

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR- ANNABA
BADJI MOKHTAR –ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار- عنابة

Faculté :Sciences de l'Ingéniorat

Département : Électrotechnique

Domaine : Sciences et Technologies

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de MASTER

Thème :

Analyse et contrôle d'un système Jumelé éolien-diesel

Présentés Par:

- Bouguerra Abdelouahab
- Labidi Manal

Encadrant : KSENTINI Abdelhamid

Grade : MCB

Université : UBMA

Jury de Soutenance:

ABDERREZEK Abdallah	Pr	UBMA	Président
KSENTINI Abdelhamid	MCB	UBMA	Encadrant
MESBAH Tarek	MCA	UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2019/2020

REMERCIEMENT

Je tiens tout d'abord à remercier le directeur de cette thèse, **Dr. Ksentini Abdelhamid** pour m'avoir fait confiance, guidé, encouragé et conseillé, j'espère avoir été à la hauteur. Je lui suis également reconnaissant pour le temps conséquent qu'elle m'a accordé, ses qualités pédagogiques et scientifiques, sa franchise et sa sympathie. J'ai beaucoup appris à ses côtés et je lui adresse ma gratitude pour tout cela.

J'adresse de sincères remerciements à **Dr. Mesbah Tarek** et **Pr. Abderrezek Abdallah** pour m'avoir fait l'honneur de participer au jury de soutenance.

Enfin, Je voudrais remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à mes recherches et à l'élaboration de ce mémoire.

Merci

DEDICACE

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

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

A mes frères : « Aymen, Ahmed, Azzedeine »

A toute ma famille

A tous mes camarades

A tout la promotion master 2 « 2019/2020 »

A mon binôme « Labidi Manal »

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

Bouguerra

DEDICACE

Je remercie le bon dieu de m'avoir donné le courage, la santé, la volonté afin de pouvoir réaliser ce modeste travail.

Je tiens à le dédier particulièrement à mes chères parents pour leurs sacrifices, patience, leur présence, leur soutien tout au long de mes années d'études, que le bon dieu les garde et protège.

A mes frères: «Bilale & Walid »

A Ma sœur : « Nawel » & ma petite fille «Hiba »

A mes meilleurs amis: «Nahla, Meryoma, Hajer, Assma, Chaima, Manel, Ghaddab, Djebbari, Raouf, Chihab, Choukri.....qui m'ont soutenu tout au long de mes études ».

A toute la promotion master 2 « 2019/2020 »

A mon binôme « Bouguerra A.wahab »

En fin à tous ceux qui que je connais ou qui me connaissent que je n'ai pas pu citer.

Labidi manal



Université Badji Mokhtar- Annaba



Faculté des sciences de l'ingénierat

Département d'Electrotechnique



PROJET DE FIN D'ETUDE



En vue de l'obtention du Diplôme Master En Electrotechnique.

Option : Réseaux Electriques

THEME :

Analyse et Contrôle d'un système Jumelé éolien - diesel

Présentés par :

- Bouguerra A.ouahab
- Labidi manal

Encadré par :

Mr : Ksentini Abdelhamid

Résumé :

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

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



Université Badji Mokhtar- Annaba

Faculté des sciences de l'ingénierat

Département d'Electrotechnique



PROJET DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du Diplôme Master En Electrotechnique.

Option : Réseaux Electriques

THEME :

Analyse et Contrôle d'un système Jumelé éolien - diesel

Présentés par :

- Bouguerra A.ouahab
- Labidi manal

Encadré par :

Mr : Ksentini Abdelhamid

ملخص :

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

كلمات البحث : نطالغ الهجين ، التسيير ، المدجه ، توربينة الرياح مجموعة الديزل التخزين ، كلفة و المحاكاة.

Table des matières

Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables	
I.1. Introduction.....	5
I.2. Notions ET Principe sur les énergies renouvelables.....	5
I.3. Description de la chaine de conversion photovoltaïque.....	6
I.3.1. l'énergie hydraulique (ou hydrau-électricité)	6
I.3.1.1. Les divers types d'aménagement hydroélectrique.....	6
I.3.1.2. Principe de fonctionnement	6
I.3.1.3. Les turbines	7
I.3.2. Energie de la géothermie.....	8
I.3.2.1. Principe de fonctionnement.....	9
I.3.3. l'énergie Biomasse.....	10
I.3.3.1. Constituants de la biomasse.....	11
I.3.4. L'énergie solaire.....	12
I.3.4.1. L'énergie solaire thermique.....	13
I.3.4.2. L'énergie solaire à effet photovoltaïque.....	14
I.3.5. l'énergie éolienne.....	16
I.3.5.1. Historique et développement de l'énergie éolienne.....	16
I.3.5.2 Production mondiale d'énergie éolienne.....	16
I.4. Définition et missions des systèmes hybrides.....	17
I.4.1. Différents types topologies de systèmes hybrides.....	21
I.4.2. Principaux Composants des systèmes hybrides.....	24
I.4.2.1. Générateurs photovoltaïques.....	24
I.4.2.2. Eoliennes.....	26
I.4.2.2-a Piles à combustibles.....	27
I.4.2.3. Générateur diesel.....	28
I.3.2.4. Systèmes de stockage.....	29
I.3.2.5. Système de supervision.....	29

Table des matières

I.3.2.6. Convertisseurs.....	29
I.3.2.7. Charges.....	30
I.5. Systèmes autonomes et non autonomes de production d'énergie.....	30
I.5.1. Système non autonome.....	30
I.5.2. Système autonome.....	31
I.6. Problèmes rencontrés dans le fonctionnement dans un réseau autonom.....	31
I.7. Qualité de l'énergie électrique dans les réseaux autonomes.....	32
I.8. CONCLUSION.....	32

Chapitre II : L'énergie éolienne et le vent

II.1. Introduction.....	34
II.2. Origine du vent	34
II.2.1. Eléments de physique atmosphérique.....	34
II.3. Les causes principales des vents.....	37
II.3.1. La circulation atmosphérique et les systèmes de pression semi-permanents.....	37
II.3.2. Vents locaux.....	39
II.4. Vitesse et direction du vent.....	40
II.4.1. Le vent et ses variations.....	41
II.5. Définition de l'énergie éolienne.....	45
II.5.1. Contexte actuel en Algérie.....	47
II.5.2. Sonelgaz inaugure sa première ferme éolienne de 10 MW à Adrar.....	48
II.6. Représentation d'une éolienne et son énergie de production.....	49
II.6.1. les différents types des turbines éoliennes.....	49
II.6.1.1 Eolienne à axe vertical.....	50
II.6.1.2 Eoliennes à axe horizontal.....	52
II.6.2. Eoliennes lentes.....	54
II.6.3. Eoliennes rapides.....	54
II.7. Principales composantes d'éolienne.....	55

Table des matières

II.8. Les éoliennes connectées au réseau électrique.....	58
II.8.1. Les éoliennes à vitesse fixe.....	58
II.8.2. Les éoliennes à vitesse variable.....	59
II.9. principe de conversion de l'énergie éolienne.....	61
II.9.1. Zones de fonctionnement de l'éolienne.....	61
II.10. Conclusion.....	64

Chapitre III : Modélisation et commande du System Hybride

III.1. Introduction.....	66
III.2. Dimensionnement du système Hybride	66
III.2.1. Modélisation du système éolien	67
III.2.1.1. Modélisation du vent	68
III.2.1.2. Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.....	69
III.2.1.2.a Loi de BET	69
III.2.1.2.b Production d'énergie mécanique.....	72
III.2.1.3-Modélisation de la turbine	73
III.2.1.3-a Equation dynamique de l'arbre	75
III.2.1.3-b Schéma bloc de la turbine.....	76
III.2.2. La Génératrice synchrone a aimant permanant.....	76
III.2.2.1. L'architecture de la GSAP.....	77
III.2.2.2. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	77
III.2.2.3. Hypothèse simplificatrice	77
III.2.2.4. La Mise en équation de la MSAP.....	78
III.2.3. Modélisation du générateur diesel	83
III.2.4. Batterie	85
III.2.5. Redresseur.....	87
III.2.5.1. définition.....	87
III.2.5.2. Structure du redresseur	87

Table des matières

III.2.5.3. Etude de la tension de charge V_{ch}	88
III.2.5.4. Etude des courants.....	88
III.2.6. Modélisation de l'onduleur	89
III.3 Conclusion	91
Chapitre IV : Simulation et interprétation des résultats obtenus	
IV.1. Introduction.....	93
IV.2. Simulation du vent et de la turbine.....	94
IV.2.1. Le vent.....	94
IV.2.2. La turbine.....	96
IV.3. Analyse énergétique.....	97
IV.4. Conclusion	102
Conclusion générale.....	103

Table des figures

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

Figure I.1 : Production mondiale d'électricité renouvelable par région	5
Figure I.2 : Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique.....	7
Figure I.3 : Géothermie haute énergie.....	8
Figure I.4 : Relation entre profondeur et température de l'eau souterraine.....	9
Figure I.5 : schéma de principe d'une usine biomasse.....	11
Figure I.6 : L'énergie solaire.....	13
Figure I.7 : principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.....	14
Figure I.8 : principe de fonctionnement de l'énergie solaire à effet photovoltaïque.....	15
Figure I.9 : l'évolution des capacités éoliennes dans le monde 2000-2013	16
Figure I.10 : Différentes sources utilisables dans un système électrique hybride.	18
Figure I.11 : Solaire-éolien, stockage à batteries, installation isolée	21
Figure I.12 : Solaire-éolien, batteries de stockage et hydrogène, installation isolée	22
Figure I.13 : Solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée	22
Figure I.14 : Eolien, stockage à hydrogène et par super condensateurs, installation isolée	23
Figure I.15 : Éolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée	23
Figure I.16 : Modules photovoltaïques sur support (Source: Web EREN, US Department of Energy).....	25
Figure I.17 : La ferme éolienne d'Adrar.....	27
Figure I.18 : Configuration du générateur diesel [18].....	28
Figure I.19 : Classification des perturbations du point de vue qualité d'énergie.....	32

Chapitre II : L'énergie éolienne et le vent

Table des figures

Figure II.1 : Vue schématique de la couche atmosphérique standard.....	35
Figure II.2 : Force de Coriolis.....	36
Figure II.3 : Circulation atmosphérique simplifiée (Hiver dans l'hémisphère Nord).....	37
Figure II.4 : Circulation du vent autour des systèmes de pression.....	39
Figure II.5 : Instrument de mesure de la direction et la vitesse du vent.....	41
Figure II.6 : Variations mensuelles moyennes (exemple).....	42
Figure II.7 : Variations inter annuelles.....	43
Figure II.8 : Variations avec l'altitude.....	43
Figure II.9 : Influence de la végétation sur les vents dominants.....	45
Figure II.10 : schéma de principe d'une éolienne.....	46
Figure II.11 : Correspondance taille-puissance des éoliennes.....	46
Figure II.12 : Principaux organes du système de conversion éolien [04].....	47
Figure II.13 : Densité de puissance moyenne éolienne récupérable à 10 m du sol en Algérie.....	48
Figure II.14 : La ferme éolienne d'Adrar.....	49
Figure II.15 : technologie éolienne à axe vertical.....	50
Figure II.16 : éolienne de Savonius.....	51
Figure II.17 : Eolienne de Darrieux.....	52
Figure II.18 : technologie éolienne à axe horizontale.....	53
Figure II.19 : Composant d'une éolienne à axe horizontal.....	55
Figure II.20 : Eléments attachés à une nacelle.....	57
Figure II.21 : Génératrice connecté a la moyeu.....	58
Figure II.22 : Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	61

Table des figures

Figure II.23 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....62

Figure II.24 : Limitation de puissance éolienne, a) pitch, b) déviation verticale de l'axe de Rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse continûment Variable.....63

Chapitre III : Modélisation et commande du System Hybride

Figure III.1 : Schéma présentatif d'un système hybride étudié.....66

Figure III.2 : Structure du système éolien [59].....67

Figure III.3 : Schéma d'une éolienne.....67

Figure III.4 : Schéma de bloc de vent.....68

Figure III.5 : Modèle du vent.....69

Figure III.6 : Tube de courant autour d'une éolienne.....70

Figure III.7 : Coefficient de puissance.....71

Figure III.8 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes.....71

Figure III.9 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné.....73

Figure III.10 : Entrées – sorties du modèle de la turbine éolienne.....73

Figure III.11 : Schéma de la turbine éolienne.....74

Figure III.12 : Schéma électrique équivalent de la turbine éolienne.....75

Figure III.13 : Schéma bloc du modèle de la turbine.....76

Figure III.14 : Quelques configurations du placement des aimants.....77

Figure III.15 : a- machine asynchrone _ b- machine a aimant permanant.....78

Figure III.16 : schéma représentatif de la MSAP à modéliser.....79

Figure III.17 : Transformation triphasée- diphasée.....80

Figure III.18 : Modèle simplifié du générateur diesel.....83

Figure III.19 : Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié.....84

Table des figures

Figure III.20 : Evolution de la tension avec le temps, durant la charge et la décharge.....	85
Figure III.21 : Schéma électrique simplifié d'une batterie.....	85
Figure III.22 : Schéma électrique D'un redresseur triphasé non commandé.....	88

Chapitre IV : Simulation et Interprétation des résultats obtenus

Figure IV.1 : Schéma global du système.....	93
Figure IV.2 : Organigramme de la méthode de simulation.....	94
Figure IV.3 : Bloc de simulation de la vitesse du vent.....	95
Figure IV.4: évolution de la vitesse du vent dans le temps	95
Figure IV.5 : bloc de simulation de la turbine éolienne.....	96
Figure IV.6 : Schéma de simulation du système du éolien avec la charge.....	97
Figure IV.7 : L'évolutiondes tensions statoriques.....	98
Figure IV.8 : L'évolutiondes courants statoriques.....	98
Figure IV.9 : Schéma de simulation du système du générateur diesel avec la charge.....	99
Figure IV.10 : L'évolution des tensions statoriques.....	100
Figure IV.11: L'évolution des courants statoriques.....	100
Figure IV.12 : Courants produits par (Eolienne/Diesel).....	101
Figure IV.13 : Aperçu de La fréquence.....	101

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les énergies renouvelables

Tableau I.1 : Classification des SEH par gamme de puissance.....	18
Tableau I.2 : Table de Classification des taux de pénétration des systèmes éoliens-diesel proposée par Steve Drouilhet, National Renewable Energy Laboratory (NREL).....	20

Chapitre II : L'énergie éolienne et le vent

Tableau II.1 : Echelle Beaufort [38].....	40
Tableau II.2 : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement.....	44
Tableau II.3 : Classification des turbines éoliennes [47].....	54

Introduction générale

Introduction générale

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre, lors de l'exploitation de ces ressources, des ressources énergétiques alternatives ont été développées et doivent continuer l'être.

Le développement et l'exploitation des ressources énergétiques renouvelables et des systèmes de production décentralisés d'électricité d'origine renouvelable ont connu une forte croissance ces dernières années. D'ici une vingtaine d'années, tout système énergétique durable sera basé sur l'utilisation rationnelle des sources traditionnelles et sur un recours accru aux énergies renouvelables. Il est intéressant de les exploiter sur le lieu de consommation, en les transformant directement soit en chaleur, soit en électricité selon les besoins. Cette production par sources d'énergies renouvelables offre une plus grande sûreté d'approvisionnement des consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant le caractère aléatoire de ces sources nous impose d'établir des règles de dimensionnement et d'utilisation de ces systèmes pour les exploiter au mieux. Les techniques d'extraction de la puissance de ces ressources demandent des recherches et des développements plus approfondis visant à fiabiliser, baisser les coûts (de fabrication, d'usage et de recyclage) et augmenter l'efficacité énergétique.

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 développement, comme les pays de Maghreb. Ces pays possèdent de nombreuses régions, isolées et éloignées des réseaux classiques de distribution d'électricité. Ainsi, l'extension de ces réseaux serait d'un coût financier exorbitant. Pour résoudre ce problème, l'exploitation du potentiel en énergies renouvelables dont dispose ces pays doit être une priorité.

Le travail qui a été défini pour cette étude concerne une application stationnaire de petite taille, isolée du réseau, alimentée par un système hybride autonome. L'objectif assigné est d'étudier les performances d'un système hybride et d'évaluer les potentialités d'une installation de conversion d'énergies utilisant des sources renouvelables, un groupe électrogène comme générateur de secours et leurs hybridations avec des batteries et autres composant système. Par ailleurs, il fait état des récents développements concernant les systèmes de conversion de l'énergie renouvelables et les composants qui y sont associés. Ce travail présente aussi une modélisation et simulation d'un système de conversion hybride, appliquées pour deux sites isolés : Bordj Cédrie en Tunisie et Adrar en Algérie.

Introduction générale

L'énergie éolienne est utilisée par l'homme depuis très longtemps déjà. Elle remplaça les rames pour faire avancer les navires, elle fut utilisée pour actionner les meules des moulins, elle permet encore le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 100 ans elle est utilisée pour produire de l'électricité qui est une source d'énergie fondamentale dans notre société actuelle. En effet, on utilise l'électricité pour la plupart de nos activités, que ce soit dans le domaine domestique ou industriel [1]. Les éoliennes fiables et rentables représentent la source d'énergie idéale pour de nombreuses applications. Les éoliennes existent en plusieurs dimensions, la technologie largement dominante aujourd'hui est celle à axe horizontal, à turbine tripale, parfois bipale et à rotor face au vent. Ces éoliennes peuvent fonctionner à vitesse fixe ou variable. Les deux types de machines électriques les plus utilisées sont des machines asynchrones et synchrones sous leurs diverses variantes. L'énergie que nous utilisons quotidiennement provient majoritairement des combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon), qui présentent l'avantage d'être facilement utilisables et restés longtemps bon marché. Mais leur emploi systématique et massif fait apparaître plusieurs problèmes majeurs. Tout d'abord, dans un futur très proche, l'homme sera vraisemblablement confronté à leur épuisement. Et il est d'ores et déjà confronté aux perturbations climatiques engendrées par le rejet massif de gaz à effet de serre produits lors de leur combustion.

Afin d'accomplir au mieux cette étude, le présent mémoire est structuré en trois principaux chapitres en plus de l'introduction générale et de la conclusion générale.

Le premier chapitre : Dans ce chapitre, nous présenterons les différents types d'énergies renouvelables avec leurs avantages et leurs inconvénients. Et les éoliennes. Ainsi qu'un aperçu de la définition d'un système hybride et de la différence entre la science des systèmes hybrides et les principaux composants des systèmes hybrides.

Le deuxième chapitre : Dans ce chapitre, nous présenterons un point général sur les systèmes éoliens, l'origine de l'énergie éolienne, la représentation des éoliennes et leur capacité de production, les avantages de l'énergie éolienne. Ce chapitre nous permettra de développer un ensemble de solutions techniques disponibles pour la production d'énergie électrique par les éoliennes.

*Chapitre I : Généralités sur les
énergies renouvelables*

I.1 INTRODUCTION

Les énergies renouvelables sont propres et inépuisables. Et vu que les autres sources d'énergie sont à coût élevé, plusieurs pays ont encouragé les chercheurs d'étudier et développer des systèmes de conversion d'énergie renouvelables (énergie solaire, énergie éolienne, hydraulique, géothermiqueetc. Face à l'épuisement programmé des énergies fossiles et à leur impact négatif sur l'environnement, les énergies renouvelables s'imposent comme la solution d'avenir pour satisfaire de façon durable les besoins énergétiques mondiaux. L'énergie éolienne est une source d'énergie 100% propre (elle est développée par de très nombreux pays et connaît une croissance très importante + 30 % par an en moyenne depuis 10 ans.

I.2 Notions ET Principe sur les énergies renouvelables

On entend par énergie renouvelable, des énergies issues du soleil, du vent, de la chaleur de la terre, de l'eau ou encore de la biomasse. A la différence des énergies fossiles, les Energies renouvelables sont des énergies à ressource illimitée. Les énergies renouvelables telles que l'énergie éolienne, l'énergie solaire, l'énergie biomasse et l'énergie hydroélectrique, sont des solutions prometteuses pour concurrencer les sources d'énergies de masse telle que l'énergie fossile et nucléaire.

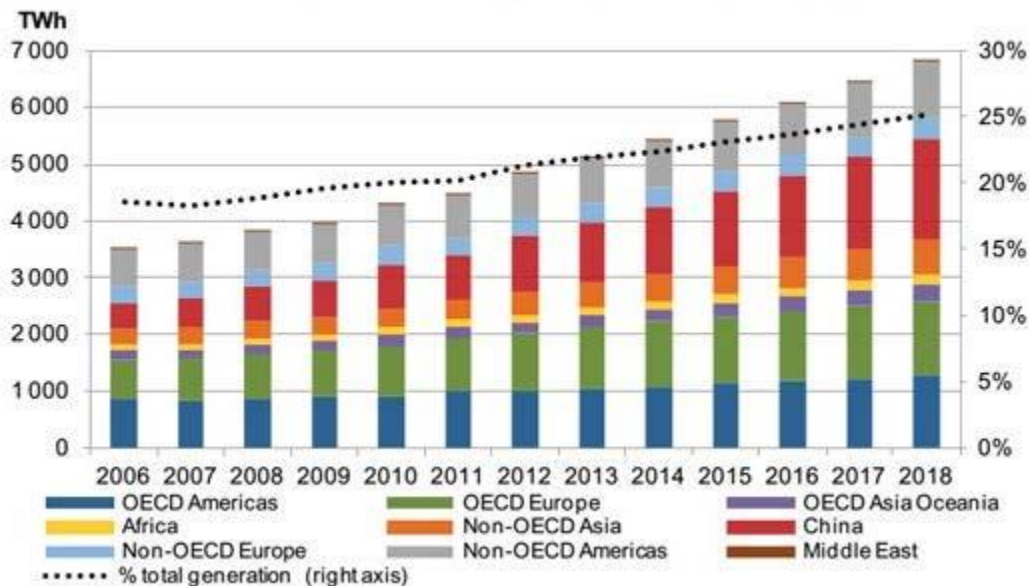


Figure I.1 Production mondiale d'électricité renouvelable par région [2]

I.3 Description de la chaîne de conversion photovoltaïque

L'effet photovoltaïque se manifeste par l'apparition d'une différence de potentiel à la jonction entre un métal et un semi-conducteur lorsque le dispositif reçoit un rayonnement lumineux de longueur d'onde adéquate. Ainsi une cellule photovoltaïque peut convertir l'énergie solaire en énergie électrique. Industriellement les matériaux les plus utilisés sont à base de silicium. Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14% pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12% pour le silicium poly cristallin et en fin 7 à 8% pour les siliciums en films minces [3].

I.3.1 l'énergie hydraulique (ou hydrau-électricité)

L'électricité d'origine hydraulique provient de la captation, avec un rendement d'environ 85 %, de la variation d'énergie potentielle de l'eau entre deux niveaux [4].

I.3.1.1 Les divers types d'aménagement hydroélectrique :

Chaque site possède des caractéristiques géographiques, géologiques, topographiques et hydrologiques qui lui sont propres, pour cela on distingue 04 grands types d'aménagements [5] :

- * Les centrales au fil de l'eau (barrages de basse chute).
- * Les centrales d'éclusée (barrages de moyenne chute).
- * Les centrales de lac (barrages de haute chute).
- * Les stations de transfert d'énergie par pompage (S.T.E.P).

I.3.1.2 Principe de fonctionnement :

L'eau accumulée dans les barrages ou dérivée dans les prises d'eau constitue une énergie potentielle utilisée pour actionner la roue de la turbine d'une génératrice. L'énergie hydraulique se transforme alors en énergie mécanique. Cette turbine accouplée mécaniquement à un alternateur l'entraîne en rotation à fin de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique.

La puissance disponible dépend de la hauteur de la chute et du débit disponible [5].

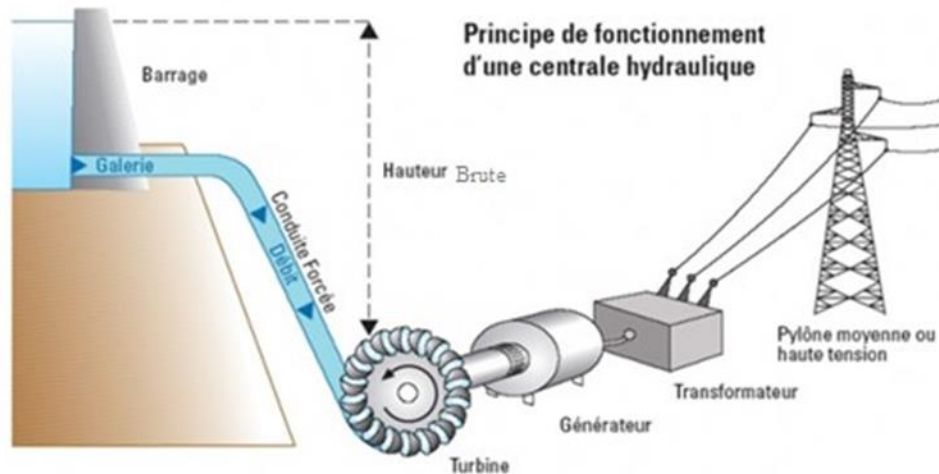


Figure I.2 Principe de fonctionnement d'une centrale hydraulique.

I.3.1.3 Les Turbines :

Les alternateurs utilisés dans les centrales hydrauliques sont entraînés par des turbines, celles-ci sont adaptées aux caractéristiques de la chute : hauteur, vitesse de l'eau et débit. Cependant pour chaque type de turbine on définit un type de centrale [5].

A. Turbine PELTON :

Ce type de turbine dite aussi turbine à action est utilisé dans les centrales de haute chute.

B. Turbine FRANCIS :

Ce type de turbine dite aussi turbine à réaction est utilisé dans les centrales de moyenne chute.

C. Turbine KAPLAN :

Ce type de turbine est utilisé dans les centrales de basse chute.

➤ **Avantages :**

- source d'énergie renouvelable
- production d'énergie locale
- contrôle des inondations
- création d'une réserve d'eau pour diverses utilisations

➤ **Inconvénients :**

- bloque les passes à poissons 000
- modifie l'habitat aquatique (ex : débit, température)
- dégrade la qualité d'eau (accumulation de contaminants).

