153577.95	28025.175	8616	31512	11688	189072	70128

4.9 Conclusion

La production d'énergie dans une installation hybride et autonome s'avère difficile et doit en toute rigueur dépendre à la fois, des caractéristiques météorologiques du site où le système est installé et également du profil de consommation. En effet, la nature intermittente des sources renouvelables rend difficile la prédiction de cette production en termes de puissance ou d'énergie afin d'assurer une alimentation permanente de la charge. En effet, l'intégration d'un système éolien-diesel se fait à partir d'un dimensionnement et une étude préalable en tenant compte des critères techniques, économiques et écologiques à long terme.

Conclusion Générale et Perspectives

Conclusions générale et perspectives

Le travail effectué dans cette thèse traite l'investigation de l'intégration d'un jumelage éolien-diesel pour alimenter un site isolé situé à l'extrême sud-ouest de L'Algérie. Sachant que l'alimentation de ces sites isolés est assurée par des générateurs diesel, ces derniers posent toujours des problèmes d'ordre (technique, économique et écologique); l'idée principale consiste à jumeler ces diesels déjà sur place avec une centrale éolienne dimensionnée par rapport aux besoins de consommation.

Notre objectif est de profiter pleinement de l'énergie éolienne au cours des périodes de fonctionnement et de minimiser la consommation de carburant diesel afin de réduire l'émission de CO_2 qui entrainera une réduction des coûts de fonctionnement du système. Comparativement au système d'alimentation diesel conventionnel, le système d'énergie hybride éolien-diesel est une des meilleures solutions alternatives présentant de nombreux avantages tels que : plus d'efficacité, un coût d'entretien relativement faible, rentable, etc. Nous avons démontré que la production de l'électricité à l'aide de générateur diesel est inefficace, onéreuse et responsable de l'émission de Gaz à Effet de Serre. Les sites isolés dans le Sud Algérien ont un potentiel de l'énergie éolienne significative; par conséquent, le système d'énergie éolien-diesel est largement recommandé dans ces sites.

Après un rappel sur les SEH en général nous nous sommes intéressés au SEH du type éolien-diesel, nous avons présenté les principaux composants et les régimes de fonctionnement du SHED ainsi que le rôle primordial de l'hybridation entre l'éolien et le diesel pour l'alimentation des sites isolés et éloignés.

Des généralités sur les systèmes éoliens, des notions de bases du système éolien, un aperçu sur les différents composants constituant l'aérogénérateur, les différents types d'éoliennes (à axe vertical, à axe horizontal), 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 leurs domaines d'applications a été étudié dans le deuxième chapitre.

La modélisation d'un modèle global d'un système d'énergie hybride composé : d'un générateur éolien, d'un générateur diesel et un système de stockage a été développé. Le générateur éolien a été modélisé en tenant compte de tous ses éléments : rotor éolien,

transmission, générateur et convertisseurs de puissance. On a modélisé le générateur diesel en tenant compte de tous ses éléments (le moteur diesel et son gouverneur de vitesse, la machine synchrone et le régulateur de tension) en plus un système de stockage d'énergie a été réalisé. Enfin, on a réalisé un algorithme pour l'optimisation du système étudié et proposé.

Les résultats de simulation obtenus confirment la fiabilité et la performance supérieure du système hybride proposé. Sachant que la simulation basée sur des données météorologiques réelles. Dans le cadre de ce travail les modèles de simulation pour le SHED ont été développés et réunis dans une bibliothèque de modèles paramétriques sous l'environnement MATLAB/Simulink. Le système étudié a une technique de contrôle bien asservie pour gérer les différentes sources d'énergie (éolienne, diesel, batterie) permettant d'optimiser le fonctionnement du système hybride. Cette technique dépend de l'analyse des valeurs de vitesse du vent et la puissance requise par la charge.