I.3.2 Energie de la géothermie

Une énergie produite grâce à la chaleur de la terre, elle est contenue à l'intérieur de réservoir souterrains de vapeur d'eau chaude et des roches chaudes, est utilisée comme ressource générant de l'électricité, l'eau chaude ou la vapeur extraite des réservoirs géothermiques de la croûte de la terre, fait tourner les turbines électriques qui alimentent les générateurs pour produire de l'électricité.

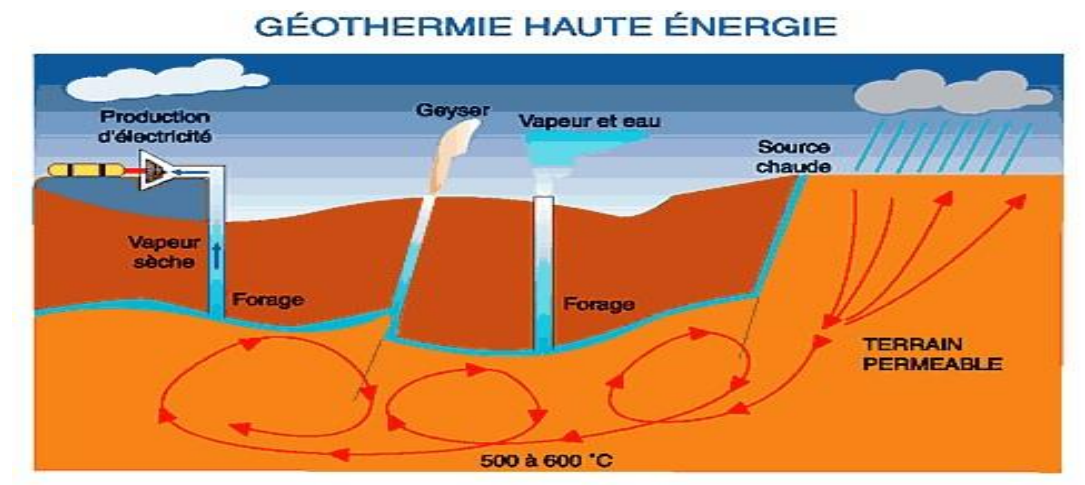


Figure 1-3 : Géothermie haute énergie

Figure I.3 Géothermie haute énergie

➤ *On distingue 04 types de géothermies selon le niveau de température disponible à l'exploitation :*

- **1.La géothermie haute énergie** : géothermie des régions privilégiées caractérisée par des températures supérieures à 150°C, grâce auxquelles la production se fait d'une manière directe.
- **La géothermie moyenne énergie** : caractérisée par des températures allant de 80 à 150°C, pour lesquelles la production se fait par cycle binaire.

- **La géothermie basse énergie** : géothermie des aquifères profonds (entre quelques centaines et plusieurs milliers de mètres) aux températures allant de 60 à 80°C.
- **La géothermie très basse énergie** : géothermie des faibles profondeurs, des nappes phréatiques aux niveaux de température allant de 20 à 60°C. Les deux derniers types ne permettent pas la production d'électricité.

1.3.2.1. Principe de fonctionnement :

Le manteau terrestre étant chaud, la croûte terrestre laisse filtrer un peu de cette chaleur. La plus grande partie de la puissance géothermique obtenue en surface (87%) est produite par la radioactivité des roches qui constituent la croûte terrestre : Radioactivité produite par la désintégration naturelle de l'uranium, du thorium et du potassium. Il existe dans la croûte terrestre, épaisse en moyenne de 30 km, un gradient de température (le gradient géothermique) plus on creuse, plus la température augmente ; en moyenne de 3 °C par 100 mètres [6].

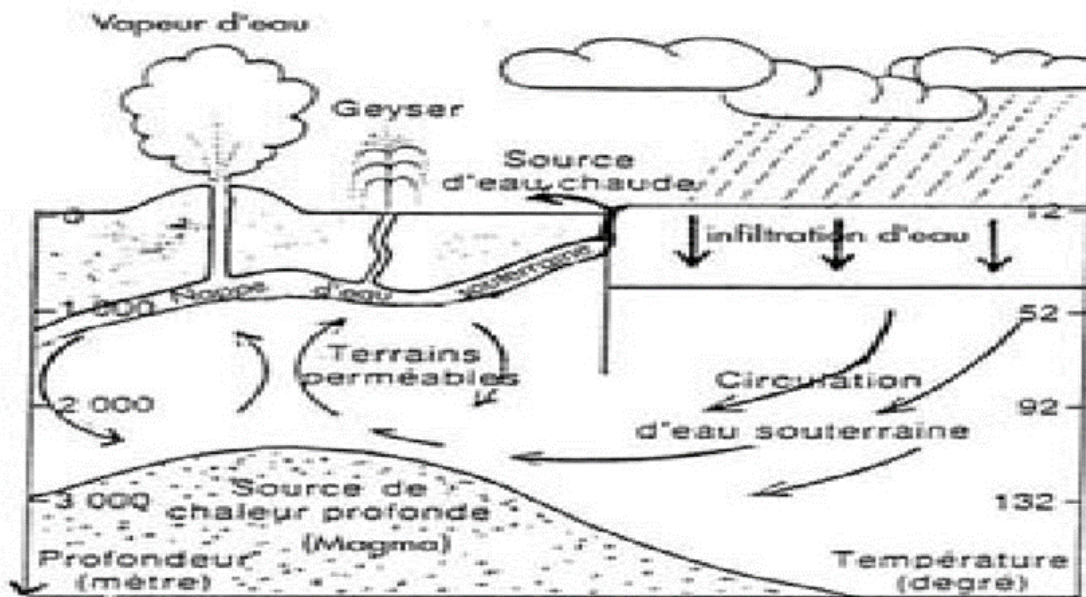


Figure I.4 : Relation entre profondeur et température de l'eau souterraine.

➤ *Les avantages*

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent), ni même de la disponibilité d'un substrat, comme c'est le cas de biomasse.

➤ *les inconvénients :*

Selon la nature du sol, les coûts de forage peuvent être très élevés. Mais la mise en place d'une installation géothermique correspond à un investissement important, le coût d'exploitation est quasiment nul.

Risques de pollution existants sont rejetés à la surface du sol l'eau extraite si celle-ci contient des métaux lourds. Ce risque est évité lorsqu'elle est réinjectée en sous-sol.

I.3.3 l'énergie Biomasse

Bio = vivant, Masse = matière, la biomasse est de la matière issue du vivant, elle est dérivée de la combustion de matières organiques (bois, résidus agricoles, déchets organiques divers...), Elle constitue la plus ancienne source d'énergie utilisée par les humains. On peut transformer la biomasse en énergie à l'aide de nombreux procédés : en la brûlant, en la gazéifiant, en la transformant grâce à la biochimie, etc.[5].

Schéma de principe d'une usine biomasse

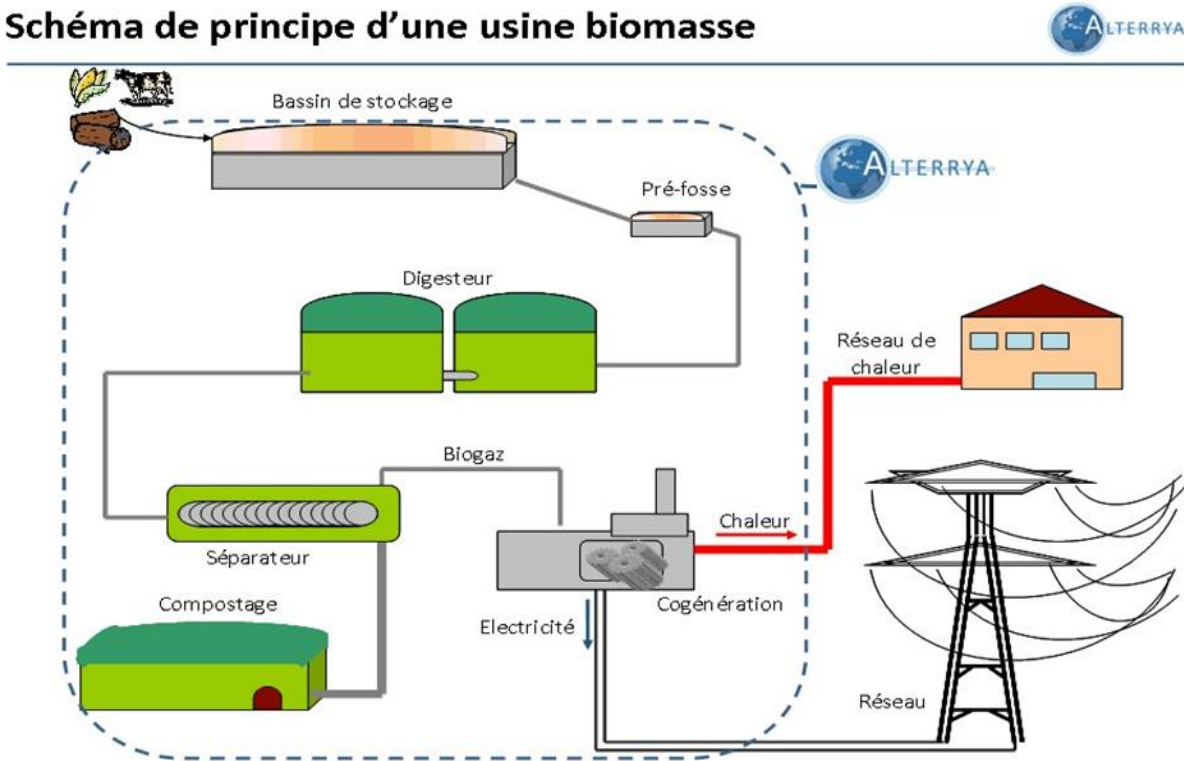


Figure I.5 schéma de principe d'une usine biomasse.

I.3.3.1 Constituants de la biomasse :

On en distingue trois principaux, auxquels correspondent des procédés de valorisation spécifiques:

• **La biomasse lignocellulosique**, ou lignine, constituée par :

- ✓ le bois et les résidus verts,
- ✓ la paille,
- ✓ la bagasse de canne à sucre
- ✓ le fourrage.

La valorisation se fait plutôt par des procédés par voie sèche, dits conversions thermochimiques.

• **La biomasse à glucide**, riche en substance glucidique facilement hydrolysable :

- ✓ les céréales
- ✓ les betteraves sucrières

- ✓ les cannes à sucre

La valorisation se fait plutôt par fermentation ou par distillation dits conversions biologiques.

•**La biomasse oléagineuse**, riche en lipides :

- ✓ Colza,
- ✓ Palmier à huile, etc.

➤ **Les Avantages :**

C'est une énergie qui émet peu de gaz à effet de serre et qui peut être stockée. Concernant particulièrement le bois-énergie, il y a une large disponibilité de la ressource et le prix du bois de chauffage ne suit pas le cours du pétrole.

➤ **Les Inconvénients :**

Elle ne peut avoir qu'un apport limité car le recours intensif à la biomasse entraînerait des impacts négatifs sur l'environnement tels que des phénomènes de déforestations (en cas d'exploitation intensive du bois-énergie), d'érosions des sols, de pollution des sols eaux (en cas de production intensive de biocarburant).

I.3.4 L'énergie solaire

L'énergie solaire est une source d'énergie qui dépend du soleil. Bien sûr, le soleil nous chauffe et nous éclaire. Alors cette énergie permet de fabriquer de l'électricité à partir de panneaux photovoltaïques ou des centrales solaires thermiques, grâce à la lumière du soleil captée par des panneaux solaires.

Alors on distingue deux types de l'énergie solaire : l'énergie à effet thermique, et à l'effet photovoltaïque.

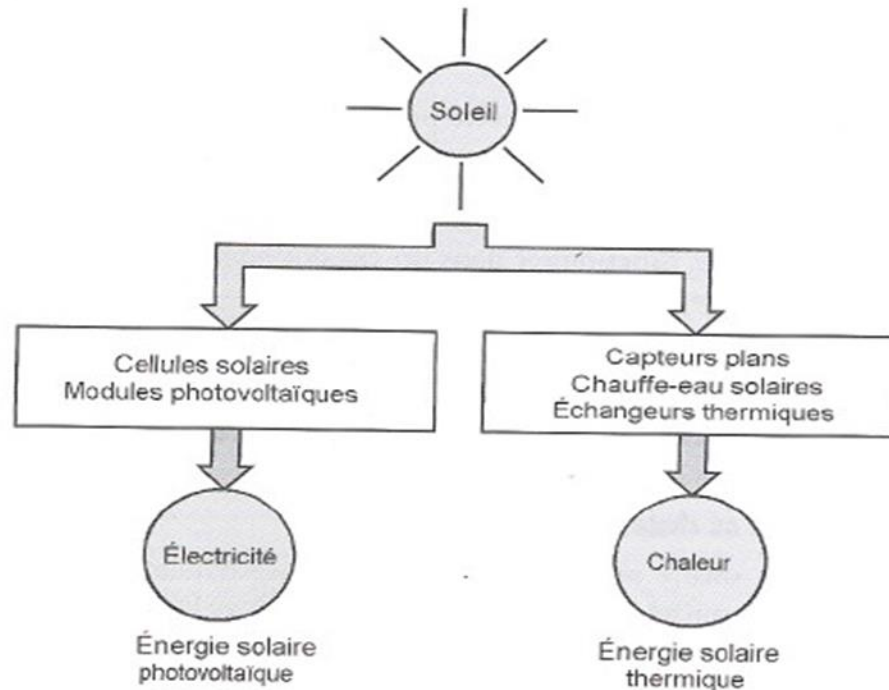


Figure I.6 L'énergie solaire

1.3.4.1 L'énergie solaire thermique :

Le principe consiste à capter le rayonnement solaire et à le stocker dans le cas des systèmes passifs (véranda, serre, façade vitrée) , s'il s'agit de système actif, à redistribuer cette énergie par le biais d'un fluide caloporteur qui peut être de l'eau, un liquide antigel ou même de l'air.

Les formes d'utilisation finale de cette énergie sont :

- **A basse température (30à100°C) Eau chaude sanitaire, chauffage des locaux, machines.
- ** A moyenne température (100à 500°C) Séchage, cuisson, stérilisation, distillation,.....
- ** A haute température (500 à 1800°C) Verreries, cimenteries, métallurgie, traitements chimiques,

Pour atteindre des températures élevées, on utilise des héliostats (miroirs orientables) dans fours solaires (comme à odeillo en France).

Plus la température à obtenir est élevée, plus le procédé et la technologie de transformation sont complexes et le prix élevé.

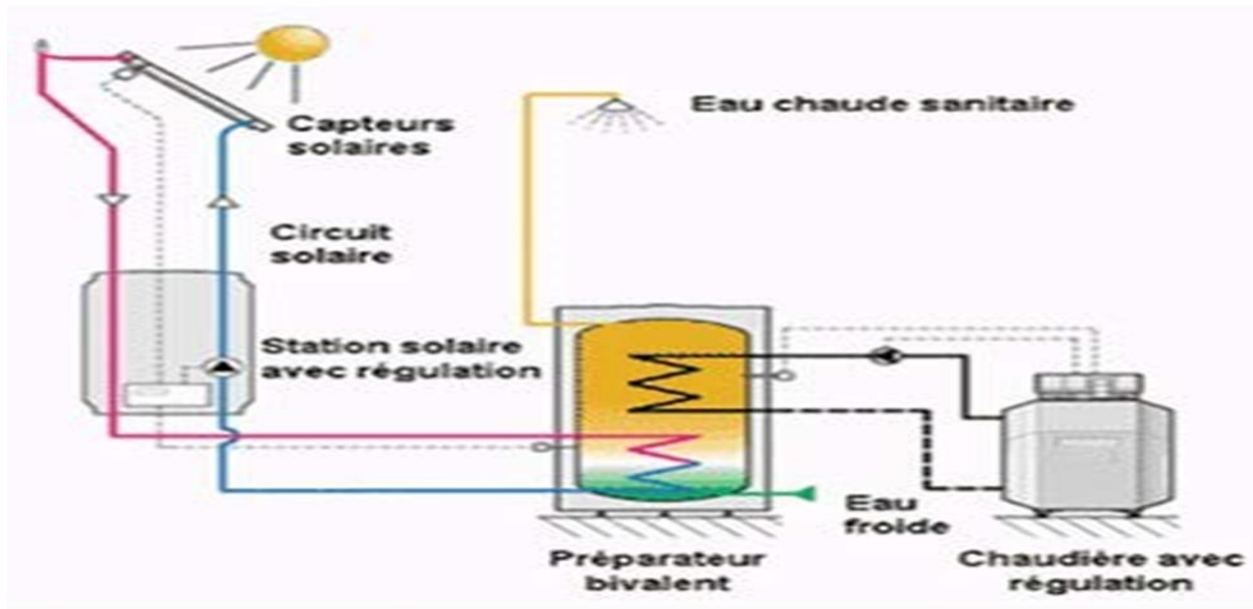


Figure I.7 principe de fonctionnement de l'énergie solaire thermique.

1.3.4.2 L'énergie solaire à effet photovoltaïque :

- Principe :

Le principe de la conversion directe de l'énergie solaire en énergie électrique est issu de la découverte par Becquerel en 1839 de l'effet photovoltaïque. Le mot photovoltaïque vient du mot « photo » (du Grec « phos » qui signifie lumière) et du mot « volt » (patronyme du physicien Alessandro Volta qui a contribué de manière très importante à la recherche en électricité).

Il s'agit de transformer l'énergie contenue dans la lumière du soleil en énergie électrique en utilisant un effet physique de certains matériaux : l'effet photovoltaïque.

Les premières cellules solaires à base de silicium ont vu le jour au milieu des années 1950 et utilisent cet effet photovoltaïque. Lorsque ces cellules solaires illuminées sont raccordées à un circuit extérieur, un courant est alors débité dans ce circuit et l'énergie lumineuse est convertie en électricité.

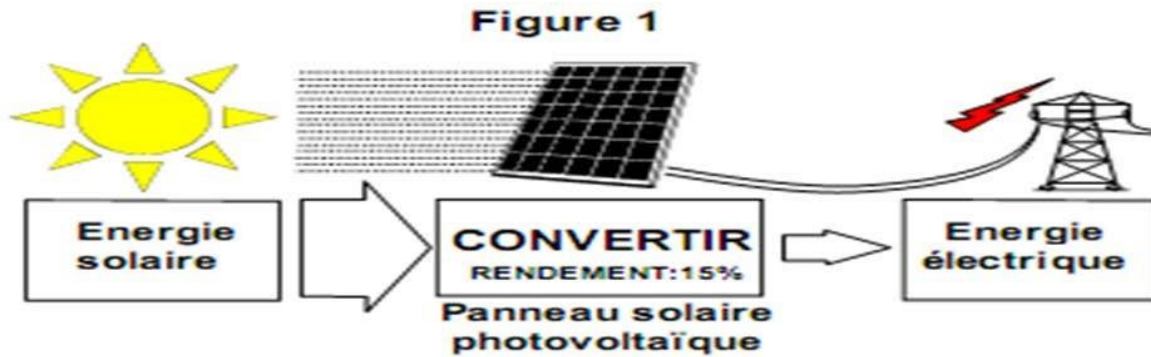


Figure I.8 principe de fonctionnement de l'énergie solaire à effet photovoltaïque

➤ *Les avantages :*

Les installations bien conçues sont fiables, même dans des conditions climatiques très rudes.

La durée de vie des modules photovoltaïques dépasse 20 ans, celle des batteries atteint 8 à 10 ans.

Les systèmes peuvent être conçus pour des puissances très variables (de 20 Wc pour un système de signalisation routière jusqu'à 1 MWh pour une centrale connectée au réseau).

Le montage est aisé et rapide. Les panneaux sont relativement légers (10 à 15 kg).

Le coût de fonctionnement est faible. La maintenance est limitée à une ou deux visites annuelles effectuées par un professionnel.

➤ *Les inconvénients :*

Les seules contraintes sont l'orientation, l'inclinaison et leur disposition par rapport aux masques éventuels.

Les panneaux doivent être orientés en direction de l'équateur. Leur inclinaison par rapport à l'horizontale doit être adaptée à la saison d'utilisation la plus défavorable pour les systèmes autonomes (elle a moins d'importance sur les systèmes connectés au réseau, c'est pourquoi on peut trouver des capteurs en façade ou en toiture à faible pente).

Les investissements sont élevés et le recours à cette technologie impose une analyse très fine des besoins et l'utilisation impérative d'appareils énergétiquement performants.

I.3.5 l'énergie éolienne

I.3.5.1 Historique et développement de l'énergie éolienne :

Depuis l'antiquité, l'énergie du vent fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. L'arrivée de l'électricité donne l'idée à Poul La Cour en 1891 d'associer à une turbine éolienne une génératrice. Ainsi, l'énergie en provenance du vent a pût être « redécouverte » et de nouveau utilisée [7].

I.3.5.2 Production mondiale d'énergie éolienne :

L'utilisation moderne de l'énergie éolienne est aujourd'hui pratiquement réservée à la production d'électricité. La découverte capitale de la puissance éolienne se fit avec la crise du pétrole en 1973, quand la montée en flèche des prix du pétrole passait de 12 à 35 US\$.

Soudainement, les pays de l'OCDE voulurent devenir plus indépendants des importations de pétrole et se tournèrent vers le développement de l'énergie éolienne, et ce pratiquement exclusivement pour la production d'électricité. Vingt ans plus tard, la technologie en matière d'éoliennes a mûri et les éoliennes sont passées de 10 kW à plus de 3 000 kW [8].

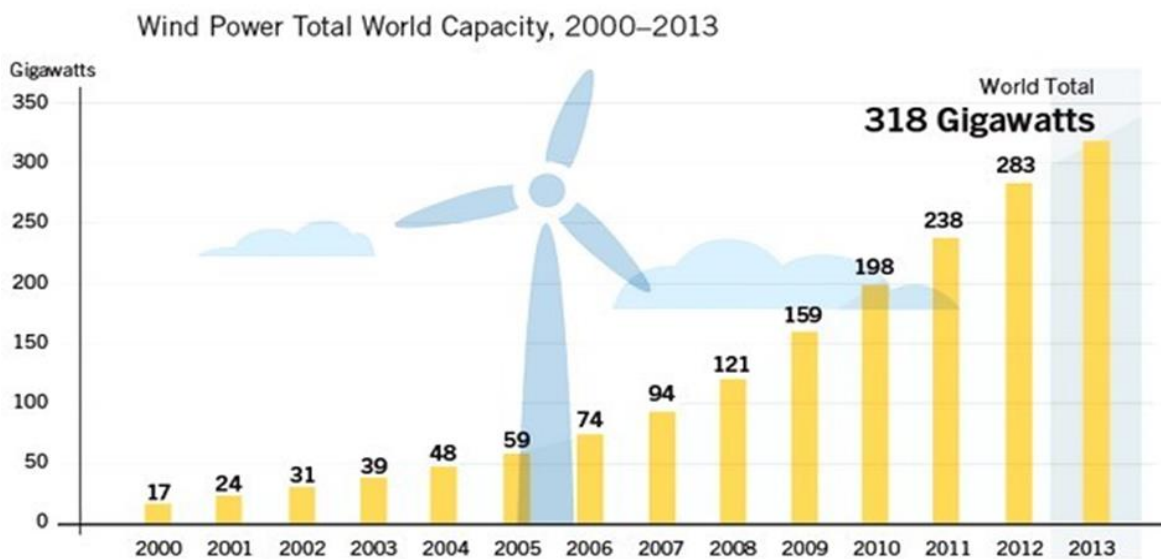


Figure I.9 l'évolution des capacités éoliennes dans le monde 2000-2013 [8]

➤ **Avantages :**

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement [9].

Bien que ne pouvoir 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 CO2 [10].

L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs [11].

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 [11].

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 [12].

C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [11].

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 [11].

I.4 Définition et missions des systèmes hybrides

Un système hybride de production d'énergie dans sa vue la plus générale est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles interconnectées entre elles pour fournir l'alimentation électrique (Figure II.2). Il existe plusieurs combinaisons de systèmes hybrides, à savoir : éolien-diesel, photovoltaïque diesel, éolien-photovoltaïque-diesel, ...etc. Ces mêmes sources d'énergie peuvent être combinées avec d'autres sources de stockage d'énergie, tel que des batteries électrochimiques, le stockage utilisant l'hydrogène, des volants d'inertie et des super-condensateurs [13].

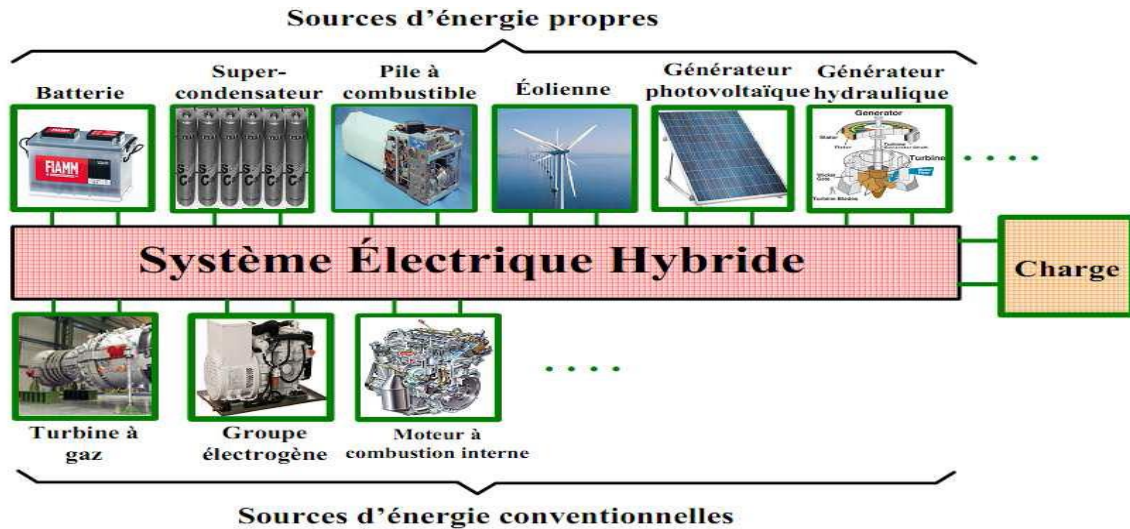


Figure I.10 Différentes sources utilisables dans un système électrique hybride. [14]

La combinaison de l'énergie renouvelable avec des éléments de stockage et des groupes électrogènes permet d'optimiser les systèmes de production d'électricité aussi bien du point de vue technique qu'économique, de manière à profiter pleinement de l'énergie éolienne et réduire au minimum la consommation du carburant . Les groupes électrogènes et les éléments de stockage d'énergie ont pour rôle la compensation des fluctuations de puissance produite par l'éolienne à court et à long terme. Le champ d'application des SEH est très large et par conséquent il est difficile de classer ces systèmes. On peut néanmoins essayer de réaliser un classement par gamme de puissance suivant le tableau Tableau I.1

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

Tableau I.1 Classification des SEH par gamme de puissance

Les grandes installations de SEH en site isolé peuvent être classifiées en fonction du degré de pénétration de l'énergie renouvelable [15] défini par la proportion de la puissance de l'énergie produite par les sources d'énergie renouvelable et la puissance demandée par la charge. Le Taux de pénétration en puissance (TPP) est défini comme le rapport entre la puissance éolienne installée et la puissance maximum de la charge [16]. Tandis que le taux de pénétration en énergie (TPE) est défini comme le rapport entre l'énergie éolienne annuelle produite et l'énergie consommée par la charge. Le SHED est dite à haute pénétration si le $TPP > 1$.

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

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

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

Où

TPP :Taux de Pénétration en Puissance.

TPE : Taux de Pénétration en Énergie.

TPPI :Taux de Pénétration en Puissance Instantanée.

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

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

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

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

I.4.1 Différents types topologies de systèmes hybrides

Nous présentons ici une rapide synthèse des études de quelques topologies possibles pour un système hybride, qui ont été réalisées et qui nous ont conduits à l'étude de ces systèmes. Quelques exemples, habituellement utilisés à l'échelle industrielle, d'architectures de chaînes de conversion d'énergie sont donnés en association avec différents types de génératrices. Dans les limites de nos travaux, nous nous sommes intéressés à des systèmes hybrides éolien-diesel pour alimenter un site isolé.

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

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

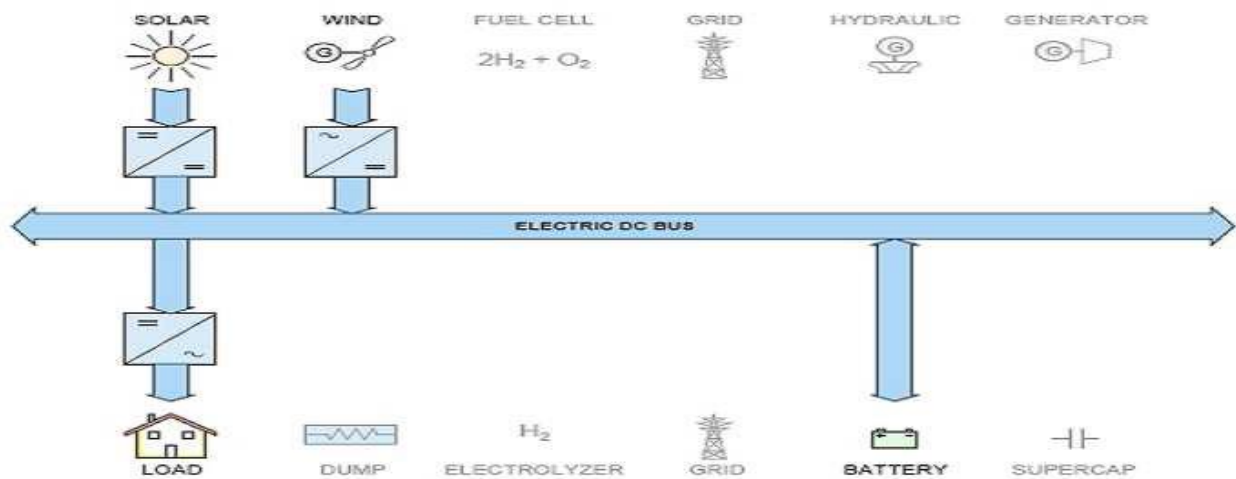


Figure I.11 Solaire-éolien, stockage à batteries, installation isolée [17].

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

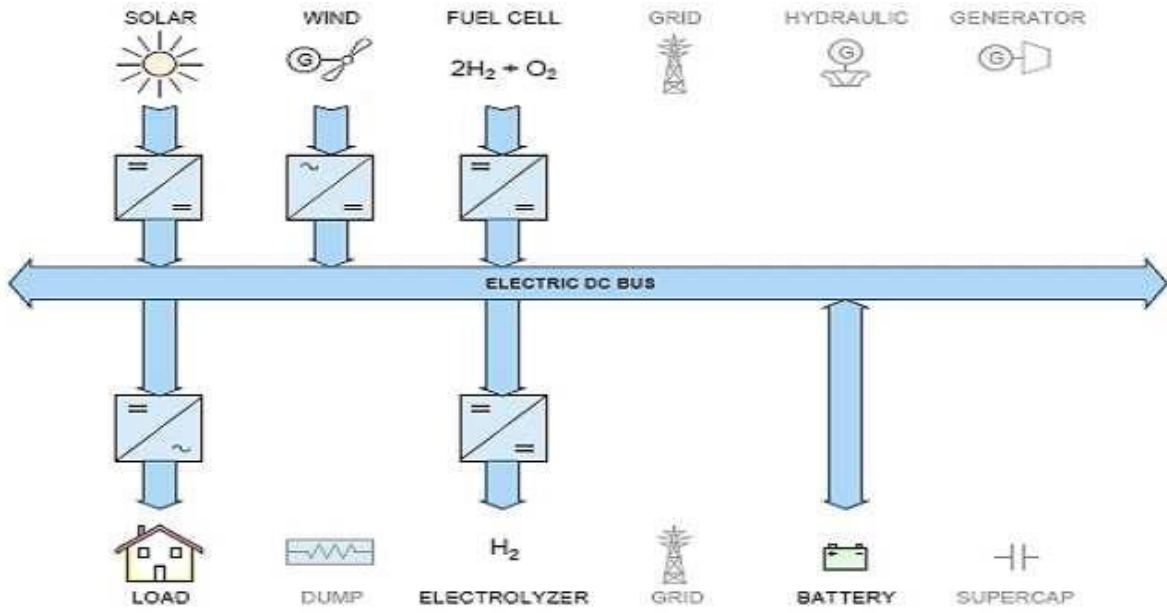


Figure I.12 Solaire-éolien, batteries de stockage et hydrogène, installation isolée [18].

❖ Solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée

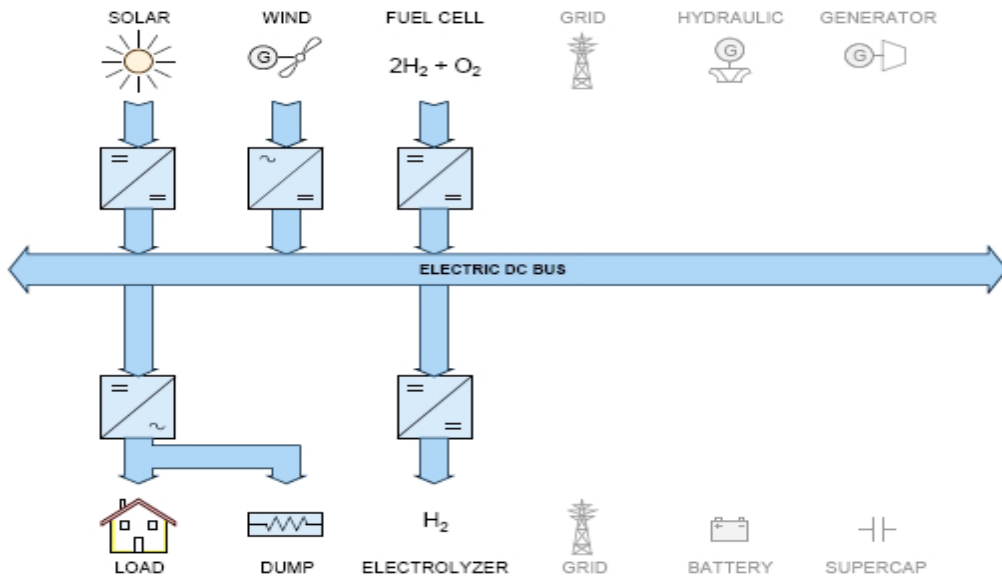


Figure I.13 Solaire-éolien, stockage à hydrogène, installation isolée [19]

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

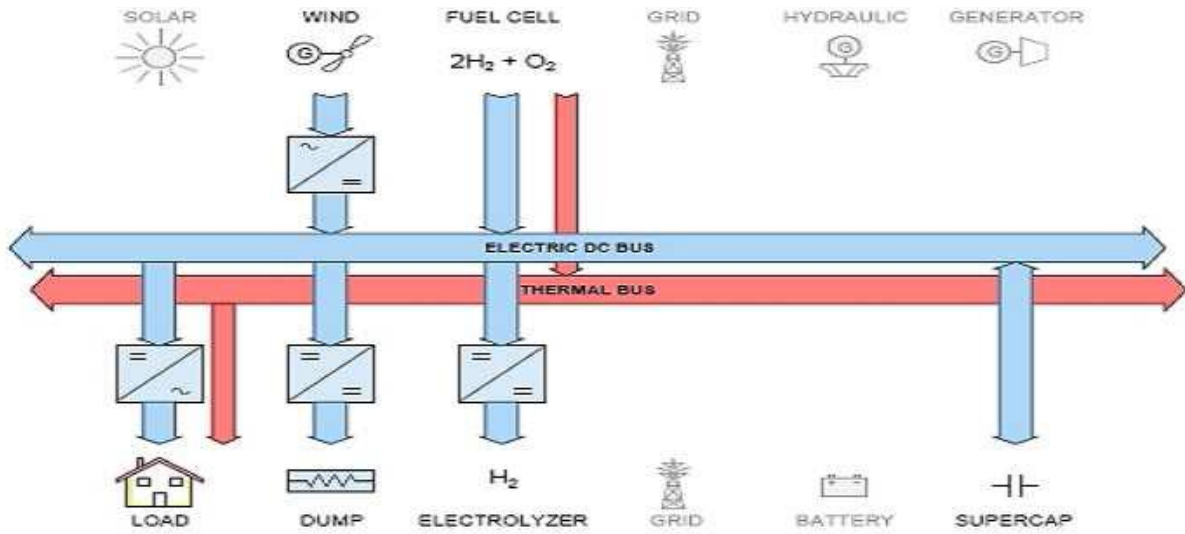


Figure I.14 Eolien, stockage à hydrogène et par super condensateurs, installation isolée [20].

❖ Eolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée

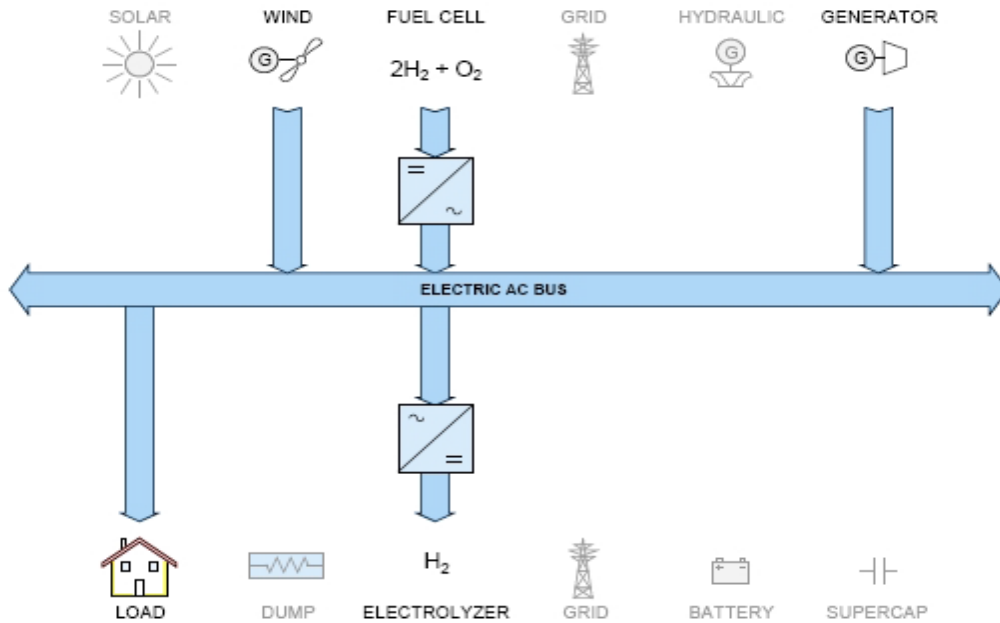


Figure I.15 Éolien-diesel, stockage à hydrogène, installation isolée [21]

Les configurations ci-jointes présentent des systèmes caractérisés par [22]:

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

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

I.4.2 Principaux Composants des systèmes hybrides

Les systèmes d'énergie hybride sont en général constitués de sources d'énergie classique (groupe électrogène), de sources d'énergie renouvelable (éolienne, solaire). Ils peuvent aussi inclure d'autres sources d'énergie comme l'énergie hydroélectrique, marémotrice, géothermique etc.), des convertisseurs statiques et dynamiques, des systèmes de stockage (batterie, volant d'inertie, le stockage hydrogène...), des charges principales et de délestages et un système de surveillance.

I.4.2.1 Générateurs photovoltaïques :

Une cellule élémentaire composée de matériaux semi-conducteurs est capable de convertir l'énergie de photons reçus à sa surface en une différence de potentiel, créée par une délocalisation d'électrons dans le matériau. La circulation des électrons dans le circuit extérieur permet à la cellule PV de fonctionner comme un générateur. Les cellules PV sont combinées ensemble pour former un module PV qui peut produire une certaine quantité d'énergie sous des conditions d'éclairement et de température variables. Par la suite les modules PV peuvent être regroupés à leur tour afin de former un générateur PV. Il est dimensionné selon la puissance nécessaire pour une installation donnée [23].

La plupart des cellules PV mesurent autour de 100 cm² et ne produisent qu'une très faible puissance électrique, typiquement de 1 à 3 W avec une tension de moins d'un volt [24], [25] et [26].

Le rendement énergétique d'un module dépend de la nature des matériaux utilisés. Les valeurs communément rencontrées sont de l'ordre (13 à 16 % pour les cellules composées de silicium monocristallin, 11 à 13 % avec du silicium polycristallin et 7 à 8 % avec du silicium amorphe).

Les modules PV sont protégés par des diodes by-pass (diode by-pass, diode anti-retour) afin d'éviter le fonctionnement inverse des cellules occultées, pouvant entraîner une surchauffe voire une destruction de celles-ci

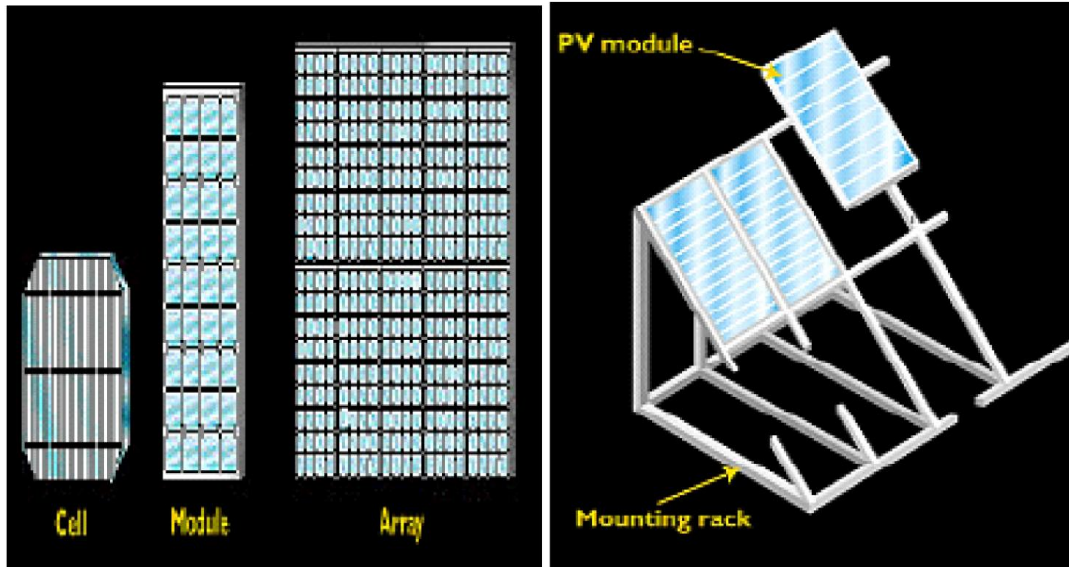


Figure I.16 Modules photovoltaïques sur support (Source: Web EREN, US Department of Energy)

Caractéristiques d'un module

Voici la description des paramètres d'un module [27] :

- **La puissance crête P_c** : la puissance maximale produite par un module photovoltaïque dans les conditions standards : ensoleillement de 1000 W/m^2 à l'horizontale, température ambiante de 25°C , masse d'air optique (AM) égale à 1,5.
- **La caractéristique $I(V)$** : Courbe représentant le courant I débité par le module en fonction de la tension aux bornes de celui-ci.
- **Tension à vide V_{co}** : Tension aux bornes du module en l'absence de tout courant, pour un éclairage " plein soleil ".
- **Courant de court-circuit I_{cc}** : Courant débité par un module en court circuit pour un éclairage " plein soleil ".
- **Point de fonctionnement optimum (U_m, I_m)** : Lorsque la puissance de crête est maximum en plein soleil, $P_m = U_m \cdot I_m$

- **Rendement maximal** : Rapport de la puissance électrique optimale à la puissance de radiation incidente.
- **Facteur de forme** : Rapport entre la puissance optimale P_m et la puissance maximale que peut avoir la cellule : $V_{co} \cdot I_{cc}$.

1.4.2.2 Eoliennes :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») est une machine qui utilise l'énergie éolienne pour produire de l'énergie électrique. La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne. Le petit éolien, désigne les éoliennes de petites et moyennes puissances, de 100 watts à 20 kilowatts, montées sur des mâts de 10 à 35 mètres, raccordées au réseau ou bien autonomes en site isolé. Le petit éolien est utilisé pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques (pompes, éclairage, ...) de manière économique et durable, principalement en milieu rural. Par exemple, une petite éolienne accompagnée d'un module solaire photovoltaïque et d'un parc de batteries peut garantir l'autonomie énergétique d'un voilier (éclairage, instruments de bord...). L'élément essentiel pour qu'une petite éolienne soit économiquement rentable est le vent, qui doit être à la fois puissant et fréquent. Les petites éoliennes classiques sont généralement à axe horizontal. Elles comprennent le plus souvent deux à trois pales [28]. Les petites éoliennes peuvent avoir un système mécanique de modification de l'angle de calage des pales ou d'orientation face au vent, alors que les grandes éoliennes utilisent des systèmes de commande électroniques. Les différents types de protections utilisées par les petits systèmes éoliens sont :

- Basculement (relèvement) de l'axe, normalement horizontal [29];
- Pas variable par pression du vent. Les pales en fibre se déforment et provoquent un décrochage.
- Déviation par rapport à l'axe du vent. Le rotor se trouve légèrement décalé par rapport à l'axe de rotation et crée une force de déviation qui régule la puissance aérodynamique.

La configuration électrique d'un aérogénérateur a une grande influence sur son fonctionnement. Cette configuration basée sur la caractéristique de la vitesse. Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les deux types de machine électrique les plus utilisés dans l'industrie éolienne sont les machines synchrones et les machines asynchrones. Celle utilisée dans cette étude est la génératrice synchrone.



Figure I.17 La ferme éolienne d'Adrar

1.4.2.2-a Piles à combustibles :

Parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée, la pile à combustible est considérée comme une solution très prometteuse [30]. Ce convertisseur d'énergie, à la fois propre et efficace, permet de convertir l'énergie chimique de l'hydrogène, vecteur énergétique fortement pressenti pour le futur par de grands spécialistes mondiaux au vu de son énergie massique 3 fois plus importante que l'essence, en une énergie électrique, utilisable directement, et une énergie thermique qu'il est possible de valoriser. L'utilisation de cette cogénération permet d'atteindre des rendements très intéressants, jusqu'à 80% dans certains cas. Les piles à combustibles (PAC), générateurs statiques d'électricité et de chaleur. Deux technologies sont actuellement prometteuses et connaissent d'intenses efforts de R&D. D'une part les PAC à membrane polymère PEMFC (Proton Exchange Membrane Fuel Cell) fonctionnant à des températures basses comprises entre 50 et 90 °C qui sont les plus développées. Le rendement en électricité, supérieur à 80% en théorie, est supérieur à 50% en pratique. D'autre part les PAC à oxydes solides SOFC (Solid Oxyde Fuel Cell) fonctionnant à des températures supérieures à 600 °C ce qui implique un moins haut rendement mais permet de valoriser la chaleur produite en cogénération.

I.4.2.3 Générateur diesel :

Dans le cas des installations à sources d'énergie renouvelables autonomes, il est nécessaire de recourir au stockage ou d'ajouter un ou plusieurs groupes électrogènes diesels. Dans un SEH, le générateur classique est généralement le moteur diesel directement couplé au générateur synchrone (figure I-11). La fréquence du courant alternatif à la sortie est maintenue par un gouverneur de vitesse (régulateur de vitesse) sur le moteur diesel [31]. Le gouverneur fonctionne en ajustant le flux de carburant au diesel, pour garder la vitesse du moteur et la vitesse du générateur constante. La fréquence du réseau est directement liée à la vitesse de rotation du générateur et elle est donc maintenue au niveau désiré.

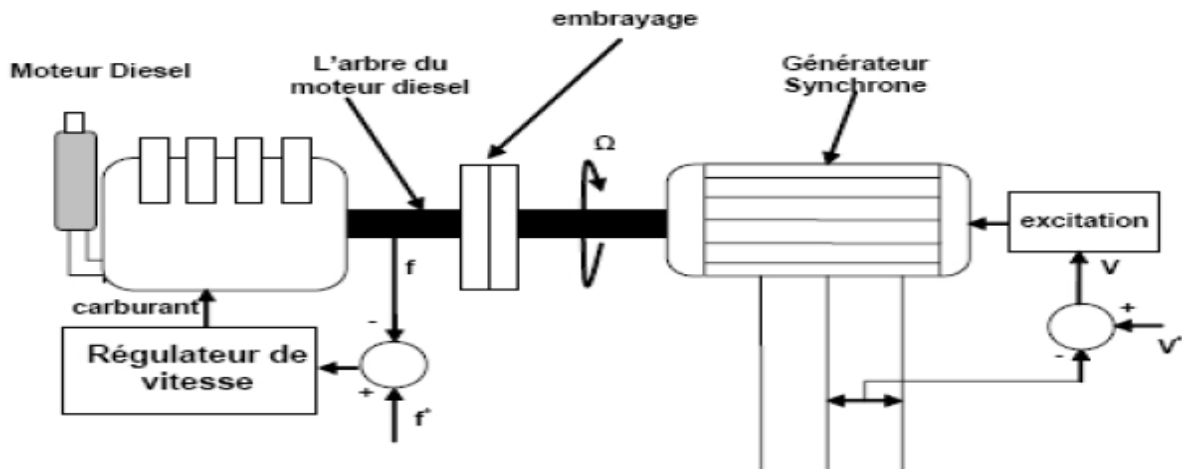


Figure I.18 Configuration du générateur diesel [32]

Les réseaux de courant alternatif avec diesel, tout comme ceux interconnectés fournissent pour leurs charges, deux formes d'énergie : active et réactive. Quand plusieurs générateurs diesels fournissent de l'énergie au réseau, ceux-ci sont connectés généralement à un bus à CA. Dans ce cas, un système de commande doit être utilisé pour une distribution correcte de la puissance fournie par les générateurs diesels.

I.4.2.4 Systèmes de stockage :

Le stockage d'énergie est un facteur clef dans un système d'énergie hybride en site isolé. Dans la plupart des cas, les batteries représentent encore la technologie la plus rentable. Elles sont d'habitude du type plomb – acide. Les batteries nickel – cadmium sont rarement utilisées. La technologie des batteries plomb-acide bénéficie en effet d'avantages, tels son faible coût (par

rapport à d'autres technologies) et une maturité étayée par un retour d'expérience conséquent. Cette technologie est par ailleurs largement disponible dans le commerce. Le stockage d'énergie est souvent utilisé dans les petits systèmes hybrides à fin de pouvoir alimenter la charge pour une durée relativement longue (des heures ou même des jours). Il est parfois aussi utilisé avec les SEH connectés à des grands réseaux de courant alternatif isolés. Dans ce cas, il est utilisé pour éliminer les fluctuations de puissance à court terme [33]. L'emploi des batteries plomb-acide est sujet à des contraintes qu'il est nécessaire de respecter pour garantir son bon fonctionnement et sa longévité. Elles ne peuvent rester longtemps inutilisées sans conséquences néfastes sur leur durée de vie. Les cycles répétés de charge/décharge aléatoires doivent être évités. Leur état de charge ne doit pas atteindre de valeurs extrêmes pour éviter toute dégradation prématurée.

1.4.2.5 Système de supervision :

La plupart des systèmes hybrides comportent une certaine forme de commande. Parfois, la commande est intégrée individuellement dans chaque composant du système. Un autre type de commande plus global permet la surveillance de certains ou de tous les composants. Les fonctions spécifiques peuvent inclure la commande de démarrage et d'arrêt des générateurs diesels, l'ajustement de leurs points de fonctionnement, le chargement des batteries et la répartition de la puissance pour les différents types de charges.

1.4.2.6 Convertisseurs :

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

- Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans le SEH, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement ils sont généralement monophasés ou triphasés.
- Les onduleurs convertissent le CC en CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge.