Notre travail a une portée économique et écologique à long terme. Toutefois, la signature des accords de Kyoto par l'Algérie et l'apparition des problèmes environnementaux pousse la politique énergétique du gouvernement Algérien à investir dans le domaine des énergies renouvelables spécialement dans les sites isolés tel que cette région d'Adrar dont le futur elle aura un essor touristique et technologique.

Pour minimiser ou bien d'éliminer définitivement les problèmes d'alimentation des sites isolés du point de vue (technique, économique et écologique), L'Algérie amorce une dynamique d'énergie verte en lançant un programme ambitieux de développement des énergies renouvelables et d'efficacité énergétique. Ce programme consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de près de 22 000 MW entre 2011 et 2030 dont 12 000 MW seront dédiés à couvrir la demande nationale en électricité et 10 000 MW à l'exportation.

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 première du genre à l'échelle nationale qui est déjà en service et à l'horizon 2020, la wilaya d'Adrar sera renforcée d'une nouvelle centrale de 175 MW à dont la réalisation et les études de localisation sont en cours.

En ce qui concerne la poursuite de ce travail. On va traiter l'amélioration de la qualité d'énergie fournie par le système hybride, en projetant d'autres perspectives dont le remplacement du générateur diesel par l'intégration d'autre source d'énergie renouvelable (photovoltaïque) donc un nouvel système hybride (éolien- photovoltaïque-batterie), afin de prévoir une optimisation énergétique et économique du système multi-sources de production électrique, avec un algorithme adéquat pour la gestion du système et de garantir une disponibilité énergétique : Applications aux sites isolés.

Bibliographie

- [1] B. Multon, « Production d'énergie électrique par sources renouvelables », Techniques de l'Ingénieur Traité, D 4005.
- [2] Annual Report of the Global Wind Energy Council (GWEC) for 2014. Available online at : <http://www.gwec.net/>.
- [3] N. Kasbadji Merzouk, « Quel avenir pour l'énergie éolienne en Algérie ? », Bulletin des Énergies Renouvelables, Publication du Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER), No.14, pp. 6-7, Décembre 2008.
- [4] L. Khettache, « Étude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée », Thèse de Magistère, Université de El Hadj Lakhdar-Batna, Option : énergie renouvelable, 2007.
- [5] Sigma Engineering, « Étude 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.
- [6] Soltane Belakhal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Énergies Renouvelables », Thèse de doctorat, Université de Constantine, 2010.
- [7] B. Bouzidi, « L'Énergie Solaire et les Régions Sahariennes -Exemple de la Région d'Adrar », Rev. Energ. Ren. : Valorisation (1999), 101-104.
- [8] Miloud REZKALLAH, « Amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride Éolien- Diesel », Thèse de l'obtention de la maîtrise en Génie Électrique, Université du Québec, le 3 mai 2010.

-
- [9] « Photovoltaic's systems; a buyer's guide. Natural resources Canada », Renewable and electrical energy division, 580 Booth Street, 17th floor Ottawa, Ont. KIA OE4. ISBN 0-662-31120-5.
- [10] Mann Mk, « Economics of renewable hydrogen it's about more than production », Renewable hydrogen energy forum, Washington.
- [11] Miguel lopez, « Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse de doctorat, Université de PARIS-SUD 11, 2004.
- [12] Vaughn C. Nelson, Ken L. Starcher, Robert E. Foster, R. Nolon Clark, Deon Raubenheimer, « Wind hybrid systems technology characterization », West Texas AM University-AEI, New Mexico State University-SWTDI, USDA-ARS Bushland, Vista University, May 2002.
- [13] E. Ian Baring-Gould, L. Flowers, P. Lundsager, « Worldwide status of wind-diesel applications », Pre-Workshop Wind-Diesel 101, Anchorage, Alaska, 2004.
- [14] J. G. McGowan, J.F. Manwell, « Hybrid/PV/Diesel system experiences », Renewable Energy, 16 (1999) pp. 928-933.
- [15] B. Wichert, « PV-diesel hybrid energy systems for remote area power generation - A review of current practice and future developments », Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 1, No. 3, (1997) pp. 209-228.
- [16] 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.
- [17] Weis, T. M., et A. Ilinca, « The utility of energy storage to improve the economics of wind-diesel power plants in Canada », Renewable Energy, Vol. 33, No. 7 (2008), pp. 1544-57.
- [18] M.A. Elhadidy, S.M. Shaahid, « Parametric study of hybrid wind/solar/diesel power generating systems », Renewable Energy, Vol. 66, No. 1, (2000) pp. 129-139.