- Les hacheurs, le troisième type de convertisseurs, permettent de réaliser la conversion CC/CC pour adapter la tension entre deux sources.

I.4.2.7 Charges :

Les charges électriques rendent utile la puissance électrique. Il existe des charges à caractère résistif et inductif. Les charges résistives incluent les ampoules à incandescence, les chauffe-eau etc. Les appareils utilisant des machines électriques sont des charges résistives et inductives. Elles sont les principaux consommateurs de puissance réactive. Les charges à CC peuvent avoir aussi des composants inductifs, mais les seuls effets introduits par ceux-ci sont les variations transitoires de tension et courant pendant les changements dans le fonctionnement du système.

I.5 Systèmes autonomes et non autonomes de production d'énergie

On peut distinguer deux familles de système de génération d'énergie (le système non autonome qui ont besoin d'être raccordés à un réseau pour être opérationnels), ou autonomes (qui n'ont pas besoin d'être raccordés à un réseau pour être opérationnels).

I.5.1 Système non autonome :

L'interface entre le système de production éolien et le réseau peut être constituée par le générateur électrique (de type asynchrone ou synchrone) directement raccordé au réseau, ou par un convertisseur électronique de puissance (onduleur).

Dans ce dernier cas, les générateurs électriques débitent sur un redresseur à diodes ou un convertisseur commandé, l'onduleur convertit ensuite ce courant continu en courant alternatif de fréquence synchrone à la fréquence du réseau. Dans cette configuration la liaison ca/cc/ca découple la fréquence de la génératrice de celle du réseau et permet d'opérer l'éolienne à vitesse variable, ce qui permet d'accroître le rendement du système éolien.

La chaîne de conversion éolienne devient une source de puissance, puisque la tension est imposée par le réseau.

Une installation raccordée au réseau doit toutefois répondre à certaines conditions techniques générales, de compatibilité et de sécurité [34]. La norme IEEE 1547, révisée en annexe A, encadre tous les aspects liés à l'interconnexion entre les sources et le réseau.

I.5.2 Système autonome :

Pour les réseaux de petites puissances en site isolé, le groupe électrogène est l'unique source d'énergie utilisée. Une solution couramment employée consiste à associer les groupes électrogènes, souvent diesel à des sources d'énergie supplémentaire, aérogénérateur par exemple. Pour éviter les démarrages trop fréquents du groupe électrogène, ou pour assurer les transitions, des batteries électrochimiques, voire des accumulateurs inertiels, peuvent également être associées via un convertisseur électronique. Les éléments constituant le système sont de plus en plus reliés entre eux par l'intermédiaire d'un bus continu, en particulier dans le cas des systèmes à vitesse variable. Le système à bus continu peut être utilisé directement ou par l'intermédiaire d'un convertisseur cc-cc pour le chargement des batteries, mais ne convient pas aux charge qui nécessitent du courant alternatif. Dans ce cas, on a besoin d'un onduleur pour convertir le courant continu en courant alternatif les onduleurs deviennent plus courants dans l'installation sans branchement direct de la génératrice de l'éolienne au réseau. Ils permettent de concevoir de nouvelles stratégies de commande et de supervision et peuvent fournir une tension alternative compatible avec les normes de connexion au réseau (amplitude, fréquence et contenu harmonique) [34].

I.6 Problèmes rencontrés dans le fonctionnement dans un réseau autonome

Du point de vue de la continuité de la production et de la qualité de l'énergie, les facteurs pouvant affectés le fonctionnement d'un système autonome sont [35]:

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

I.7 Qualité de l'énergie électrique dans les réseaux autonomes

Le terme «qualité de l'énergie électrique» fait référence à la stabilité de la tension, à la stabilité de la fréquence du réseau et à l'absence de différents phénomènes électriques comme par

exemple le Flicker ou des distorsions harmoniques apparaissent [36]. La Figure II.1, montre une classification de ces perturbations en fonction de leurs caractéristiques.

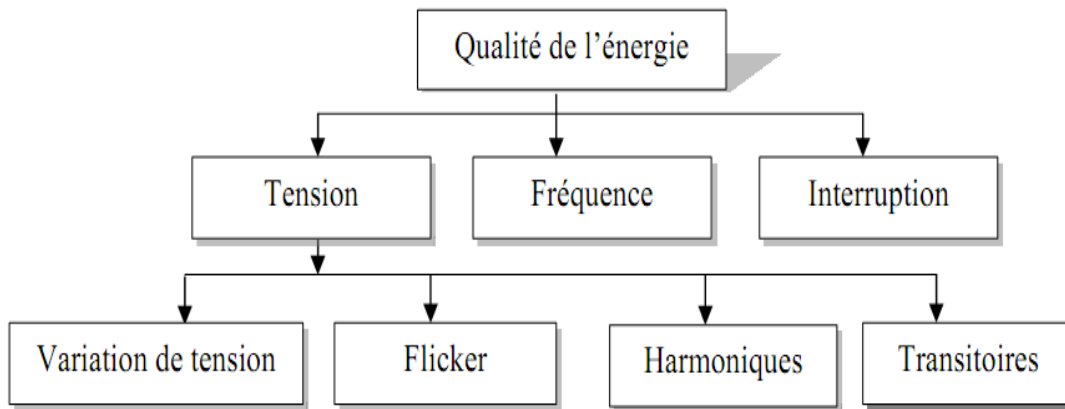


Figure I.19 Classification des perturbations du point de vue qualité d'énergie.

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

I.8 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents types d'énergies renouvelables et les différentes éoliennes qui sont le principe de leur fonctionnement en général ainsi que les différentes structures. Et aussi un aperçu de la définition du système hybride et de la différence Topologie des systèmes hybrides. Ainsi, nous avons fourni différents types de générateurs Il est utilisé dans les éoliennes et les principales applications des éoliennes

Chapitre II : l'énergie éolienne et le vent

II.1 INTRODUCTION

Le vent est une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre. Il doit ses caractéristiques à sa nature même : le vent naît des processus cycliques (rotation terrestre, convection chaud/froid, etc.) appliqués à l'atmosphère puis à l'air dans un contexte topographique défini. Depuis l'avènement des moulins à vent jusqu'aux premiers aérogénérateurs, la technologie des aéromoteurs (ou capteurs éoliens) a connu une évolution fulgurante surtout ces dernières décennies notamment dans le domaine de la production d'énergie électrique. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent. Et leurs structures sont de plus en plus performantes. Nous nous intéressons à l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Différentes techniques de commande sont décrites dans le but de contrôler la puissance aérodynamique de la turbine, et limiter cette puissance lorsque la vitesse du vent devient trop élevée. Des modèles analytiques de la turbine éolienne seront réalisés et comparés en utilisant différentes méthodes d'optimisation de puissance.

II.2 Origine du vent

Du fait que la terre est ronde, le rayonnement solaire absorbé diffère aux pôles et à l'équateur. En effet, l'énergie absorbée à l'équateur est supérieure à celle absorbée aux pôles. Cette variation entraîne une différence de température en deux points qui induit des différences de densité de masse d'air provoquant leur déplacement d'une altitude à une autre[37]. Ces déplacements sont influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement vers l'est dans l'hémisphère nord et vers l'ouest dans l'hémisphère sud. On pourrait aisément prévoir la direction des vents dominants si elles n'étaient pas perturbées par les orages, les obstacles naturels ou les dépressions cycloniques.

II.2.1 Eléments de physique atmosphérique :

Structure atmosphérique

L'atmosphère standard se compose de deux parties essentielles, (voir **Figure II.1**), à savoir :

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

-La stratosphère qui représente les 20% au-dessus de la tropopause et dont la limite supérieure est l'ionosphère.

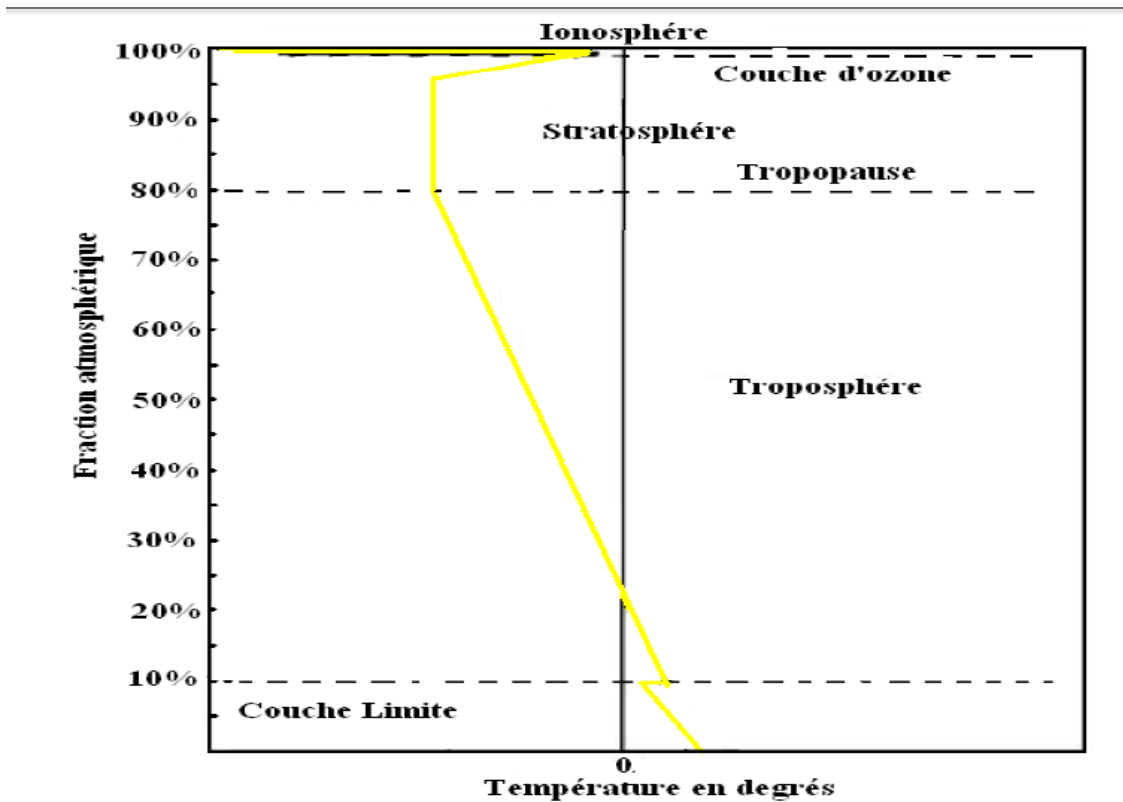


Figure II.1 Vue schématique de la couche atmosphérique standard.

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

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

➤ **Force gravitationnelle**

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

➤ **Force de pression**

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

➤ **Force de Coriolis**

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



Figure II.2 Force de Coriolis.

➤ **Forces de frottement**

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

II.3 Les causes principales des vents

II.3.1 La circulation atmosphérique générale et les systèmes de pression semi- permanents

L'atmosphère consiste en une mince couche de gaz qui entoure la terre et qui se trouve réchauffée par le rayonnement solaire. Ce dernier n'étant pas uniforme à la surface de la terre, l'échauffement est donc différent selon les régions. L'air chauffé se dilate et l'air refroidi se contracte ; ce processus crée tout autour du globe des zones de pression relatives hautes ou basses. Par exemple, près de l'équateur l'air chauffé se dilate et s'élève et une fois en altitude s'éloigne de l'équateur en direction du nord et du sud. La diminution de pression à cet endroit se traduit par la présence d'une zone de basse pression atmosphérique. L'air froid près des pôles se contracte, s'accumule à la surface du sol, créant une pression atmosphérique plus élevée. Le vent est fondamentalement de l'air en mouvement, crée par ces différences de pression. Nous avons à l'échelle terrestre un schéma relativement régulier de systèmes de pression à grande échelle qui produisent des vents importants ; appelés les vents dominants. Ce schéma de base, connu sous le nom de circulation générale, est illustré sous une forme simplifiée par la (figure II.3).

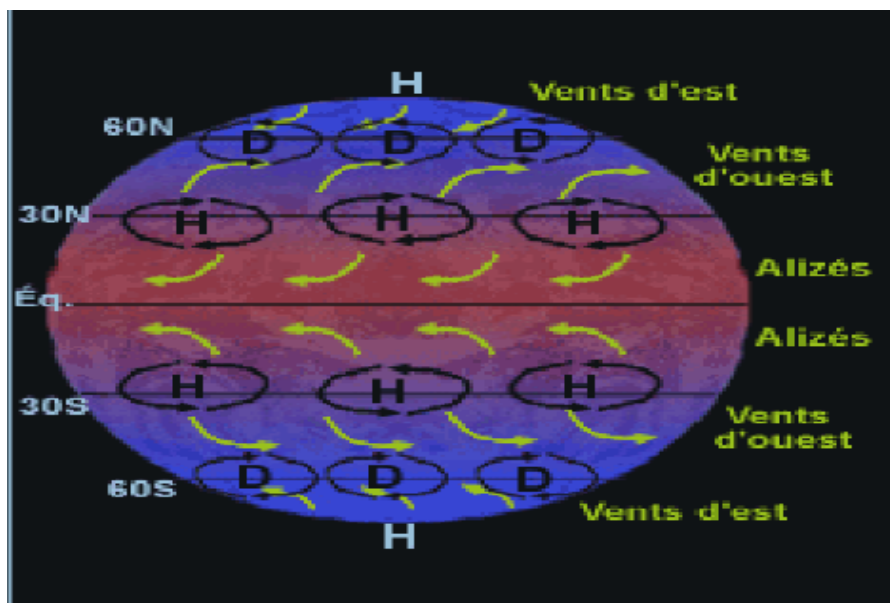


Figure II.3 Circulation atmosphérique simplifiée (Hiver dans l'hémisphère Nord).

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

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

Une série de ceintures calmes sont aussi créées les régions voisines des trentième parallèles ou les alizés et les vents d'Ouest des latitudes moyennes divergent sont des zones de vents relativement calmes. De la même façon, la région équatoriale où les deux alizés convergent, est une zone de vents faible. Ces deux zones calmes correspondant à de l'air qui s'élève ou qui s'affaisse. La description ci-dessus est très simplifiée, les masses continentales, les montagnes, la surface des océans et les principaux courants océaniques modifient ses caractéristiques de circulation générale obligeant les hautes et basses pressions à rester constamment dans certaines régions et en éviter d'autres. Au lieu de simples bandes de hautes et basses pressions d'air entourant la terre, nous avons d'énormes systèmes de pression circulaires connus sous le nom de systèmes de pression semi-permanents. Les systèmes de basse pression semi-permanents « également appelés dépressions cycloniques » sont de vastes zones d'air qui s'élèvent et circulent dans le sens inverse des aiguilles d'une montre « dans l'hémisphère Nord ». Les systèmes de haute pression semi-permanents « anticyclones » sont de vastes zones d'air descendant, la circulation se faisant dans le sens des aiguilles d'une montre dans l'hémisphère Nord (**figure II.4**).

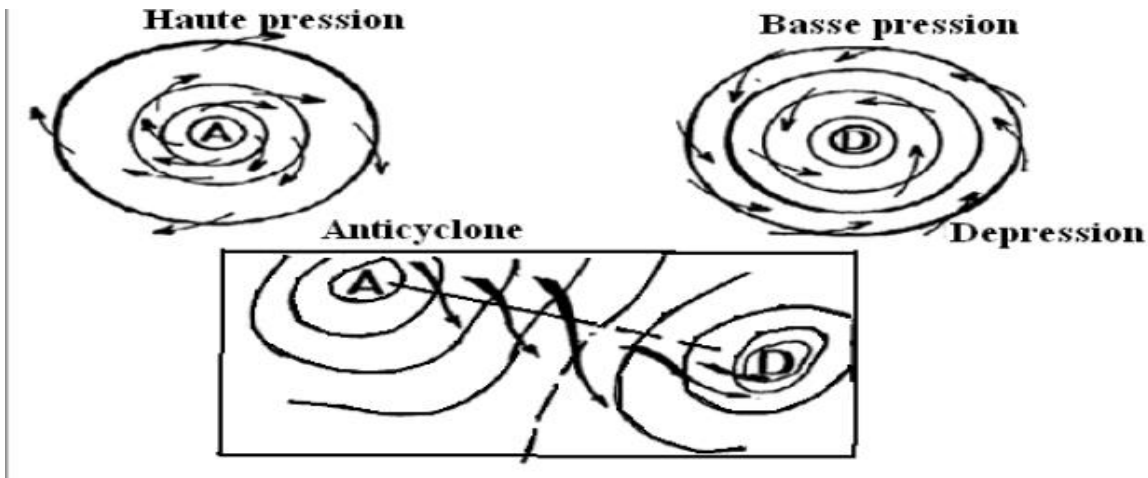


Figure II.4 Circulation du vent autour des systèmes de pression.

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

II.3.2 Vents locaux

La circulation thermique est une autre cause importante du vent, à un niveau toutefois plus localisé. La surface de la terre est chauffée différemment selon le lieu et la forme des zones relativement chaudes et froides. L'air plus chaud a tendance à monter parce qu'il est moins dense, et l'air plus froid à circuler le long de la surface de terre pour le remplacer, il en résulte un schéma de circulation thermique simple. La force de la circulation thermique localisée dépend de nombreux facteurs tels que la nature de la surface de la terre à l'endroit considéré, la température et la teneur en humidité de l'air au voisinage de la surface de la terre, et la vitesse de variation de la température de l'atmosphère en fonction de la hauteur au-dessus du sol. En générale, la température de l'atmosphère diminue avec l'altitude, mais la vitesse de refroidissement varie beaucoup selon les conditions locales. Lorsqu'un volume d'air chauffé s'élève, il se dilate, tout en se refroidissant avec l'altitude, mais pas nécessairement à la même vitesse que l'air environnant. Le volume d'air continuera à monter tant qu'il sera plus chaud et moins dense que l'air environnant. Selon les effets combinés de ces facteurs, la montée sera soit retardée, on parle alors de conditions stables, soit accélérée et l'on parle dans ce cas de conditions instables. Dans

les endroits ensoleillés arides et chauds, les conditions sont généralement très instables pendant le jour mais tout fait stable la nuit.

II.4 Vitesse et direction du vent

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans le sens direct autour des zones anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents. La vitesse du vent est mesurée avec des anémomètres. Il en existe plusieurs types classés en deux catégories principales (les anémomètres à rotation et les anémomètres à pression). Une graduation a été établie, selon l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leurs vitesses en 17 catégories dont nous citons quelques unes au **tableau II.1** [38].

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

Tableau II.1 Echelle Beaufort [38].

En effet, pour implanter un parc éolien, la prospection des sites possibles constitue le premier travail à effectuer pour juger de la capacité de production d'une centrale éolienne. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année pour déterminer la possibilité ou non d'implanter le parc. Non seulement il faut connaître

la vitesse moyenne du vent, mais aussi sa variation en fonction de l'altitude. Les vents les plus intéressants qui donnent finalement le plus d'énergie annuelle, sont les vents réguliers qui ont une vitesse de 6 à 10 m/s. [39]

II.4.1 Le vent et ses variations :

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

A partir des relevés enregistrés par un instrument de mesure, anémomètre on peut calculer la vent à l'endroit considéré. A chaque enregistrement de cette vitesse on relève également la direction de l'écoulement donné par une girouette (voir **Figure II.5**).



Figure II.5 Instrument de mesure de la direction et la vitesse du vent.

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

✚ Les rafales

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

✚ Les variations mensuelles

La moyenne arithmétique des enregistrements effectués au cours de chaque mois permettra au décideur de choisir le système le mieux adapté au (Figure II.6).

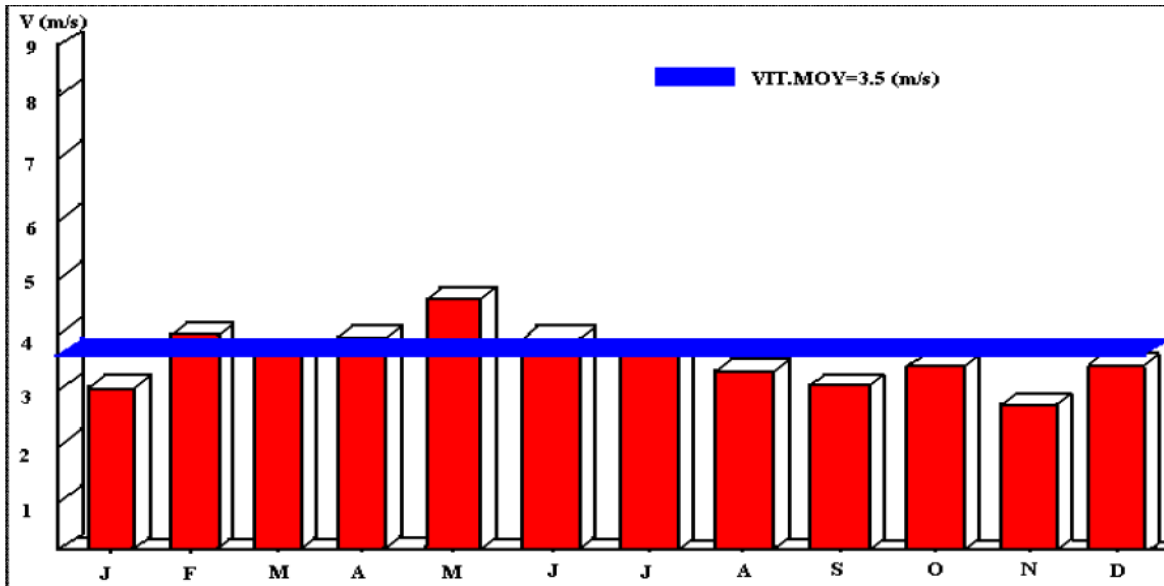


Figure II.6 Variations mensuelles moyennes (exemple)

✚ Les variations annuelles

Elles sont répétitives avec une bonne précision d'évaluation, selon les relevés d'un année permettant l'estimation de l'énergie éolienne récupérable sur un site (Figure II.7)

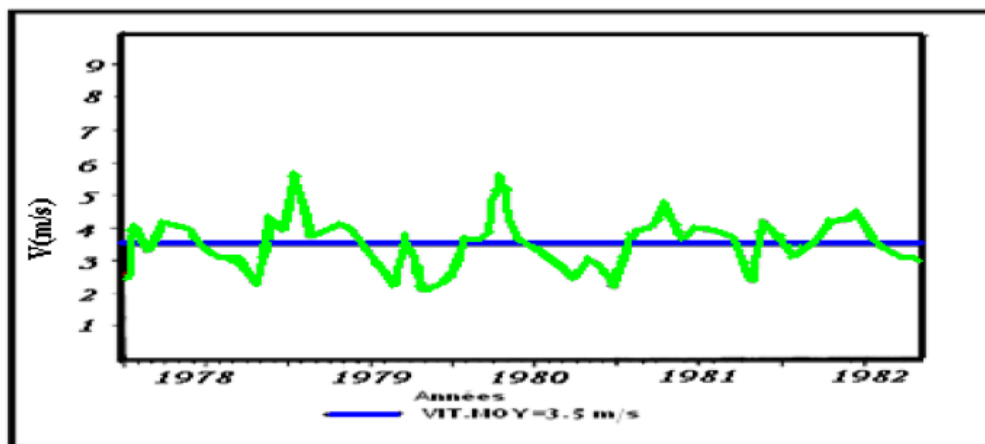


Figure II.7 Variations inter annuelles.

✚ Les variations avec l'altitude

Elles dépendent essentiellement de la nature du sol au dessus du quel se propagent les masses d'air (Figure II.8).

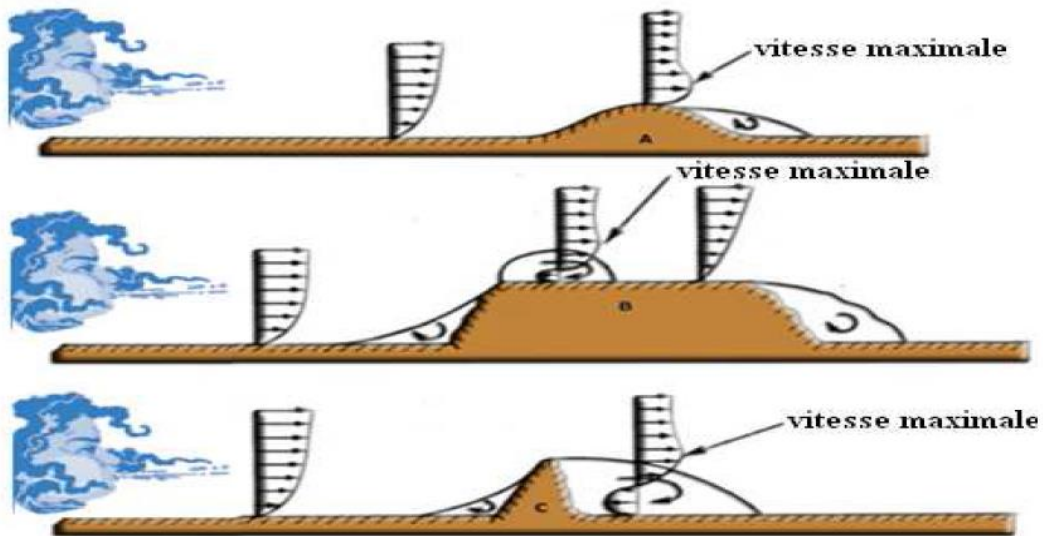


Figure II.8 Variations avec l'altitude.

La vitesse du vent augmente avec l'altitude par rapport au sol [40]. Les données météorologiques en fonction de l'altitude sont fournies pour une altitude de 10m alors que l'altitude des éoliennes est supérieure de 10m. Il est donc nécessaire de disposer de méthodes de Justus en 1978 pour transposer les vitesses du vent à 10 m en vitesses du vent à l'altitude envisagée pour l'éolienne:

$$V_h = V_{10} \left(\frac{h}{10}\right)^\alpha$$

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

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

h : Hauteur de mesure en [m].

Le Tableau (II.2) représente les valeurs de rugosité α en fonction du caractère des obstacles où l'environnement est souvent considéré comme étant égal à 0,15[41].

Nature du sol	Paramètre de rugosité
▪ Surface d'un plan d'eau	0.002

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

Tableau II.2 Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement

 **Les variations de direction**

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

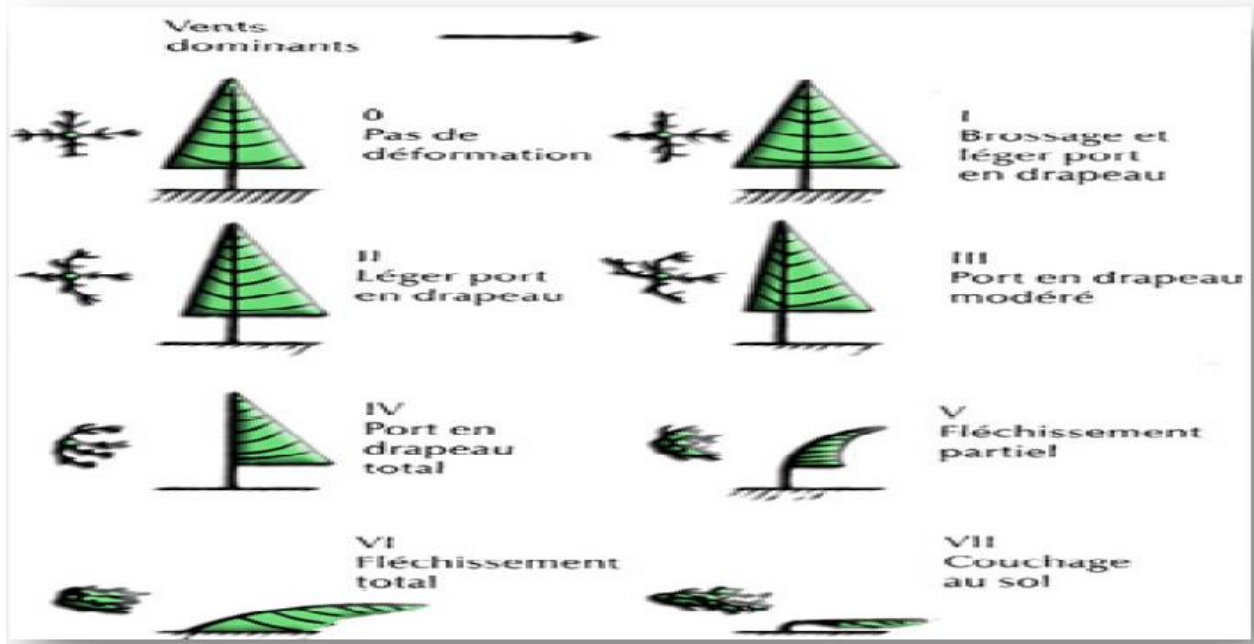


Figure II.9 Influence de la végétation sur les vents dominants

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

- | | |
|---------------------|----------------------|
| 0: vents < 3 m/s | I: vents = 3-4 m/s |
| II: vents = 4-5 m/s | III: vents = 5-6 m/s |
| IV: vents = 6-7 m/s | V: vents = 7-8 m/s |
| VI: vents = 8-9 m/s | VII: vents > 10 m/s |

II.5 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Fig. 1-9) [42].

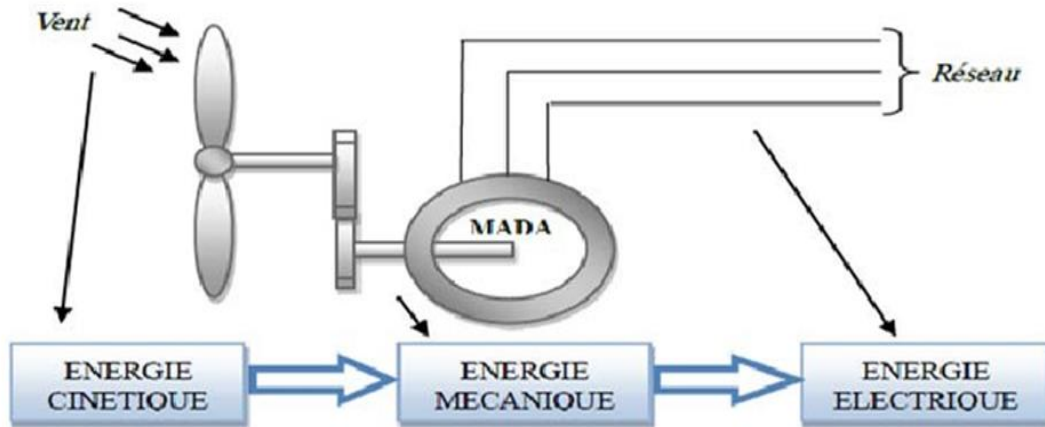


Figure II.10 schéma de principe d'une éolienne.

La figure II.11 illustre la correspondance taille-puissance des éoliennes .

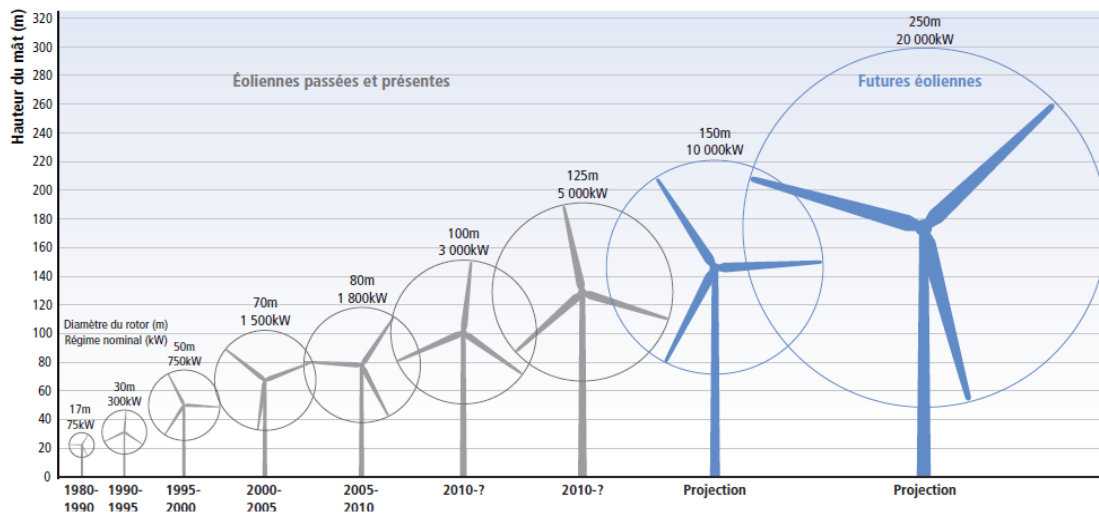


Figure II.11 Correspondance taille-puissance des éoliennes.

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la Fig. II.12 [43].

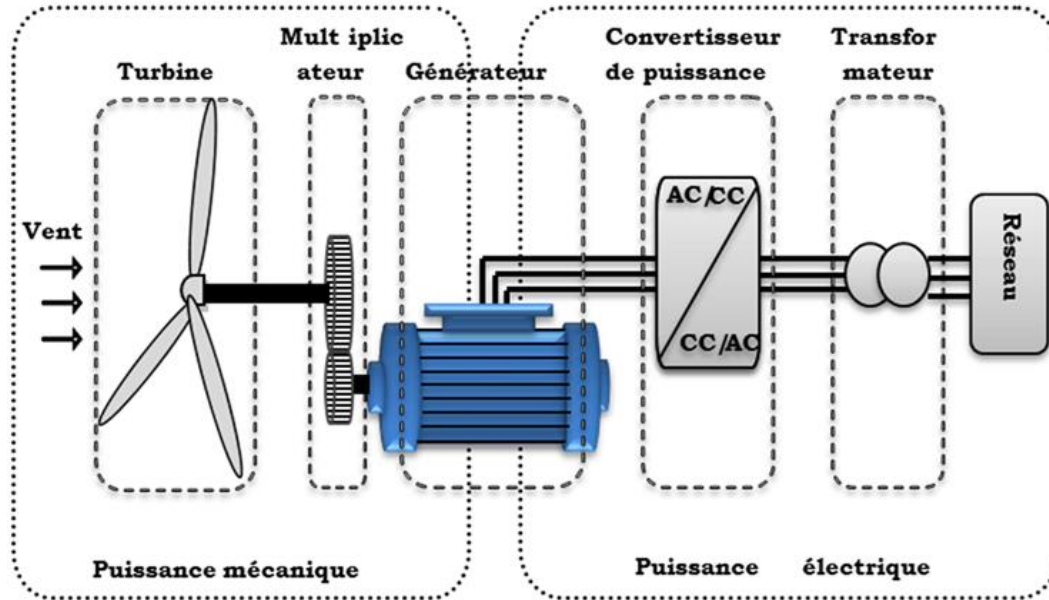


Figure II.12 Principaux organes du système de conversion éolien [43].

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [42].

II.5.1 Contexte actuel en Algérie :

Dans le cas de l'Algérie, comme le montre la figure 1, la cartographie de la densité de puissance moyenne annuelle récupérable à 10 mètres, la majorité du sud-ouest du Sahara est caractérisée par un potentiel annuel moyen récupérable variant de 1 à 2 MWh/m² [44]

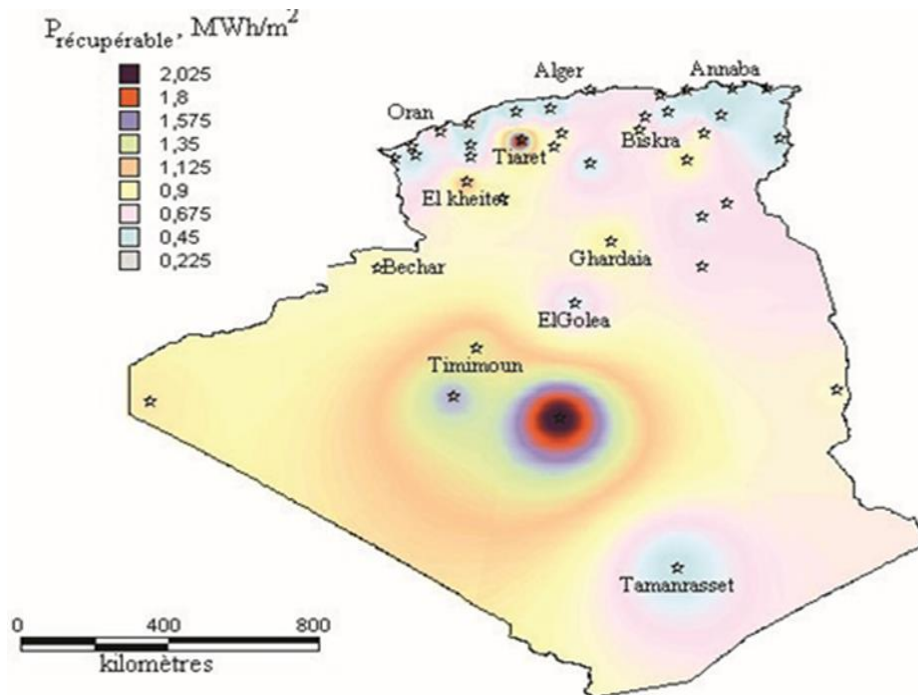


Figure II.13 Densité de puissance moyenne éolienne récupérable à 10 m du sol en Algérie.

II.5.2 Sonelgaz inaugure sa première ferme éolienne de 10 MW à Adrar :

Sonelgaz a mis en service sa première ferme éolienne d'Adrar d'une capacité de 10 mégawatts qui servira aussi de projet pilote pour le plan éolien du gouvernement de 420 MW à l'horizon 2024. Constituée de 12 éoliennes d'une puissance unitaire de 0.85 MW chacune (pour une capacité globale de 10 mégawatts), cette ferme est implantée sur une superficie de 30 hectares dans la zone de Kabertène à 72 km au nord du chef-lieu de la wilaya d'Adrar, a nécessité près de 32 mois travaux pour un coût global de 2,8 milliards de dinars . Première du genre à l'échelle nationale, cette nouvelle centrale de production d'électricité fait partie d'un vaste plan de projets de génération de 22 GW, d'énergie renouvelable à l'horizon 2030 dont 1,7 GW en éolien. Une étude du consortium industriel pour l'électricité des déserts, le promoteur du projet Desrtec, estime que l'Algérie dispose d'un potentiel énorme en énergie éolienne.

La société d'électricité et de l'énergie renouvelable (SKTM), annonce qu'environ 40 % de la production d'électricité destinée à la consommation nationale sera d'origine renouvelable à l'horizon 2030.

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement des autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Un système éolien ou une éolienne est composé d'éléments aptes à transformer une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique puis en énergie électrique.



Figure II.14 La ferme éolienne d'Adrar

II.6 Représentation d'une éolienne et son énergie de production

Une éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Les éoliennes sont composées de pales en rotation autour du rotor et actionnées par le vent. Elles sont généralement utilisées pour produire de l'énergie électrique de catégorie des énergies renouvelables.

II.6.1 les différents types des turbines éoliennes :

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aérotrain. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal.

II.6.1.1 Eolienne 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. De nombreuses variantes ont été testées depuis les années vingt, dont beaucoup sans succès, mais deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

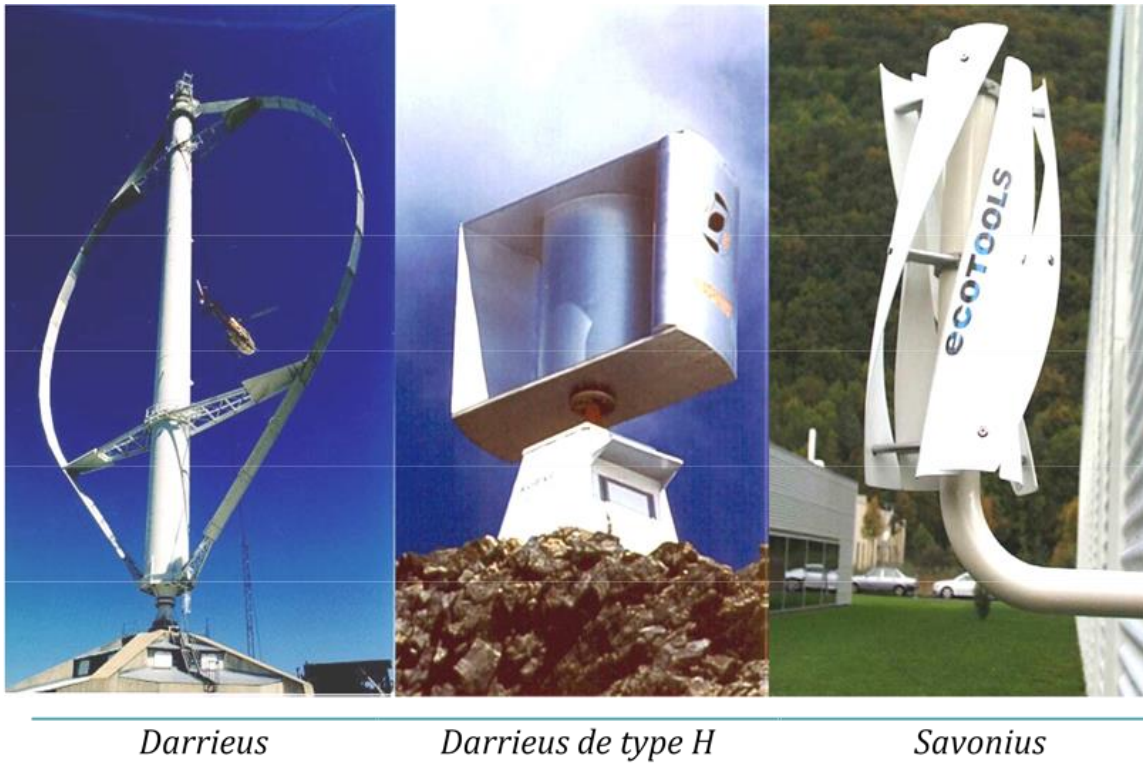


Figure II.15 technologie éolienne à axe vertical.

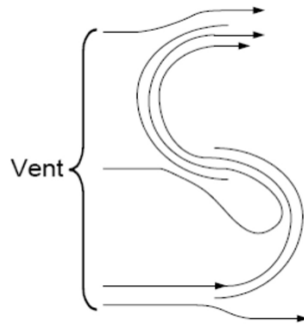


Figure II.16 éolienne de Savonius.

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 ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (**Figure II.16**)

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 II.17**) 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 [45].

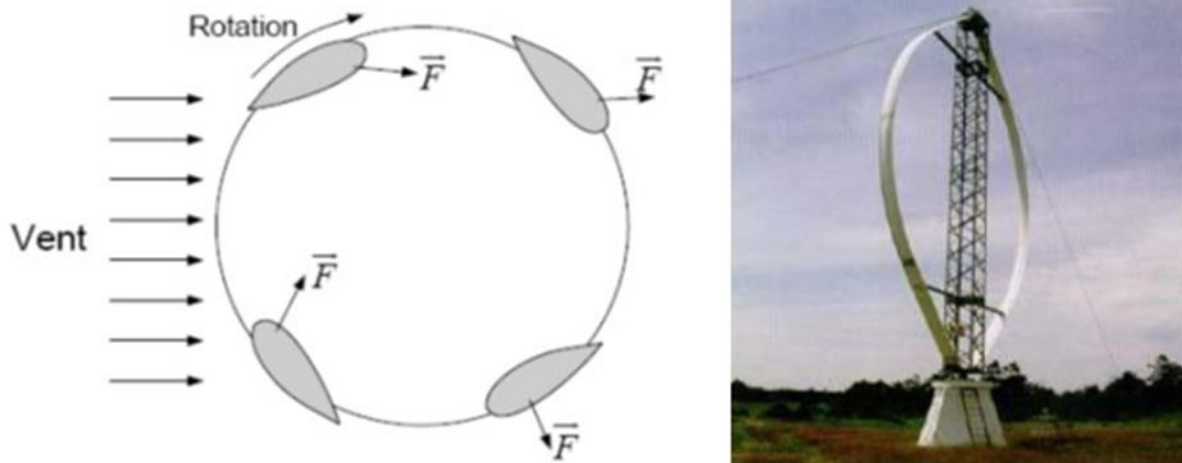


Figure II.17 Eolienne de Darrieux.

➤ **Avantages**

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien

➤ **Inconvénient**

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

II.6.1.2 Eoliennes à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de pales profilées de façon aérodynamique à 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.

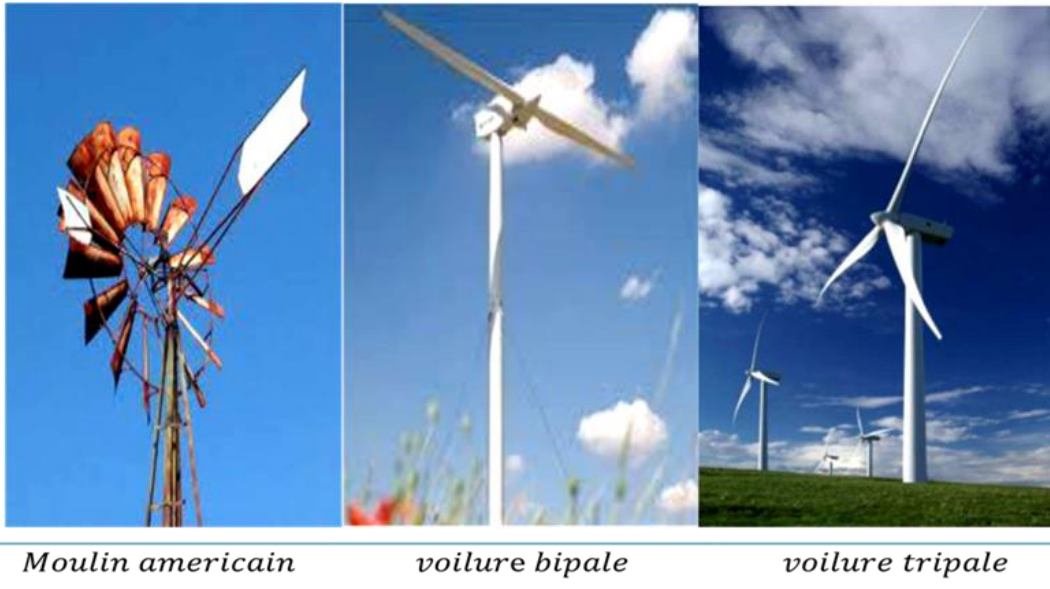


Figure II.18 technologie éolienne à axe horizontale.

➤ **Avantages**

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

➤ **Inconvénient**

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

✚ Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [46].

✚ Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch) [46].

II.6.2 Eoliennes lentes :

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multiples sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau. La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [47] :

$$P = 0.15 \cdot D^2 \cdot V^3 \dots \dots \dots (I.1)$$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre (D) en mètre et la vitesse (V) du vent en m/s.

II.6.3 Eoliennes rapides :

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible. Le tableau 2 propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Le **tableau II.3** propose une classification de ces turbines selon la puissance qu'elles délivrent et le diamètre de leur hélice.

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 à 45 m	40 kW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW

Tableau II.19 Classification des turbines éoliennes [47]

En effet, les éoliennes ont différentes dimensions, et puisque l'air est une ressource diffuse, la tendance générale favorise les appareils de plus en plus gros. Les progrès en science des matériaux ont permis la fabrication de pales plus légères et plus solides ainsi que l'amélioration de la conception des tours et des fondations, ce qui permet la construction d'appareils de plus en plus imposants. En 1995, les éoliennes de 500 kW étaient la dernière nouveauté. Aujourd'hui, des appareils individuels de 4,5 MW (4 500 kW) sont en production commerciale [48]. Dans ce qui suit, notre étude se portera spécialement sur les éoliennes rapides dont nous essayerons de donner une description globale du modèle. Formule pratique pour une éolienne rapide à axe horizontal, tenant compte d'un rendement moyen:

$$P=0.15 \cdot D^2 \cdot V^3 \dots\dots\dots (I.2)$$

II.7 Principales composantes d'éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux: comme illustré sur **la figure II.19**

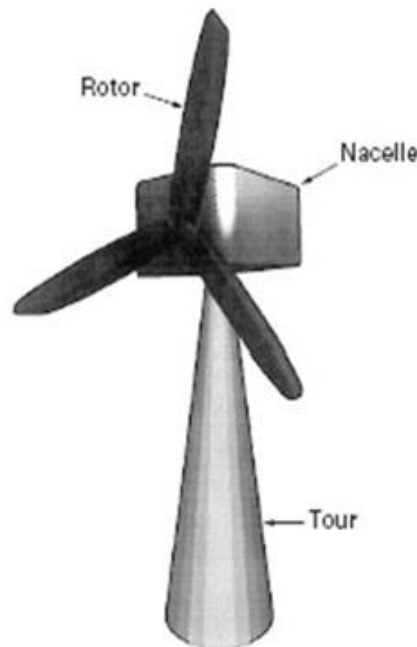


Figure II.19 Composant d'une éolienne à axe horizontal.

Rotor

Il est formé par les pales assemblées dans leur moyeu, il fait tourner le mécanisme d'entraînement construites habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois.

Le nombre de pales varie de un à trois, le rotor tripale étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le cout, l'impact visuel et le bruit [49].

On distingue deux types de rotors :

a. Rotors à pas fixe :

Ils sont souvent munis d'un système d'orientation des pales permettant une connexion directe au réseau ou à la charge sans dispositif d'électronique de puissance, c'est un mécanisme presque idéal assurant une optimisation de la vitesse disponible. Mais un tel dispositif est complexe et couteux.

b. Rotors à pas variable :

Ils sont couteux car le dispositif d'orientation des pales est dans la plupart des cas supprimé. Toutefois, une interface d'électronique de puissance entre le générateur et le réseau ou la charge est nécessaire.

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

Nacelle :

Elle est située en haut du mât, elle comporte toute l'installation de production d'électricité : le multiplicateur, le générateur, les systèmes de frein et d'orientation de l'éolienne et tous les équipements automatisés d'asservissement de l'ensemble des fonctions de l'éolienne. La nacelle est une structure en acier ou en fonte à laquelle tous ces éléments sont attachés entre eux et le générateur. Les pales doivent être légères, solides et durables, elles sont construites habituellement en matériaux composites à base de fibre de verre, plastique renforcé ou en bois. La (**figure II.20**) montre la nacelle et ces éléments.

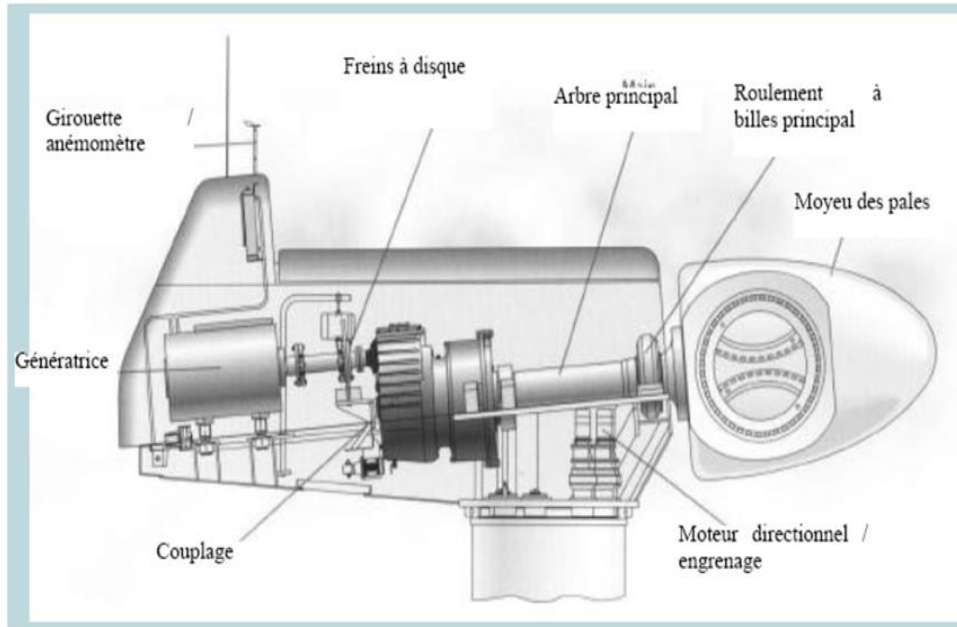


Figure II.20 Eléments attachés à une nacelle

Arbre

Il relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Multiplicateur

Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

Système de refroidissement

Il comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile (ou eau) pour le multiplicateur.