-
- [19] W. Kellogg, M.H. Nehrir, G. Venkataramanan, V. Gerez, « Optimal unit sizing for a hybrid wind/photovoltaic generating system », *Electric Power Systems Research*, Vol. 39, No. 1, (1996) pp. 35-38.
- [20] M. Muselli, G. Notton, A. Louche, « Design of hybrid-photovoltaic power generator with optimization of energy management », *Solar Energy*, Vol. 65, No. 3, (1999) pp. 143-157.
- [21] L. H. Hansen, P. Lundsager, « Review of relevant studies of isolated systems », Risø-R-1109(EN) 2000.
- [22] D. Turcotte, M. Ross, F. Sheriff, « Photovoltaic hybrid system sizing and simulation tools : status and needs », *PV Horizon : Workshop on photovoltaic hybrid systems*, Montreal, 2001.
- [23] Hussein Ibrahim, « Étude et conception d'un générateur hybride d'électricité de type éolien-diesel avec élément de stockage d'air comprimé », Thèse de doctorat, Université du Québec à Chicoutimi, juin 2010.
- [24] T. Ackermann, L. Söder, « An overview of wind energy-status », *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 6 (2002) pp. 67-128.
- [25] « 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>.
- [26] Vincent Rogez, « Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire », Thèse de doctorat, Université d'Artois, France, Décembre 2004.
- [27] Documentation en ligne sur <http://www.ferme-energie.ca/IReF>.
- [28] 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.
- [29] Y. Jean, A. Nouaili, P. Viarouge, B. Saulnier, R. Reid, « Développement d'un

-
- système JEDHPSS représentatif d'un village typique des réseaux non reliés », Rapport IREQ-94 -169-C, 1994.
- [30] R. Gagnon, A. Nouaili, Y. Jean, P. Viarouge, « Mise à jour des outils de modélisation et de simulation du Jumelage Éolien-Diesel à Haute Pénétration Sans Stockage et rédaction du devis de fabrication de la charge de lissage », Rapport IREQ-97-124-C, 1997.
- [31] Hussein Ibrahim, Adrian Ilinca, Jean Perron, « Energy Storage Systems - Characteristics and Comparisons », *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, Vol. 12, Issue 5, June 2008, pp. 1221-1250.
- [32] Brice BELTRAN, « Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrice asynchrone double alimentation : du mode glissant classique au mode glissant d'ordre supérieur », Thèse de doctorat, Université de Bretagne Occidentale, le 06 juillet 2010.
- [33] Salma El Aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, le 06 décembre 2004.
- [34] Technique de l'ingénieur BM 4640.
- [35] Frédéric Poitiers, « Étude 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 », Thèse de doctorat, Université de Nantes-France, le 19 décembre 2003.
- [36] H. L. Naqra, B. Dubé, « Slip power recovery induction generators for large vertical axis wind turbine », *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol. 3, No. 4, December 1988, pp. 733-737.
- [37] D. Tran, « Conception optimale intégrée d'une chaîne éolienne passive : Analyse de robustesse, validation expérimentale », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, le 27 septembre 2010.
- [38] H. Camblong, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable »,