Génératrice (ou alternateur)

C'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.

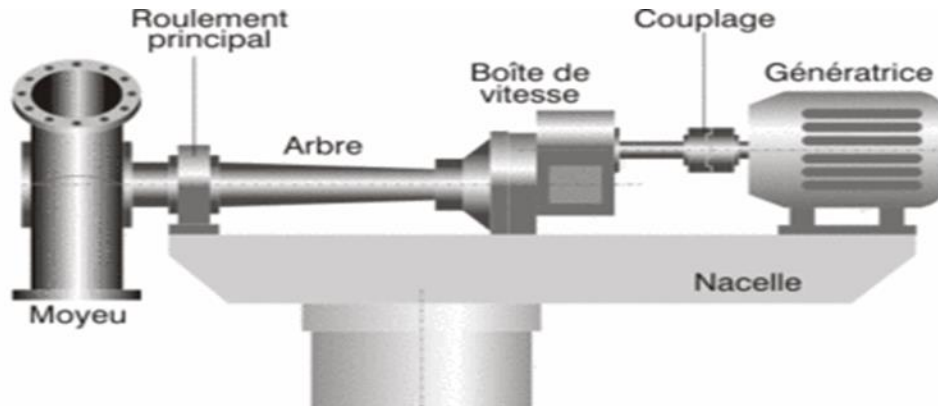


Figure II.21 Génératrice connecté à la moyeu

II.8 Les éoliennes connectées au réseau électrique

Aujourd'hui, on peut recenser deux types d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques: les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP).

Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage [50].

II.8.1 Les éoliennes à vitesse fixe :

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques [50]. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1%.

Outre la simplicité de la connexion, cette solution bénéficie des avantages de la machine asynchrone à cage qui est robuste et a l'avantage d'être standardisée et fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle de puissances.

Par ailleurs, la connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor [51].

➤ *Avantages*

- De technologie simple robuste et approuvée
- Solution économique.
- Peu de maintenance (MAS à cage).

➤ *Inconvénients*

- Possède une efficacité aérodynamique peu élevée.
- Consomme la puissance réactive.
- Génère des fluctuations de puissance produite sur le réseau.

II.8.2 Les éoliennes à vitesse variable :

Le fonctionnement à vitesse variable permet de maximiser la puissance extraite du vent. Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statiques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire [52].

Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [53]. Les avantages de cette configuration sont les suivants [51]:

- Augmentation du rendement énergétique;
- Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance;
- Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques;
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient. Contrairement aux dispositifs à vitesse fixe qui utilisent presque exclusivement des génératrices asynchrones à cage.

➤ *Avantages*

- Réduit le stress sur les composantes mécaniques de l'éolienne.

- Permet de maximiser l'efficacité aérodynamique pour une grande plage de vitesse de vent.
- permet de lissage de la puissance de sortie de la turbine.
- permet le contrôle de la tension et de la fréquence sur le réseau (contrôle du

flux de puissance).

- Permet l'utilisation d'une boîte de vitesse réduite (ou absente) produisant moins de pertes par frottement (pleine vitesse variable seulement).

➤ **Inconvénients**

- Nécessite un contrôle complexe
- Les convertisseurs de puissance sont engendrent des pertes de puissance électrique.

chaîne de conversion de l'énergie éolienne :

Pour obtenir de l'électricité à partir du vent, on retrouve dans les différentes configurations les mêmes éléments de base à savoir :

- Une turbine qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique.
- Une transmission mécanique.
- Une génératrice.
- Un système de liaison électrique.

Selon l'utilisation de l'éolienne, certaines de ces parties sont plus ou moins développées, on distingue deux grandes familles d'éoliennes:

- Les éoliennes raccordées au réseau.
- Les éoliennes autonomes.

II.9 principe de conversion de l'énergie éolienne

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un générateur qui produit de l'électricité. La vitesse de rotation du rotor doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tr/mn pour une machine à 2 paires de pôles, vitesse nécessaire au bon fonctionnement du générateur. Des convertisseurs électroniques de vitesse sont nécessaires au bon fonctionnement du générateur.

Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée, tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

La tension de l'électricité produite par générateur est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mat. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public.

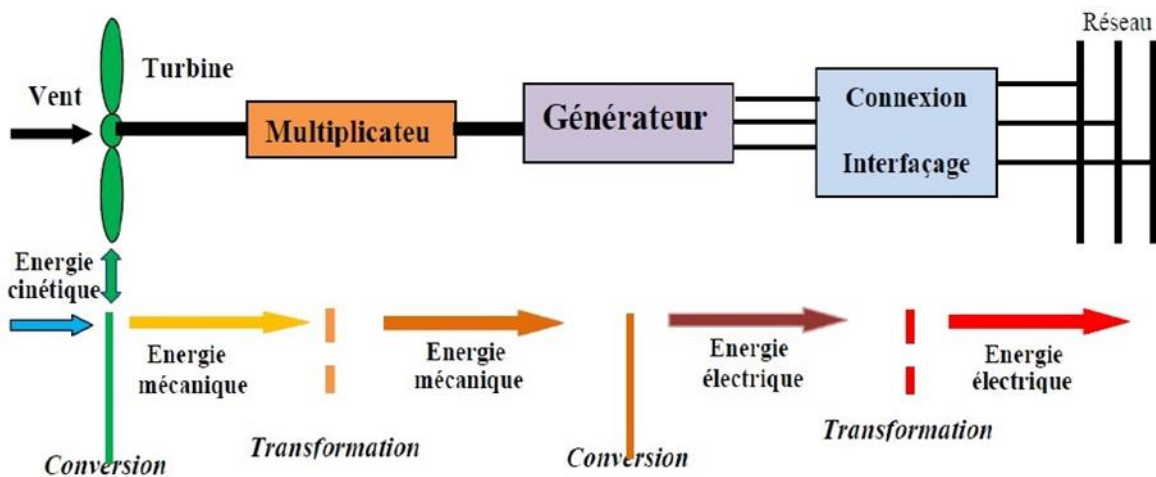


Figure II.22 Principe de la conversion de l'énergie éolienne

II.9.1 Zones de fonctionnement de l'éolienne :

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

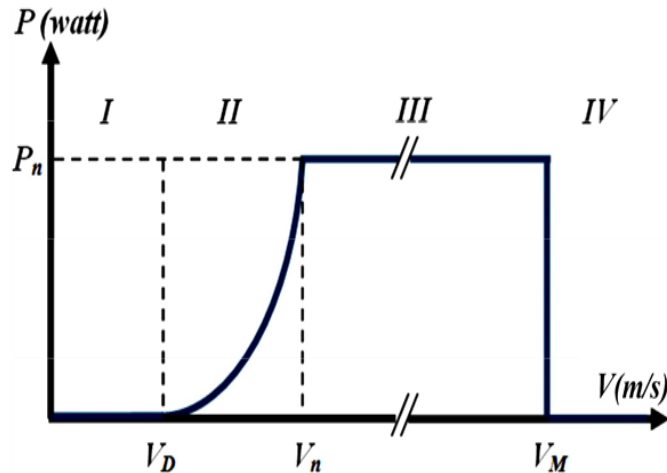


Figure II.23 Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

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

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

V_M : 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_M vaut 25m/s.

Zone I : $V < V_D$: La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

Zone II : $V_D < V < V_n$: 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.

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

Il existe quatre voies principales pour limiter la puissance éolienne dans le cas de fortes valeurs du vent. La première est une technique active assez coûteuse et complexe appelée système à pas variable « pitch » : elle est donc plutôt utilisée sur les systèmes à vitesse variable de moyenne à fortes puissances (quelques centaines de kW).

Elle consiste à régler mécaniquement la position angulaire des pales sur leur axe ce qui permet de décaler dynamiquement la courbe du coefficient de puissance de la voilure. La seconde technique est passive « stall ». Elle consiste à concevoir la forme des pales pour obtenir un décrochage dynamique du flux d'air des pales à fort régime de vent. Il existe aussi des combinaisons des deux technologies précédemment citées. La troisième façon de limiter la puissance est la déviation de l'axe du rotor dans le plan vertical (un basculement de la nacelle) ou une déviation dans le plan horizontal (rotation autour de l'axe du mat). Ainsi, la turbine n'est plus face au vent et la surface active de l'éolienne diminue [54].

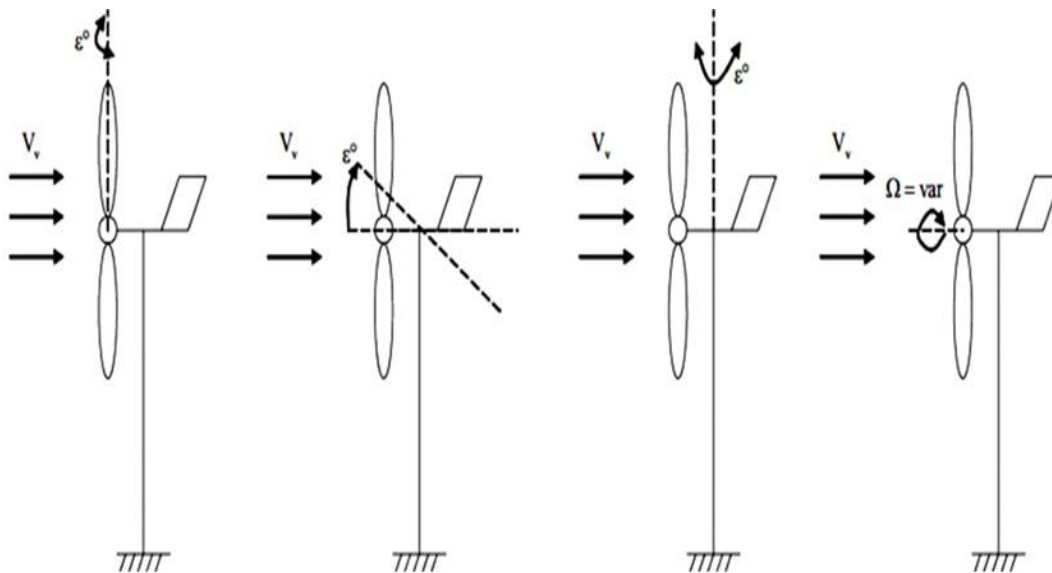


Figure II.24 Limitation de puissance éolienne, a) pitch, b) déviation verticale de l'axe de Rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse continûment Variable.

II.10 Conclusion

nous avons présenté dans ce chapitre quelques généralités sur les systèmes éoliens où on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, la représentation d'une éolienne et son énergie de production, les différents types d'éolienne et leurs principales composantes, les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne, la rentabilité d'une énergie éolienne. Ce chapitre nous a permis de développer un ensemble de solutions techniques disponibles pour la production d'énergie électrique par éolienne. Après avoir rappelé des concepts nécessaires pour comprendre le système de conversion de l'énergie éolienne.

Chapitre III : Modélisation et commande du system hybride

III.1 Introduction

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

III.2 Dimensionnement du système Hybride

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

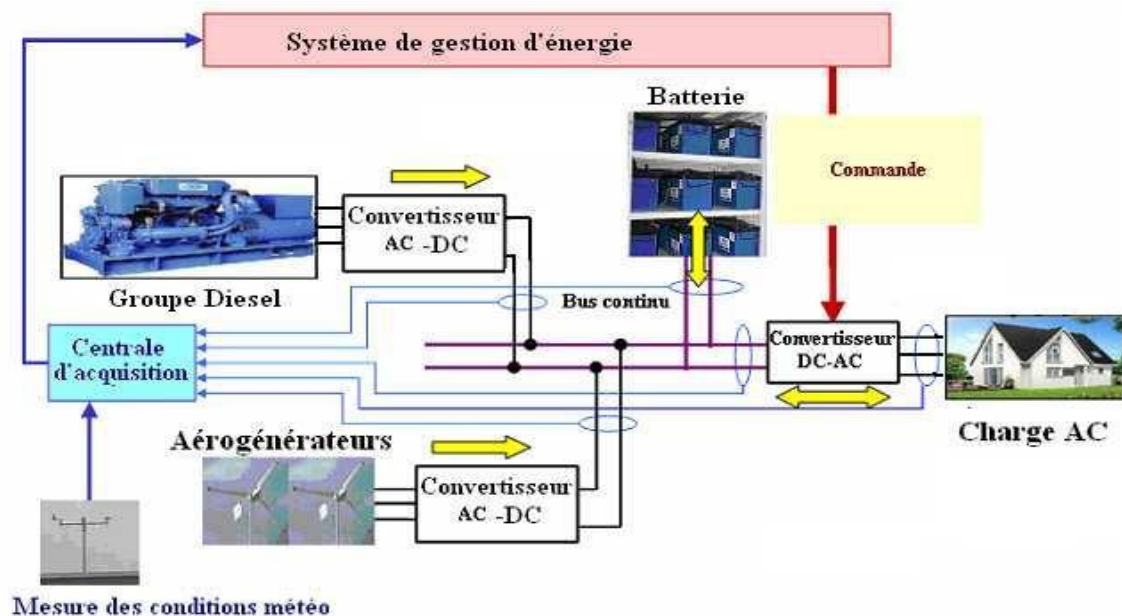


Figure III.1 Schéma représentatif d'un système hybride étudié.

III.2.1 Modélisation du système éolien

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

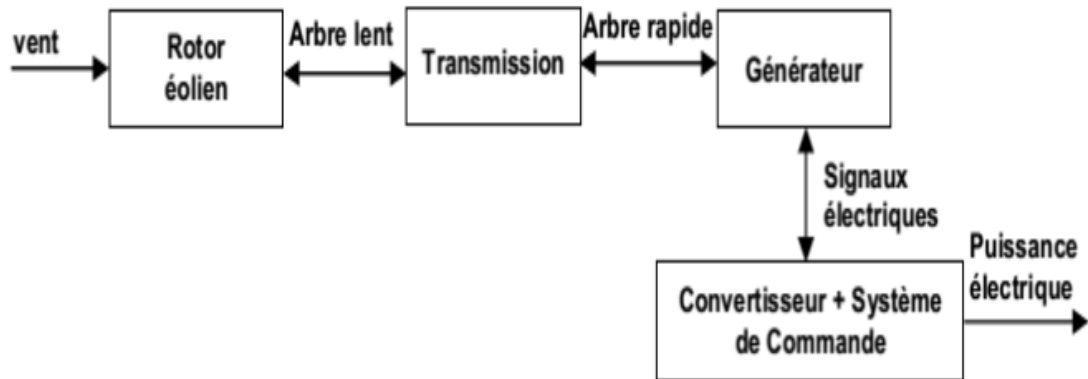


Figure III.2 Structure du système éolien [59].

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

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

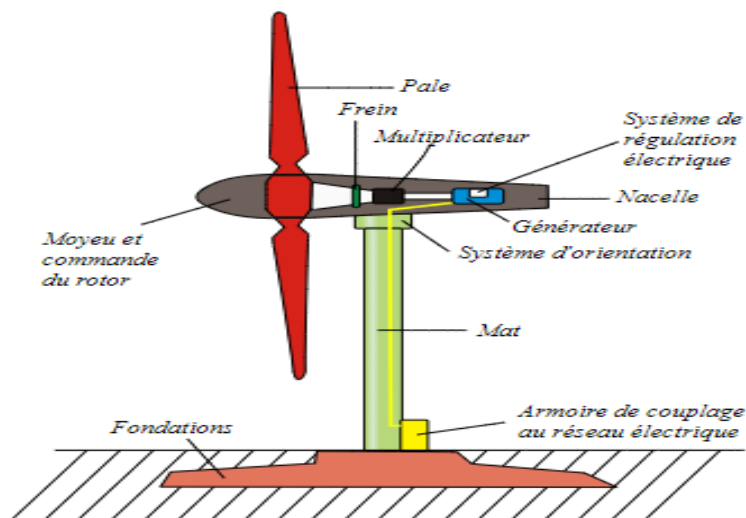


Figure III.3 Schéma d'une éolienne.

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

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

III.2.1.1 Modélisation du vent :

Le vent est la raison d'être des aérogénérateurs. Son énergie cinétique constitue la source primaire d'énergie. Le vent est en fait un champ de vitesses de déplacement de masses d'air caractérisé par sa vitesse et sa direction qui sont affectées par plusieurs facteurs, en particulier, le phénomène de cisaillement et l'effet d'obstacle de la tour.

Les propriétés dynamiques du vent sont capitales pour l'étude de l'ensemble du système de conversion d'énergie car la puissance éolienne, dans les conditions optimales, évolue au cube de la vitesse du vent. La vitesse du vent sera modélisée sous forme déterministe par une somme de plusieurs harmoniques[57] :

$$Vv(t) = A + \sum_{n=1}^i (a_n \cdot \sin(b_{n.w_v} \cdot t)) \quad (III.1)$$

La figure III.4 représente schéma de bloc de vent

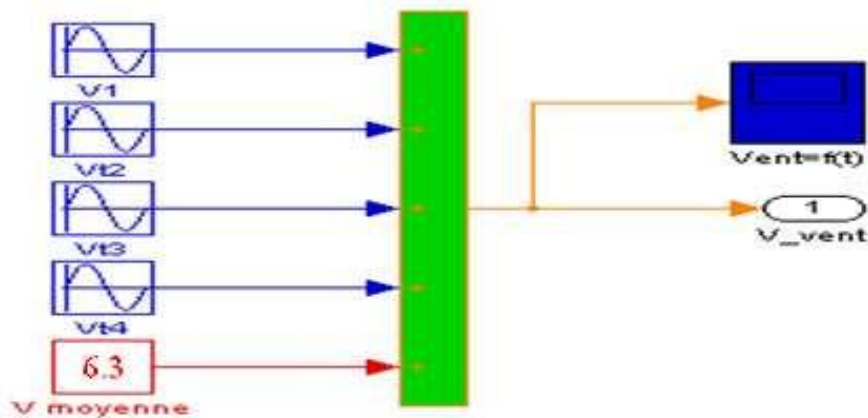


Figure III.4 Schéma de bloc de vent

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

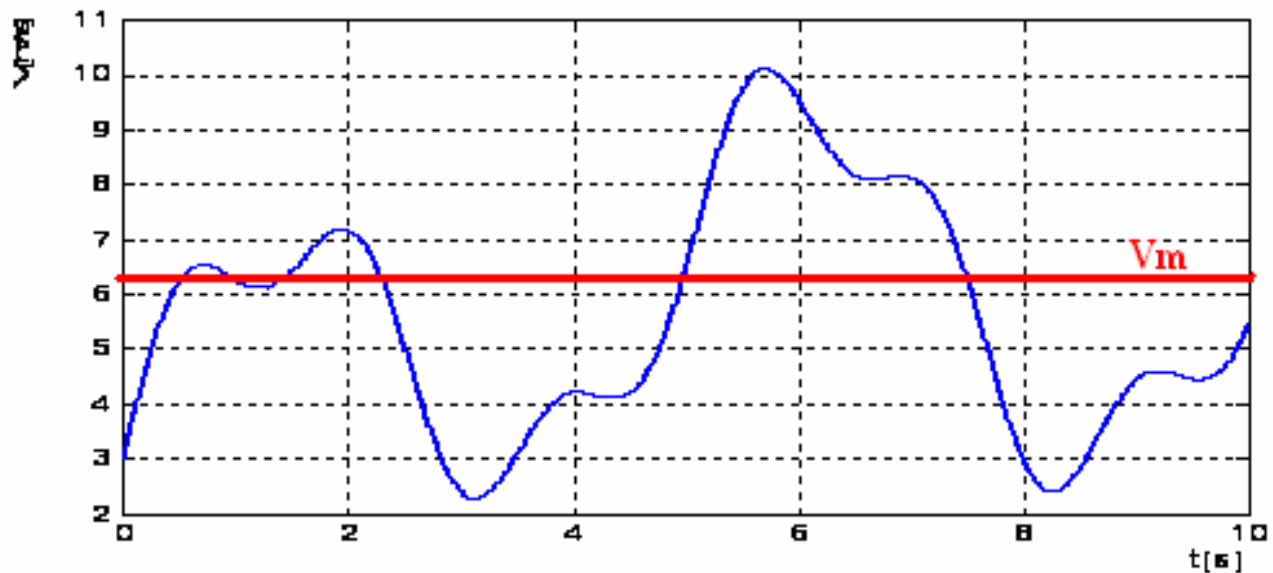


Figure III.5 Modèle du vent.

III.2.1.2 Conversion d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique :

III.2.1.2.a Loi de BETZ :

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure (III-6) sur lequel on a représenté la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_1 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 soit $(V_1 + V_2) / 2$, la masse d'air en mouvement de densité ρ traversant la surface S des pales en une seconde est:

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

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

$$P_m = m \cdot \frac{(V_1^2 - V_2^2)}{2} \quad (\text{III.3})$$

Soit en remplaçant m par son expression dans (II.1) :

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

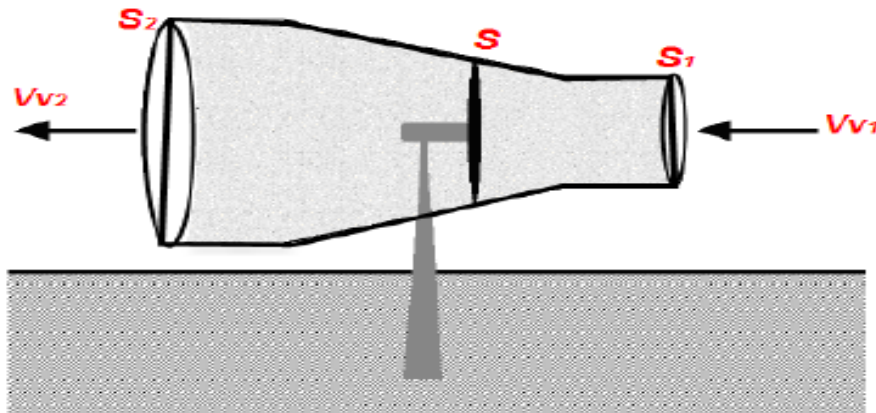


Figure. III.6 Tube de courant autour d'une éolienne

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

$$P_{mt} = \rho \cdot S \cdot \frac{V_1^3}{2} \quad (\text{III.5})$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{\left[1 + \left(\frac{V_1}{V_2}\right)\right] \left[1 - \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^2\right]}{2} \quad (\text{III.6})$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus (Figure III.7), on s'aperçoit que le ratio P_m / P_{mt} appelé aussi coefficient de puissance $CCPP$ présente un maxima de $16/27$ soit $0,59$. C'est cette limite théorique appelée limite de *Betz* qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent[58].

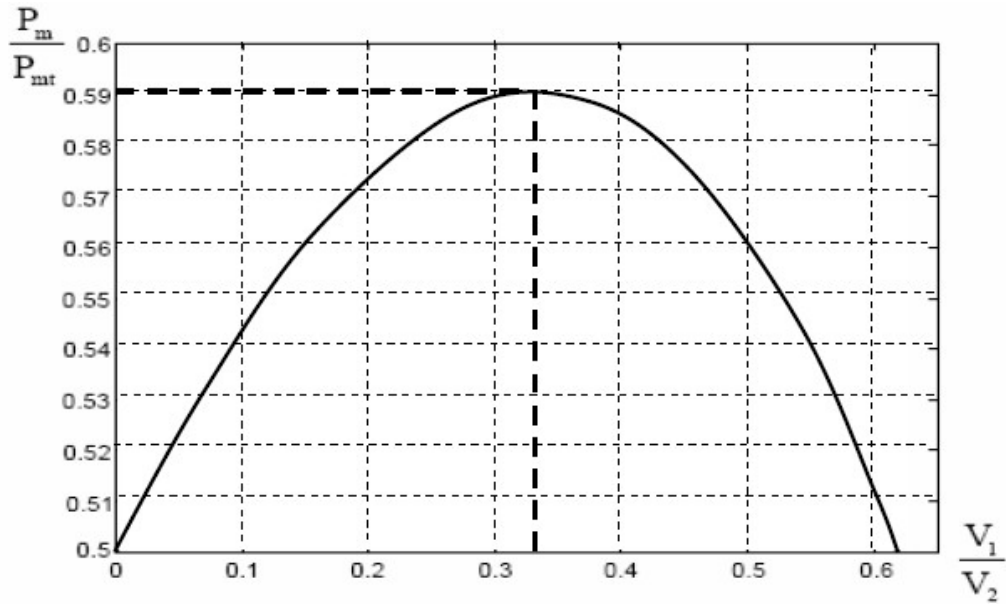


Figure. III.7 Coefficient de puissance.

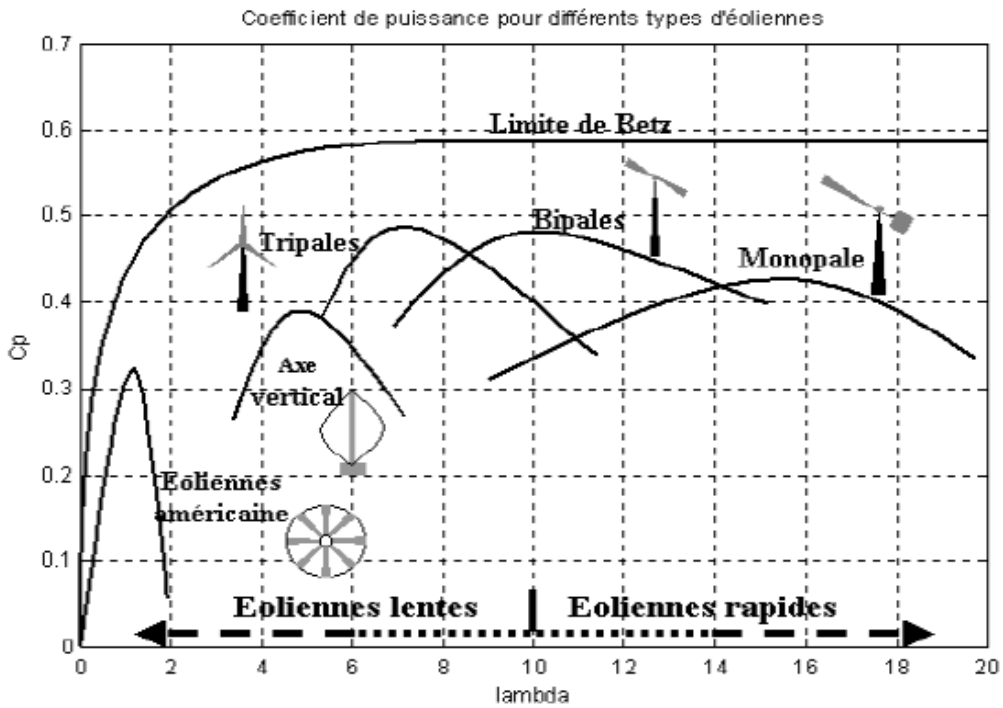


Figure. III.8 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient

de puissance (Figure III-8) atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique.

Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur. De plus, leur coefficient de puissance (Figure III-2) atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au-dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s[59].

III.2.1.2.b Production d'énergie mécanique :

En combinant les équations (III.6) et (III.9), la puissance mécanique P_m disponible sur l'arbre d'un aérogénérateur s'exprime ainsi :

$$P_m = \frac{P_m}{P_{mt}} P_{mt} = \frac{1}{2} C_p(\lambda) \rho \pi R^2 V_1^3 \quad (\text{III.7})$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 R}{V_1} \quad (\text{III.8})$$

Ω_1 : Vitesse de rotation avant multiplicateur.

R : Rayon de l'aérogénérateur.

G : Rapport du multiplicateur de vitesse.

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

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

Avec Ω_2 : vitesse de rotation avant multiplicateur.

Cette relation permet d'établir un ensemble de caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent(Figure I-9)

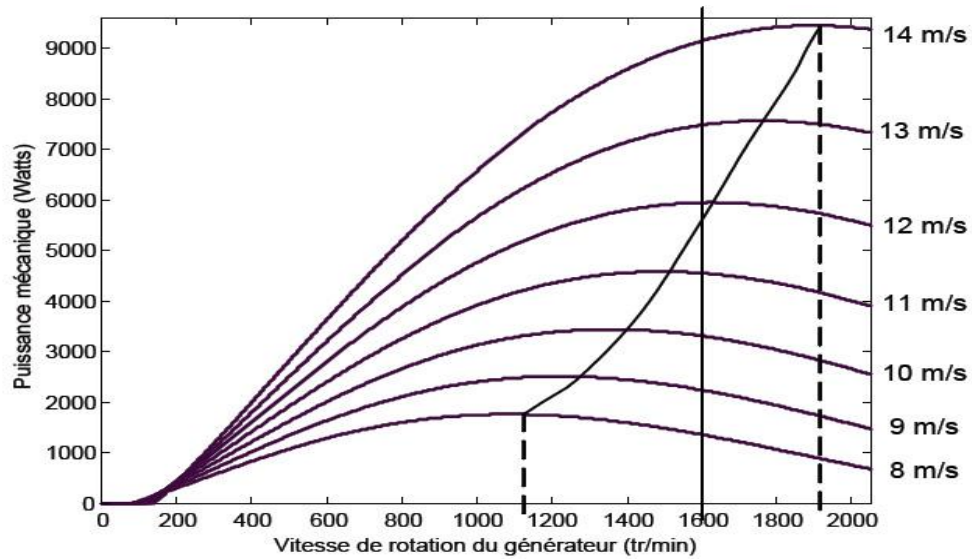


Figure. III.9 Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure (I-9) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

III.2.1.3 Modélisation de la turbine :

Un système éolien transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique.

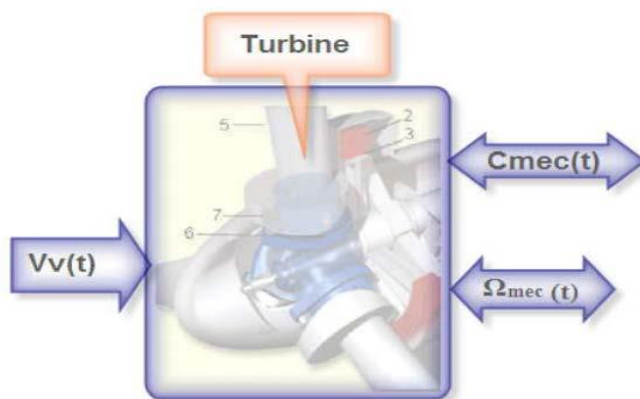


Figure III.10 Entrées – sorties du modèle de la turbine éolienne

Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur R entraînant une génératrice à travers un multiplicateur de gain K .

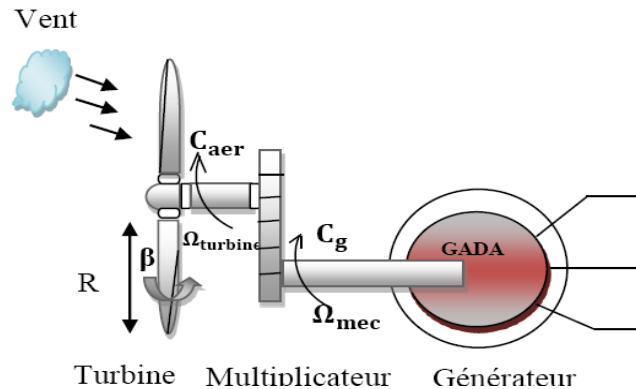


Figure III.11 Schéma de la turbine éolienne

L'équation donne la valeur du couple qui est créé sur les pales de l'éolienne par la masse d'air ayant une vitesse V_v .

$$C_{turb} = \frac{1}{2} C_c(\lambda) \rho \pi R^3 V_v^2 \quad (\text{III.10})$$

En réalité, ce couple éolien n'est pas égal au couple mécanique présent sur l'arbre de la turbine surtout à cause de l'inertie conséquente de la turbine *Jet*, dans une moindre mesure, des frottements mécaniques f . Il est donc impossible de considérer la turbine vue de l'arbre mécanique comme une source de couple liée directement à la vitesse du vent.

Modèle du multiplicateur

Le multiplicateur adapte la vitesse (lente) de la turbine à la vitesse (rapide) de la génératrice **figure II.10**. Ce multiplicateur est modélisé mathématiquement par les équations suivantes :

$$\begin{cases} C_g = \frac{C_{turb}}{K} \\ \Omega_{mec} = K \cdot \Omega_{turb} \end{cases} \quad (\text{III.11})$$

Avec **Omega** la vitesse de la génératrice.

Le multiplicateur présente des inconvénients, comme la nécessité d'une maintenance, un taux de panne élevé, des pertes énergétiques supplémentaires, un bruit acoustique parfois gênant et un encombrement important.

III-2-1-3-a Equation dynamique de l'arbre :

La masse de la turbine éolienne est reportée sur l'arbre de la turbine sous la forme d'une inertie **J turbe** et comprend la masse des pales et la masse du rotor de la turbine. Le modèle mécanique proposé considère l'inertie totale **J total** constituée de l'inertie de la turbine reportée sur le rotor de la génératrice et de l'inertie de la génératrice.[60]

$$J_{total} = \frac{J_{turb}}{K^2} + J_g \tag{III.12}$$

Il est à noter que l'inertie du rotor de la génératrice est très faible par rapport à l'inertie de la turbine reportée par cet axe.

L'équation fondamentale de la dynamique permet de déterminer l'évolution de la vitesse mécanique à partir du couple mécanique total **C mec** appliqué au rotor :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} = C_{mec} \tag{III.13}$$

Où **J** est l'inertie totale qui apparaît sur le rotor de la génératrice.

Ce couple mécanique prend en compte, le couple électromagnétique **Cem** produit par la génératrice, le couple des frottements visqueux **C vis**, et le couple issu du multiplicateur **Cg**.

$$\begin{cases} C_{mec} = C_g - C_{em} - C_{vis} \\ C_{vis} = f \cdot \Omega_{mec} \end{cases} \tag{III.14}$$

Il est plus logique de le considérer comme une source de vitesse. L'équivalence électrique d'un tel système inertiel est montrée sur le schéma de la figure:[61]

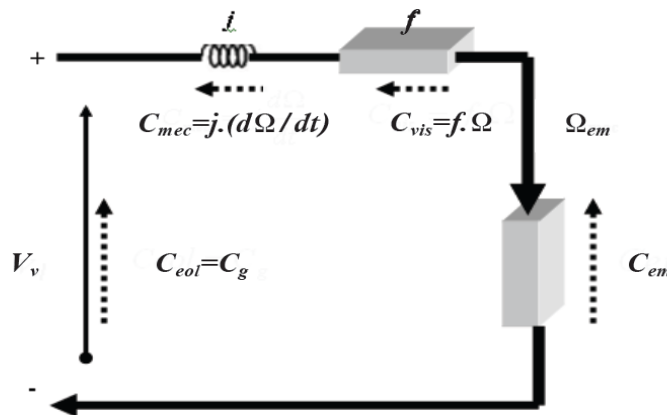


Figure III.12 Schéma électrique équivalent de la turbine éolienne

III-2-1-3-b Schéma bloc de la turbine :

Le schéma bloc correspondant à cette modélisation de la turbine se déduit des équations précédentes et est représenté sur la figure III.13.

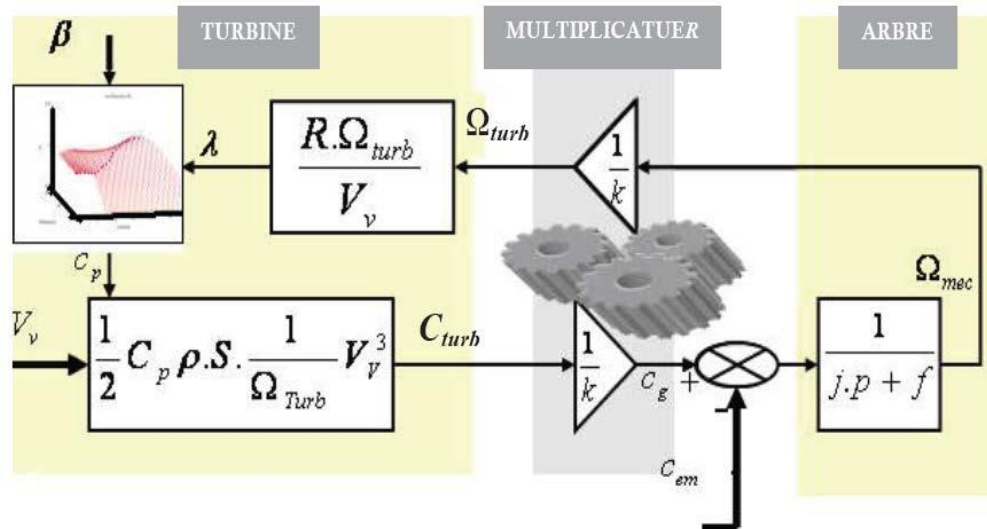


Figure III.13 Schéma bloc du modèle de la turbine

Les entrées de la turbine sont la vitesse du vent, l'angle d'orientation des pales et la vitesse de rotation de la turbine. Le modèle du multiplicateur transforme la vitesse mécanique et le couple aérodynamique respectivement en vitesse de la turbine et en couple de multiplicateur (relations 10). Le modèle de l'arbre décrit la dynamique de la vitesse mécanique, il a donc deux entrées : le couple du multiplicateur et le couple électromagnétique fourni par la génératrice. Le schéma bloc montre que la vitesse de la turbine peut être contrôlée par action sur deux entrées :

- l'angle d'orientation de la pale,
- le couple électromagnétique de la génératrice.

La vitesse du vent est considérée comme une entrée perturbatrice de ce système.

II.2.2 La Génératrice synchrone a aimant permanent

L'alternateur utilisé dans notre étude est une génératrice synchrone à aimant permanent avec 4 paires de pôles surfacique située au rotor permanents à grand nombre de pôles, rend les systèmes à vitesse variables plus attractifs. Ce type de machines permet d'extraire un maximum d'énergie en réduisant les contraintes mécaniques et cela par l'élimination du multiplicateur de vitesse, ce

qui améliore la fiabilité du système et la réduction des frais d'entretien. Contrairement à la machine asynchrone à double alimentation qui nécessite un multiplicateur mécanique

II.2.2.1 L'architecture de la GSAP :

Il existe quatre catégories de machines synchrones à aimants permanents du point de vue Construction mécanique :

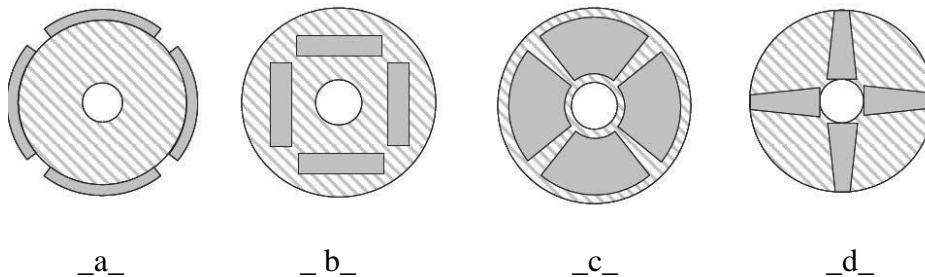


Figure III.14 Quelques configurations du placement des aimants

- a- Aimants en surface pour machine à flux radial.
- b- Aimants enterrés pour machine à flux radial.
- c- Aimants en surface pour machine à flux axial.
- d- Aimants enterrés pour machine à flux axial

III.2.2.2 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents :

La modélisation de la GSAP consiste à construire un modèle mathématique de la machine, en traduisant les phénomènes électromagnétiques et mécaniques qui régissent son fonctionnement. Ce qui permet d'étudier avec pertinence le comportement des différentes variables en mode dynamique et statique et exploiter ce modèle dans les simulations.

III.2.2.3 Hypothèse simplificatrice :

Afin de simplifier la modélisation de la machine synchrone, il est nécessaire de poser les hypothèses simplificatrices suivantes

- Le stator connecté en étoile, neutre en l'air pour éliminer la composante homopolaire des courants.
- La saturation du circuit magnétique est négligée ce qui mène à exprimer les flux magnétiques comme des fonctions linéaires des courants des phases,
- La distribution de la FMM dans l'entrefer est sinusoïdale, les harmoniques d'espace sont alors négligés.
- Les pertes par hystérésis et par courants de Foucault sont négligées.
- L'effet de peau et de la température est négligé.

III.2.2.4 La Mise en équation de la MSAP :

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 [62], [63].

Dans le repère classique il y a trois axes (as , bs , cs) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine. D'habitude, l'axe as est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Comme les stators des machines asynchrones et synchrones sont pareils, les repères statoriques pour les deux types de machine sont identiques. Quant aux rotors, on a toujours trois axes (ar , br , cr – correspondant aux trois enroulements rotoriques) pour la machine asynchrone (MAS), mais un seul axe (F – correspondant à la direction de l'aimantation) pour la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). L'angle θ_r donne la position du rotor par rapport au stator.

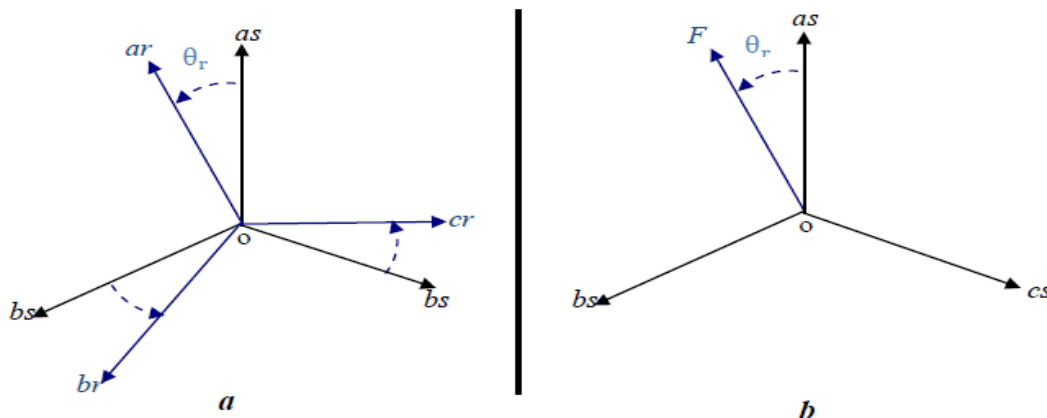


Figure III.15 a- machine asynchrone _ b- machine a aimant permanent

Le modèle de la MSAP qui sera développé dans notre travail est basé sur le schéma de la figure suivante :

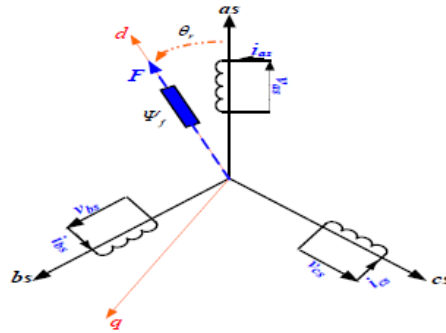


Figure III.16 schéma représentatif de la MSAP à modéliser

- *Equations électriques*

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \cdot \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (III.15)$$

$[v_a v_b v_c]$: Vecteur tension de phases statoriques.

$[i_a i_b i_c]$: Vecteur courant de phases statoriques.

$[\Psi_a \Psi_b \Psi_c]$: Vecteur des flux totaux traversant les bobines statorique.

R_s : la résistance des phases statoriques.

Passage au repère de Park

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, on applique un changement de repère.

Cette transformation mathématique, transforme les trois bobines statoriques déphasées de $2\pi/3$ en deux bobines fictives équivalentes déphasées de $\pi/2$ et situées sur le rotor Figure 17.III

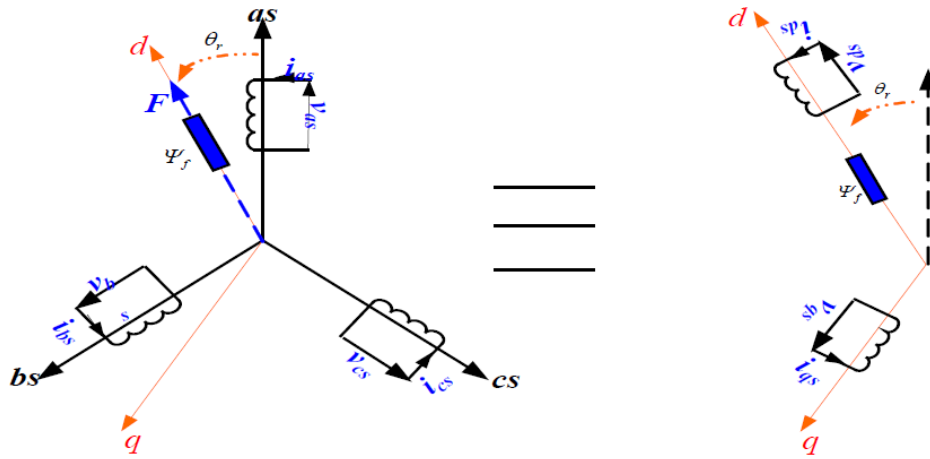


Figure III.17 Transformation triphasée- diphasée

La transformation de Park ($P(\theta)$) est définie par la matrice suivante :

$$P^{-1}(\theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & -\sin(\theta_e) & 1 \\ \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & 1 \\ \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) & 1 \end{bmatrix} \quad (III.16)$$

$P(\theta)$ définie le passage du repère a, b, c vers d, q, o

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta_e) & \cos(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin(\theta_e) & -\sin(\theta_e - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta_e - \frac{4\pi}{3}) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \quad (III.17)$$

$P^{-1}(\theta)$ définie le passage du repère d, q, o vers a, b, c

On définit aussi une autre transformation qui est celle de Concordia qui définit d'autres axes fictifs α et β tel que l'axe α est confondu avec l'axe as ce qui revient à poser $\theta_r=0$ dans la transformation de Park (équation III-2)

$$C = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.18})$$

Modèle de la MSAP dans le repère de Park :

Le schéma simplifié du GSAP dans le repère de Park est représenté sur la Figure 5.III, le modèle de la MSAP est défini par les différentes équations électriques, magnétiques et mécaniques suivantes :

- *Les équations électriques*

Les équations électriques de la MSAP convention moteur sont données par :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ V_{qs} = +R_s \cdot i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (\text{III.19})$$

En convention génératrice on inverse le sens des courants on aura donc les équations électriques de la GSAP comme suit :

$$\begin{cases} V_{ds} = -R_s \cdot i_{ds} + L_s \frac{di_{ds}}{dt} + \omega_r L_q i_q \\ V_{qs} = -R_s \cdot i_{qs} + L_s \frac{di_{qs}}{dt} - \omega_r L_d i_d + \omega_r \psi_f \end{cases} \quad (\text{III.20})$$

Cette convention de signe sera conservée tout le long de cette modélisation

- *Equations magnétique*

$$\begin{cases} \psi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + \psi_f \\ \psi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} \end{cases} \quad (\text{III.21})$$

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale les flux Ψ_{ds} d'axe direct (Ψ_{ds}) et de quadrature (Ψ_{qs}) sont fonction linéaire des courants (i_{ds} et i_{qs}) respectivement d'axe direct et de quadrature,

- *Expression du couple électromagnétique*

Est exprimé par la dérivée partielle de stockage d'énergie électromagnétique par rapport à l'angle géométrique de rotation du rotor [64]:

$$C_{em} = \frac{dW_e}{d\theta_{geo}} P \cdot \frac{dW_e}{d\theta_r} \quad (III.22)$$

W_e : Energie emmagasinée dans le circuit magnétique.

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

p : Nombre de paires de pôles.

L'expression de la puissance transmise est donnée par :

$$P(t) = \frac{3}{2} (v_{ds} + i_{ds} + v_{qs} \cdot i_{qs}) \quad (III.23)$$

En remplaçant v_{ds} et v_{qs}

par leurs expressions on aura :

$$P(t) = \frac{3}{2} \cdot \left[-R_s (i_{ds}^2 - i_{qs}^2) - \left(i_{ds} \cdot \frac{d\psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \cdot \frac{d\psi_{qs}}{dt} \right) + \frac{d\theta_r}{dt} (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \right] \quad (III.24)$$

Ou :

$$\frac{3}{2} \cdot R_s \cdot (i_{ds}^2 - i_{qs}^2) \quad (III.25)$$

Représente la puissance dissipée par effet Joule.

$$\frac{3}{2} \cdot \left(i_{ds} \cdot \frac{d\psi_{ds}}{dt} + i_{qs} \cdot \frac{d\psi_{qs}}{dt} \right) \quad (III.26)$$

La variation de l'énergie emmagasinée dans les enroulements du stator.

$$\frac{3}{2} \cdot \frac{d\theta_r}{dt} \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (III.27)$$

La puissance électromagnétique.

Sachant que $p = C_{em} \cdot \omega$ et $\omega = p \cdot O$ (O = vitesse mécanique) alors :

$$C_m = \frac{3}{2} \cdot p \cdot (\psi_{ds} \cdot i_{qs} - \psi_{qs} \cdot i_{ds}) \quad (III.28)$$

Et après l'affectation des valeurs de flux on aura

$$C_{em} = \frac{3}{2} \cdot p \cdot [(L_d - L_q) \cdot i_{ds} \cdot i_{qs} + i_{qs} \cdot \psi_f] \quad (III.29)$$

- *Equations mécaniques :*

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

$$C_m - C_m - f\Omega = J \frac{d\Omega}{dt} \quad (III.30)$$

Tel que:

- C_m : couple moteur.
- Ωf : couple de frottements visqueux. Ωf
- f : coefficient des frottements visqueux.
- J : moment d'inertie de la machine.

III.2.3 Modélisation du générateur diesel

Comme indiqué au le chapitre II, le GD est en général constitué d'un MD et d'un GS. 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 (Figure III.18).

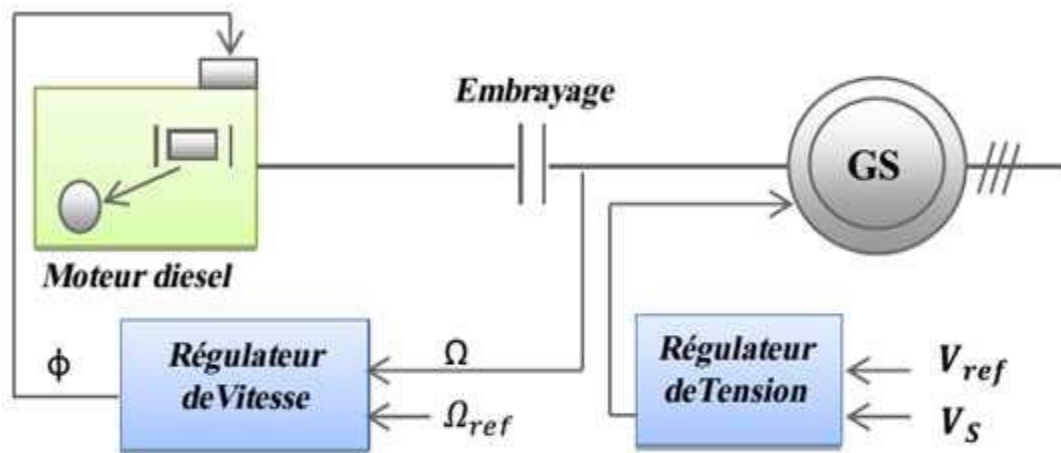


Figure III.18 Modèle simplifié du générateur diesel.

Où

V_{ref} : Tension de référence.

V_S : Tension du réseau.

Ω_{ref} : Vitesse de rotation de référence.

Ω : Vitesse de rotation du rotor synchrone.

ϕ : Débit du carburant.