-
- Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, le 18 décembre 2003.
- [39] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, « Technologie des systèmes éoliens - intégration dans les réseaux électriques », la Revue 3EI, No. 39, 2004.
- [40] Nicolas LAVERDURE, « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, le 9 décembre 2005.
- [41] Martine. O, L. Hansen, « Aerodynamics of Wind Turbines », Second edition published by Earthscan in the UK and USA, 2008.
- [42] G. L. Johnson, « Wind energy systems », Electronic Edition, December, 2001.
- [43] E. Hau, « Wind Turbines », Springer, 2000.
- [44] R. Melicio, V.M.F. Mendes, J.P.S. Catalao, « Computer simulation of wind power systems : Power Electronics and Transient Stability Analysis », International Conference on Power System Transients (IPST 2009), Kyoto, Japan, Juin 3-6, 2009.
- [45] M. Machmoum, F. Poitiers, L. Moreau, M.E. Zaïm, R. Le Doeuff, « Étude d'éoliennes à vitesse variable basées sur des machines asynchrones (MAS-MADA) », Large-GE44, Pôle Atlantique de Génie Électrique, École polytechnique de l'université de Nantes.
- [46] L. Leclercq, « Apport du stockage inertiel associé à des éolienne dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes » Thèse de doctorat, Université de Lille 1, Laboratoire d'électrotechnique et d'électronique de puissance de Lille, le 14 Décembre 2004.
- [47] H. Ben Ahmed, B. Multon, C. Nichita, X. Roboam, O. Gergaud et B. Dakyo, « Aérogénérateurs électriques », Techniques de l'Ingénieur, D 3960, Nov. 2004.
- [48] M. Kassa IDJDARENE, « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Électriques Éoliennes Autonomes », Thèse de doctorat, Université Abderrahmane MIRA-Béjaia, le 23 Mai 2010.

-
- [49] A. Mirecki, « Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, France, 2005.
- [50] R. Hoffman, « A comparison of control concepts for wind turbines in terms of energy capture », Thèse Dipl.-Ing, Université de Darmstadt, 2002.
- [51] R. Ramakumar, A. Naeter, « Role of Renewable Energy in the Development and Electrification of Remote and Rural Areas », Power Engineering Society General Meeting IEEE, 6-12 June 2004, Vol. 2, pp. 2103-2105.
- [52] L. Chang, « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review, Summer/Été 2002, pp. 1-5.
- [53] B. Multon, G. robin, M. Ruellan et H. Ben Ahmed, « Situation énergétique mondiale à l'aube du 3 ème millénaire : Perspectives offertes par les ressources renouvelables », Revue 3EI, No.36, Mars 2004, pp. 1-14.
- [54] Site internet de l'association danoise de l'industrie éolienne :
<http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/size.htm>.
<http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/tower.htm>.
- [55] A. Smadi, M. Farida, « Contribution à l'étude des systèmes éoliennes, application aux génératrices : A courant continue, Synchrones à pôles saillant et à Aimant permanent », Thèse ingénieur de l'université de EL Hadj Lakhdar-Batna, le 27 juillet 2007.
- [56] BAGHDADI Fazia, « Modélisation et simulation des performances d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables », Thèse de magistère, Université de Tizi-ouzou, le 26 septembre 2011.
- [57] P. Leconte, M. Rapin, E. Szechenyi, « Éolienne », Techniques de l'Ingénieur, BM 4640.
- [58] T. Grinoux, R. Gibert, P. Neau, C. Buthion, « Éoliennes en milieu urbain-État de l'art », Agence régionale de l'environnement et des nouvelles énergies « Île-de-France », Actualisation janvier 2006 (P.SALVI), pp. 1-129.

-
- [59] B. Sedaghat, A. Jalilvand, R. Noroozian, « Design of a multilevel control strategy for integration of stand-alone wind/diesel system », *Electrical Power and Energy Systems*, 35 (2012) pp. 123-137.
- [60] Kassem Ahmed M, Yousef Ali M, « Robust control of an isolated hybrid wind-diesel power system using Linear Quadratic Gaussian approach », *Int Electr Power Energy Syst*, 33 (2011) pp. 1092-100.
- [61] Ghedmasi K, Azouzellag D, « Improvement of performances for wind energy conversions systems », *Int Electr Power Energy Syst*, 32 (2010) pp. 936-45.
- [62] Siegfried Heier, « Grid Integration of Wind Energy Conversion Systems », John Wiley and Sons Ltd. ISBN : 0-471-97143-X, 1998.
- [63] Papathanassiou, S. A., et M. P. Papadopoulos, « Dynamic characteristics of autonomous wind-diesel systems », *Renewable Energy*, Vol. 23, No. 2, (2001) pp. 293-311.
- [64] R. Cardenas-Dobson, « Control of Wind Turbine Using a Switched Reluctance Generator », Thèse de doctorat, Université de Nottingham, 1996.
- [65] M. Mayouf, « Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimants permanents », Thèse de magistère, Université de El Hadj Lakhdar-Batna, option énergies renouvelables, 2007.
- [66] A. Benbrahim, « Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents », Thèse de magistère, Université de El Hadj Lakhdar-Batna, option électricité industrielle/commande robuste, le 18 juin 2009.
- [67] M. Kant, « Actionneurs à collecteur à aimant permanent », *Techniques de l'Ingénieur traité, Génie électrique D 3695*.
- [68] G. Grellet, G.Clerc, « Actionneurs électriques », Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.
- [69] M. Chinchilla, J.C. Burgos, « Control of permanent magnet generator applied to variable speed wind energy systems connected to the grid », *IEEE Transactions on energy conversion*, Vol. 1, (March 2006) pp. 130-135.

-
- [70] A. Djerdir, « Maquette pédagogique associant un générateur photovoltaïque et des super-condensateurs dans une application transport », e-mail : Khadija.elkhadri@utbm.fr.
- [71] B. Sebti, « Étude comparative des performances statiques et dynamiques d'un contrôle de découplage et d'un moteur à induction alimenté par un convertisseur statique », Thèse de magistère, Université de El Hadj Lakhdar-Batna, 2005.
- [72] R. Sebastian, « Modelling and simulation of a high penetration wind diesel system with battery energy storage », *Electrical Power and Energy Systems*, 33 (2011) pp. 767-774.
- [73] Bo, Kuang, Wang Youyi et Tan Yoke Lin, « An H controller design for diesel engine systems », In. Vol. 1, pp. 61-6. Coll. « Power Con 2000. International Conference on Power System Technology. Proceedings (Cat. No.00EX409) ». Piscataway, NJ, USA : IEEE. <http://dx.doi.org/10.1109/ICPST.2000.900032>.
- [74] Hannett, L. N., F. P. de Mello, G. H. Tyllinski et W. H. Becker, « Validation of nuclear plant auxiliary power supply by test », *IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems*, Vol. PAS-101, No. 9, pp. 3068-74.
- [75] Yeager, K. E. et J. R. Willis, « Modeling of emergency diesel generators in an 800 megawatt nuclear power plant », *IEEE Transactions on Energy Conversion*, Vol. 8, No. 3, (1993) pp. 433-41.
- [76] 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.
- [77] R. Dufo-López, José L. Bernal-Agustín, « Design and control strategies of PV/diesel systems using genetic algorithms », *Sol. Energy*, 79 (2005) pp. 33-46.
- [78] MATLAB/Simulink.www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/physmod/powersys/simplifiedsynchronousmachine.html, 2005.
- [79] D. Linden, T.B. Reddy (Eds.). *Handbook of Batteries*, 3rd ed. McGrawHill, ISBN : 978-0-07-135978-8, 2002.

-
- [80] O. Tremblay, L.-A. Dessaint, A.-I. Dekkiche, « A generic battery model for the dynamic simulation of hybrid electric vehicles », In : Vehicle Power and Propulsion Conference VPPC, IEEE 9-12 September 2007, pp. 284-289.
- [81] C. D. Barley and C. B. Winn, « Optimal dispatch strategy in remote hybrid power systems », Solar Energy, Vol. 58, (1996) No. 4-6, pp. 165-179.
- [82] E. Hau, « Wind Turbines, Fundamentals, Technologies, Application, Economics », 2nd ed. Springer, 2005.
- [83] Équilibres, La lettre de la Commission de Régulation de l'Electricité et du Gaz, No.12, Mars 2011.
- [84] Programme des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique, mars 2011.
- [85] « Publication d'une nouvelle carte du gisement éolien en Algérie par le CDER », Extrait du portail Algérien des énergies renouvelables disponible en ligne sur : <http://portail.cder.dz/spip.php?article4321>.
- [86] L. Hamane, « Les ressources éoliennes de l'Algérie », Bulletin des Énergies Renouvelables, No.3 Juin 2003.
- [87] Station météorologique de l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) à Adrar, Algeria. <http://www.urerms.dz/>.
- [88] Documentation NORDEX disponible en ligne sur : www.nordex-online.com.
- [89] Documentation FG-Wilson disponible en ligne sur : www.FG-Wilson-online.com.

Annexes

Annexe A

Paramètres du système éolien

A.1 Données techniques de NORDEX N27-150

NORDEX N27-150

Company	NORDEX
Type/Version	N27/150
Rated power	150,0 kW
Secondary generator	30,0 kW
Rotor diameter	27,0 m
Tower	Tubular
Grid connection	50 Hz
Origin country	DK
Blade type	LM 12.8
Generator type	Two generator
Rpm, rated power	36,0 rpm
Rpm, initial	27,0 rpm
Hub height(s)	30,0; 31,5; 40,5 m
Maximum blade width	0,00 m
Blade width for 90% radius	0,00 m
Valid	No
Creator	EMD
Created	1999-12-10 00:00
Edited	1999-12-10 00:00



Power curve: Fab 1.225 25.00 0.00
Source Fab

Source date	Creator	Created	Edited	Default	Stop windSpeed	Air density	Tip angle	Power control	CT curve type
					[m/s]	[kg/m ³]	[°]		
1899-12-30 00:00	EMD	1992-10-22 00:00	2000-11-15 14:20	No	25,0	1,225	0,0	Stall	Standard stall

Power curve															
Wind speed [m/s]	3,00	4,00	5,00	6,00	7,00	8,00	9,00	10,00	11,00	12,00	13,00	14,00	15,00	16,00	17,00
Power [kW]	0,00	8,00	19,00	31,00	55,00	83,00	110,00	136,00	160,00	170,00	176,00	180,00	175,00	172,00	164,00
Ce	0,000	0,356	0,433	0,409	0,457	0,462	0,430	0,388	0,343	0,281	0,228	0,187	0,148	0,120	0,095
Wind speed [m/s]	18,00	19,00	20,00	21,00	22,00	23,00	24,00								
Power [kW]	155,00	150,00	145,00	145,00	140,00	135,00	130,00								
Ce	0,076	0,062	0,052	0,045	0,037	0,032	0,027								

Rotor	
Type	3-bladed, horizontal axis, upwind
Rotor diameter	27 m
Swept area	573 m ²
Power regulation	Stall
Cut-in / cut-out wind	3 / 25 m/s
Rated wind speed	15.5
Survival wind speed	55 m/s
Calculated life time of turbine	25 years
Gear	
Type	3 stage helical gearbox
Material	Ductile cast iron
Nominal load	200 kW
Ratio	1:28
Oil-quantity	180 l
Blades	
Blade length	12.8 m
Material	Fiberglass reinforced polyester
Length of blade tip	1.46 mm
Generator	
Nominal power	150 / 30 kW
Synchronous speed	1500 / 750 tr/min
Protection classification	IP 55
Type	Synchronous or Asynchronous machine
Controller	
Type	Micro speed based
Grid connection	Via soft-power controller
Remote communication	Included
Braking system	
Aerodynamic, type	Pivot able blade tips
Aerodynamic, activation	Hydraulic
Mechanical, type	Hydraulic disc brake
Mechanical, location	On high speed shaft
Number of brake calibers	2
Time to stop rotor from max. RPM	App. 3 sec.

A.2 Paramètres de la GSAP

Paramètres	Valeurs
R_s	0.895 Ω
L_d	0.012 H
L_q	0.0211 H
J_r	0.00141 kg.m ²
F	0.001 Nm/rad.s ⁻¹
p	3 pôles
ϕ_r	0.9 Wb

Annexe B

Paramètres du générateur diesel

B.1 Données techniques du GD FG Wilson P150-1

FG Wilson P150-1



www.FGWilson.com



P150-1

Ratings and Performance Data			
Engine Make & Model:	Perkins 1006TAG		
Alternator manufactured for FG Wilson by:	Leroy Somer		
Alternator Model:	LL3014E		
Control Panel:	DCP-10		
Base Frame:	Heavy Duty Fabricated Steel		
Circuit Breaker Type:	3 Pole MCCB		
Frequency:	50 Hz	60 Hz	
Engine Speed: RPM	1500	1800	
Fuel Tank Capacity: litres (US gal)	349 (92.2)		
Fuel Consumption: l/hr (US gal/hr)			
(100% Load)	- Prime	30.9 (8.2)	37.3 (9.9)
	- Standby	34.2 (9.0)	40.9 (10.8)

Output Ratings		
Generating Set Model	Prime	Standby
380-415V,50Hz	135.0 kVA / 108.0 kW	150.0 kVA / 120.0 kW
480V, 60 Hz	150.0 kVA / 120.0 kW	165.0 kVA / 132.0 kW

Ratings at 0.8 power factor.

Engine Technical Data	
No. of Cylinders / Alignment:	6 / In Line
Cycle:	4 Stroke
Bore / Stroke: mm (in)	100.0 (3.9)/127.0 (5.0)
Induction:	Turbocharged Air To Air Charge Cooled
Cooling Method:	Water
Governing Type:	Electronic
Governing Class:	ISO 8528 G2
Compression Ratio:	17.0:1
Displacement: l (cu. in)	6.0 (365.5)
Moment of Inertia: kg m ² (lb/in ²)	1.61 (5502)
Engine Electrical System:	
- Voltage / Ground	12/Negative
- Battery Charger Amps	55

Fuel System				
Fuel Filter Type:	Replaceable Element			
Recommended Fuel:	Class A2 Diesel or BSEN590			
Fuel Consumption: l/hr (US gal/hr)				
Prime	110% Load	100% Load	75% Load	50% Load
50 Hz	34.2 (9.0)	30.9 (8.2)	23.8 (6.3)	16.8 (4.4)
60 Hz	40.9 (10.8)	37.3 (9.9)	29.1 (7.7)	20.5 (5.4)
Standby	100% Load	75% Load	50% Load	
50 Hz	34.2 (9.0)	26.2 (6.9)	18.4 (4.9)	
60 Hz	40.9 (10.8)	31.6 (8.3)	22.2 (5.9)	

B.2 Paramètres de moteur diesel

Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
T ₁	0.01 sec	T ₆	0.0384 sec
T ₂	0.02 sec	K	40
T ₃	0.2 sec	T _D	0.024 sec
T ₄	0.25 sec	T _{min}	0 P.U
T ₅	0.009 sec	T _{max}	1.1 P.U

Quantity of CO₂ produced= 2.4 to 2.8 kg/l

Cost Of Energy (COE) = 6 DA/kWh

Diesel fuel cost= 13.70 DA/l

Annexe C

Systeme de stockage d'énergie

C.1 Paramètres de la batterie Ni-MH

Paramètres	Valeurs
E_0	256.95 V
K	3.7501 V
Q	410.16 Ah
A	28.80 V
B	0.0384 Ah ⁻¹
R	0.0154 Ω
C	8 mF
L	2.5 μ H