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

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

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

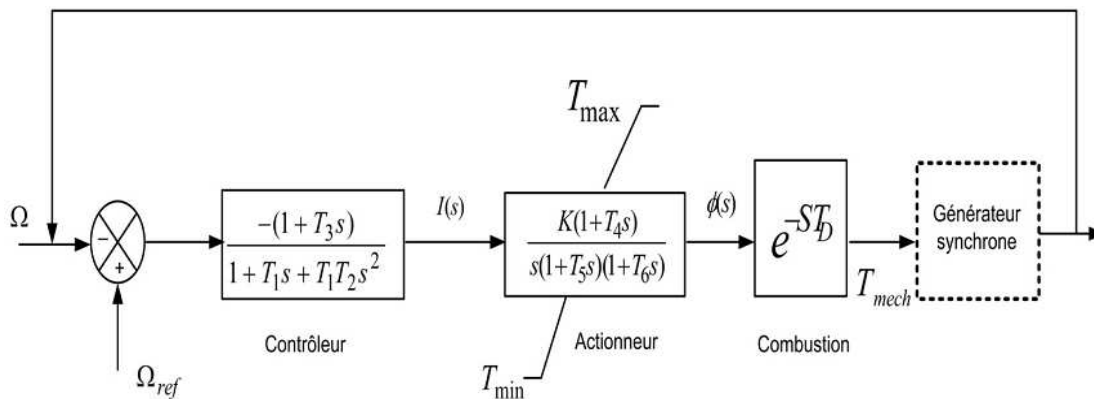


Figure III.19 Bloc diagramme d'un moteur diesel simplifié.

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

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 est le résultat de la position de plusieurs cylindres qui ne sont pas acceptés la quantité de carburant à un instant donné. Le délai peut être exprimé comme étant le temps réel entre les arrivées consécutives des pistons au point d'injection plus approximativement un quart de tour du vilebrequin du couple produit par le moteur diesel.

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

$$T_{mech} = e^{-sT_D}\Phi(s) \quad (III.31)$$

La consommation horaire de carburant du générateur diesel $Cons(t)[l/h]$ peut être modélisée par la loi linéaire en fonction de la puissance de sortie requise par la charge[65] :

$$Cons(t) = \alpha_{GD} \cdot P_{GD}(t)_{gen} + \beta_{GD} \cdot P_{GD}(t)_{rat} \quad (III.32)$$

Où :

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

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

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

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

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

III.2.4 Batterie

Il existe dans la littérature une large variété de modèles de batterie [66] [67] [68]. Le plus souvent ces modèles représentent la batterie par un circuit électrique équivalent composé de résistances, de capacités et autres éléments de valeur fixe ou variant avec des paramètres tels que l'état de charge ou la température. Ces modèles sont utilisés pour déterminer l'état de charge ou pour prédire la durée de vie des batteries. La plupart des modèles sont constitués de deux parties, l'une décrivant le modèle de capacité et l'autre le modèle de tension de la batterie [69].

La capacité est une des caractéristiques les plus importantes d'une batterie. Cette capacité représente la quantité de courant qui peut être extraite d'une électrode via les "masses actives", c'est-à-dire l'électrolyte et les matériaux actifs des électrodes sur une décharge. Cette capacité

s'exprime en ampères-heures, Ah ($1\text{Ah} = 3600$ coulombs). En pratique, cette capacité dépend du courant, ainsi que de la température.

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

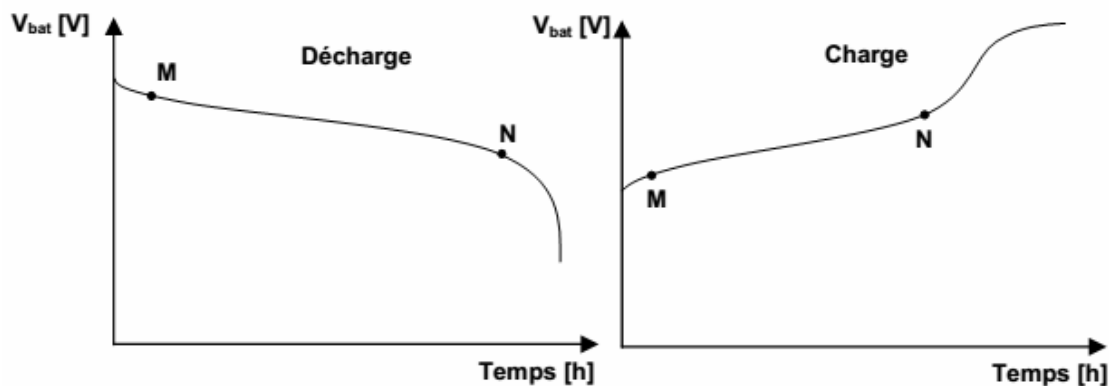


Figure III.20 Evolution de la tension avec le temps, durant la charge et la décharge

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

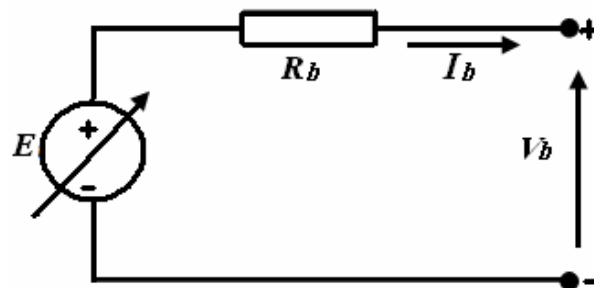


Figure III.21 Schéma électrique simplifié d'une batterie.

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

Donc le modèle mathématique est :

$$E = E_0 - \frac{V_p Q_b}{Q_b - \int i_b dt} + \tilde{A} \exp(-B_t \cdot \int i_b dt) \quad (\text{III.33})$$

Avec

E : Tension de batterie (V)

E0: Tension de constante de batterie (V)

Vp : Tension de polarisation (V)

Qb : Capacité de batterie (Ah)

III.2.5 Redresseur

III.2.5.1 définition :

Le redresseur est un convertisseur statique qui assure la conversion alternatif /continu, il est alimenté par une source de tension alternative, il permet de d'alimenter en continue le récepteur branché à sa sortie. On utilise les redresseurs chaque fois qu'on a besoin des sources continue sachant que l'énergie électrique est disponible en alternatif.

Les redresseurs ont un vaste domaine d'application mais malheureusement leur inconvénient majeur est l'envoi au réseau des courants non sinusoïdaux riches en harmonique.

III.2.5.2 Structure du redresseur :

La structure à étudier est le redresseur triphasé en pont avec l'indice de pulsation égal à six, son schéma est illustré dans la figure (1.2). Le pont redresseur étant alimenté par une source triphasée.

Les tensions simples d'un signale triphasés équilibrées directs sont :

$$\begin{bmatrix} V_{S1} \\ V_{S2} \\ V_{S3} \end{bmatrix} = V_m \begin{bmatrix} \sin(\omega t) \\ \sin(\omega t - \frac{2\pi}{3}) \\ \sin(\omega t - \frac{4\pi}{3}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.34})$$

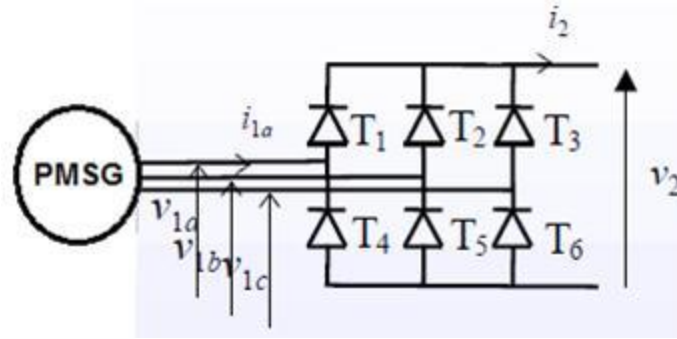


Figure III.22 Schéma électrique D'un redresseur triphasé non commandé

III.2.5.3 Etude de la tension de charge V_{ch} :

Deux diodes d'un même bras ne peuvent conduire simultanément. Lorsque D_1 conduit, l'une des deux diodes D_2 et D_3 conduit également. Il vient que D_1 conduit lorsque V_1 est plus positive que V_2 et V_3 , ou encore :

$$V_1 = \text{Max}(V_j) ; j = 1,2,3 \quad (\text{III.35})$$

Le même raisonnement conduit aux conditions suivantes :

$$D_i \text{ Conduit si } V_i = \text{Max}(V_j) ; j = 1,2,3 ; i = 1,2,3$$

$$D'_i \text{ Conduit si } V_i = \text{Min}(V_j) ; j = 1,2,3 ; i = 1,2,3$$

Pendant chaque séquence de conduction, la tension V_{ch} à la sortie du redresseur est :

$$V_{ch} = \text{Max}(V_j) - \text{Min}(V_j) ; j = 1,2,3$$

III.2.5.4 Etude des courants :

Chaque enroulement secondaire est connecté à deux diodes $D_i D'_i$; $i = 1,2,3$

Il est parcouru par (I_{ch}) pendant l'intervalle (T/q) où la diode du premier groupe conduit, et par (I_{ch}) pendant l'intervalle (T/q) où c'est celle du second groupe qui conduit.

Ainsi par exemple pour la première phase on donne :

$$I_{s1} = +I_{ch}, \text{ quand } D_1 \text{ conduit.}$$

$$I_{s1} = -I_{ch}, \text{ quand } D_1' \text{ conduit.}$$

$$I_{s1} = 0, \text{ quand } D_1, D_1' \text{ ne conduisent pas.}$$

Le courant continu i_R à la sortie du redresseur à diodes se traduit en courant alternatif i_G à son entrée dont la valeur efficace du fondamental s'écrit suivant la loi

$$I_{s1}(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4I_{ch}}{n\pi} \cos\left(\frac{n\pi}{6}\right) \cdot \sin(n \cdot \omega t) \quad (\text{III.36})$$

III.2.6 Modélisation de l'onduleur

L'onduleur est une diapositive de l'électronique de puissance. Ces caractéristiques guident les concepteurs au choix convenable des semi-conducteurs à employer et leurs commandes.

Les interrupteurs K_a et $K'a$; K_b et $K'b$; K_c et $K'c$ doivent être contrôlés de façon complémentaire.

Les tensions d'entrée de l'onduleur : entre les trois bornes a,b,c et le point milieu fictif de référence n_0 de la source continue sont : 23

a) Fonction de connexion :

Soit: $i = 1, 2, 3$ et $j = 1, 2$

On associe à chaque interrupteur une fonction f_{ij} dite de connexion telle que f_{ij} peut prendre deux valeurs 0 et 1.

Elle est égale à 1 si l'interrupteur est fermé et à 0 si il est ouvert d'où on peut écrire :

$$I_{ij} = f_{ij} \cdot I_c$$

$$V_{ij} = (1 - f_{ij}) \cdot V_{dc}$$

I_{ij} : Courant passant à l'interrupteur.

V_{ij} : La tension aux bornes de l'interrupteur

b) Fonction de conversion composée :

Soit V_{fab} , V_{fbc} , V_{fca} tels que :

$$\begin{cases} V_{fab} = V_{21} - V_{11} \\ V_{fbc} = V_{31} - V_{21} \\ V_{fca} = V_{11} - V_{31} \end{cases} \quad (\text{III.37})$$

D'après la fonction de connexion on peut écrire que :

$$\begin{cases} V_{11} = (1 - f_{11})V_{dc} \\ V_{21} = (1 - f_{21})V_{dc} \end{cases} \quad (\text{III.38})$$

On peut ainsi démontrer que :

$$V_{fab} = (1 - f_{21})V_{dc} - [(1 - f_{11})V_{dc}] = V_{dc}(f_{11} - f_{21}) \quad (\text{III.39})$$

$$\begin{cases} V_{fab} = (f_{11} - f_{21}) \cdot V_{dc} \\ V_{fbc} = (f_{21} - f_{31}) \cdot V_{dc} \\ V_{fca} = (f_{31} - f_{11}) \cdot V_{dc} \end{cases} \quad (\text{III.40})$$

On tire notre matrice :

$$\begin{bmatrix} V_{fab} \\ V_{fbc} \\ V_{fca} \end{bmatrix} = V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{III.41})$$

Les fonctions de conversion composée sont donc :

$$\begin{bmatrix} f_{ab} \\ f_{bc} \\ f_{ca} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{11} & - & f_{21} \\ f_{21} & - & f_{31} \\ f_{31} & - & f_{11} \end{bmatrix} ; \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{III.42})$$

L'hypothèse est que les tensions simples V_{fa} , V_{fb} , V_{fc} forment un système triphasé équilibré

$$\begin{cases} V_{fa} = V_{fab} - V_{fca} \\ V_{fb} = V_{fbc} - V_{fab} \\ V_{fc} = V_{fca} - V_{fbc} \end{cases} \quad (\text{III.43})$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ab} \\ f_{bc} \\ f_{ca} \end{bmatrix} \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \quad (\text{III.44})$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_{fab} \\ V_{fbc} \\ V_{fca} \end{bmatrix} \quad (\text{III.45})$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -1 \\ -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 \end{bmatrix} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 \\ -1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} \quad (\text{III.46})$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot V_{dc} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} f_{11} \\ f_{21} \\ f_{31} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.47})$$

$$\begin{bmatrix} V_{fa} \\ V_{fb} \\ V_{fc} \end{bmatrix} = V_{dc} \cdot \begin{bmatrix} f_a \\ f_b \\ f_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.48})$$

c) *Fonctions de conversions simples :*

$$\begin{cases} f_a = \frac{1}{3} [2f_{11} - f_{21} - f_{31}] \\ f_b = \frac{1}{3} [-f_{11} + 2f_{21} - f_{31}] \\ f_c = \frac{1}{3} [-f_{11} - f_{21} + 2f_{31}] \end{cases} \quad (\text{III.49})$$

III.3 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons discuté la chaîne de conversion proposée afin de comprendre le principe de fonctionnement ; puis on donne le modèle mathématique de chaque élément composant cette chaîne, commençant par la turbine jusqu'au raccordement au réseau électrique.

*Chapitre IV : Simulation et
interprétation des résultats
obtenus*

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre, on présente la simulation utilisant le logiciel Simulink/Matlab des Différentes parties de la chaîne de conversion et le système global.

Ce logiciel a transformé les équations qui constituent le modèle du processus à étudier en schémas bloc.

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

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

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

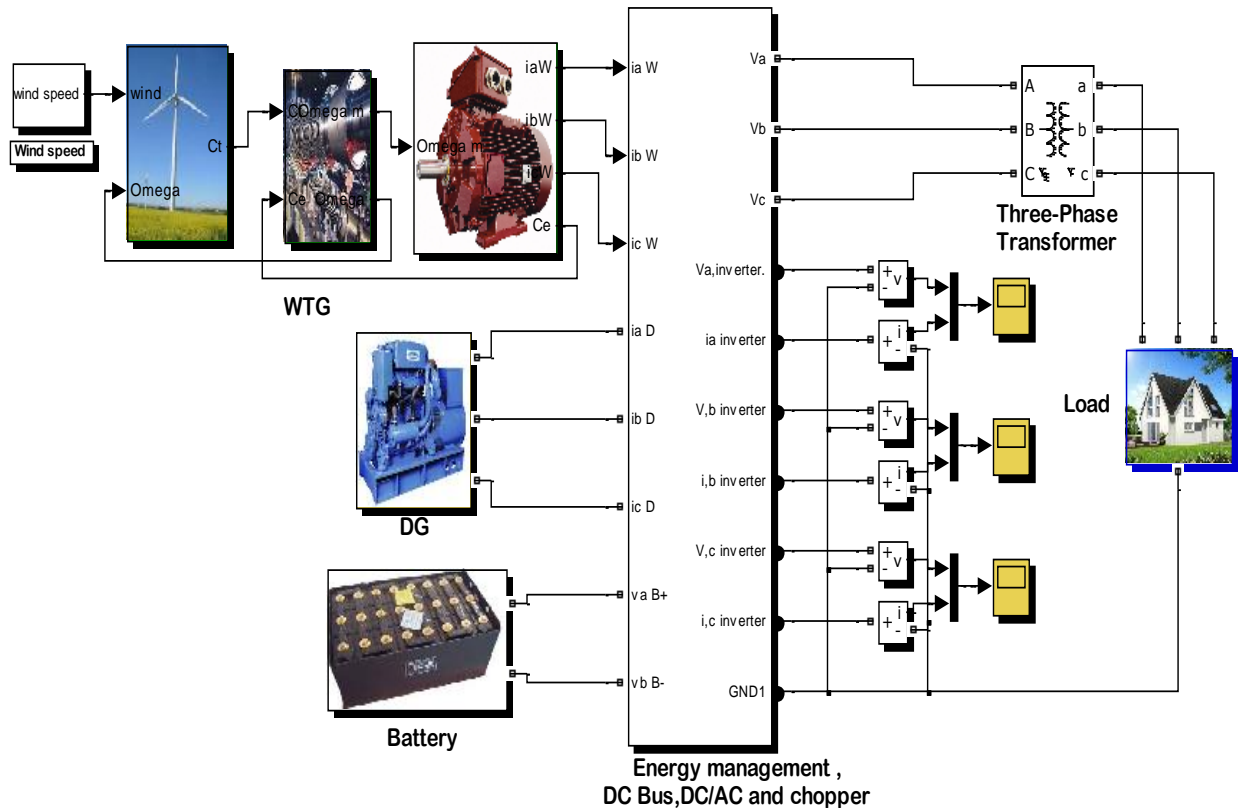


Figure IV.1 Schéma global du système.

La stratégie de gestion de l'énergie utilisée dans cette étude est conforme à l'organigramme représenté sur la Figure IV.2 ce qui permet au système de supervision de décider combien et quelles sources il faut mettre en marche et comment utiliser le stockage si c'est disponible [70], [71].

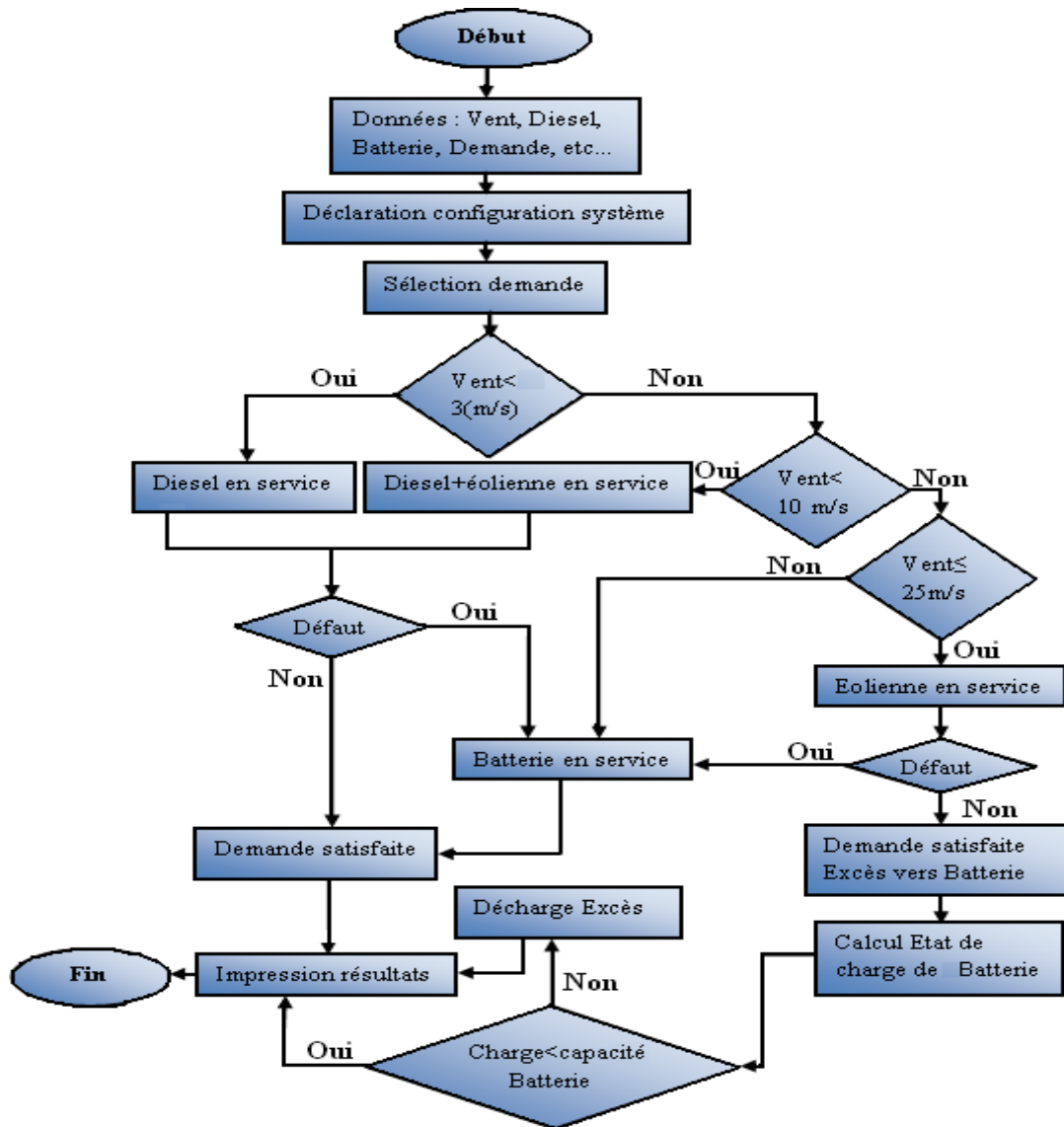


Figure IV.2 Organigramme de la méthode de simulation.

IV.2 Simulation du vent et de la turbine

IV.2.1 le vent :

- Bloc de simulation du vent :

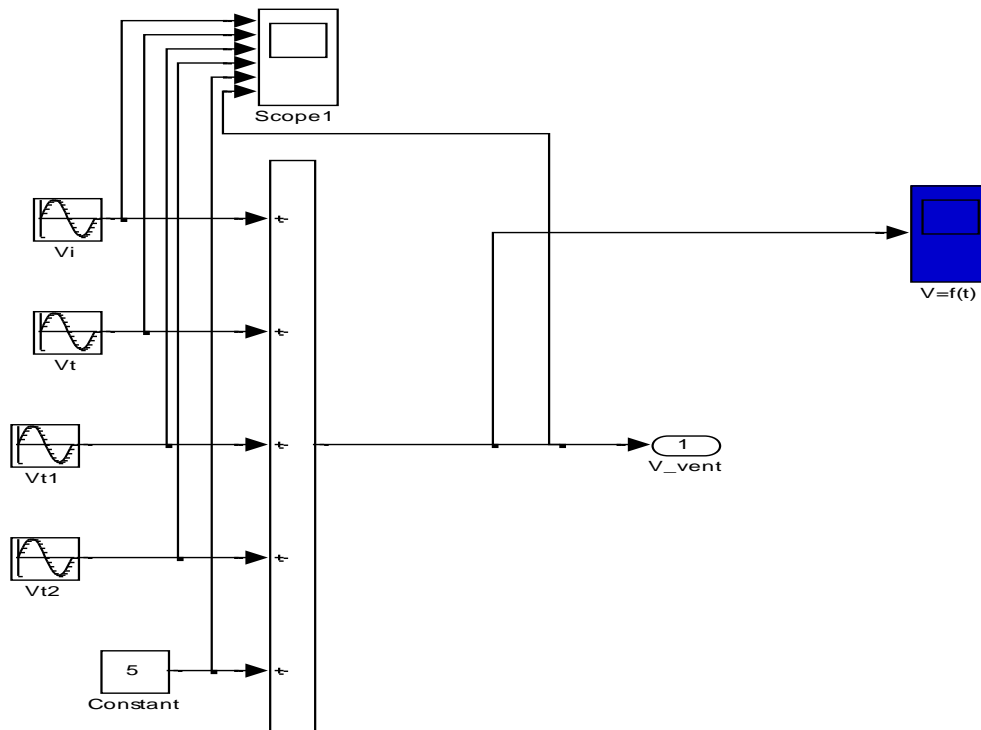


Figure IV.3 Bloc de simulation de la vitesse du vent.

- Résultat de la simulation du vent :

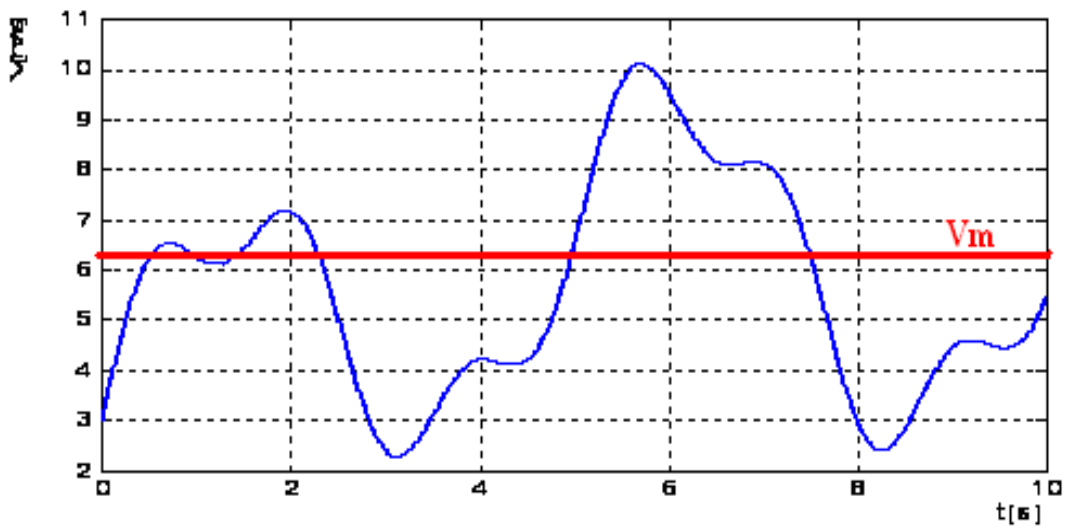


Figure IV.4 évolution de la vitesse du vent dans le temps .

La figure IV.4 montre la variation de la vitesse du vent dans un temps de (10s) avec une vitesse moyenne $V_m = 6.3(m/s)$ façon aléatoire ce qui reflète un vent réel [72].

IV.2.2 la turbine:

- **Bloc de simulation de la turbine éolienne :**

Pour la simulation de la turbine il suffit d'implanter le modèle mathématique de la turbine sous l'environnement Matlab/Simulink.

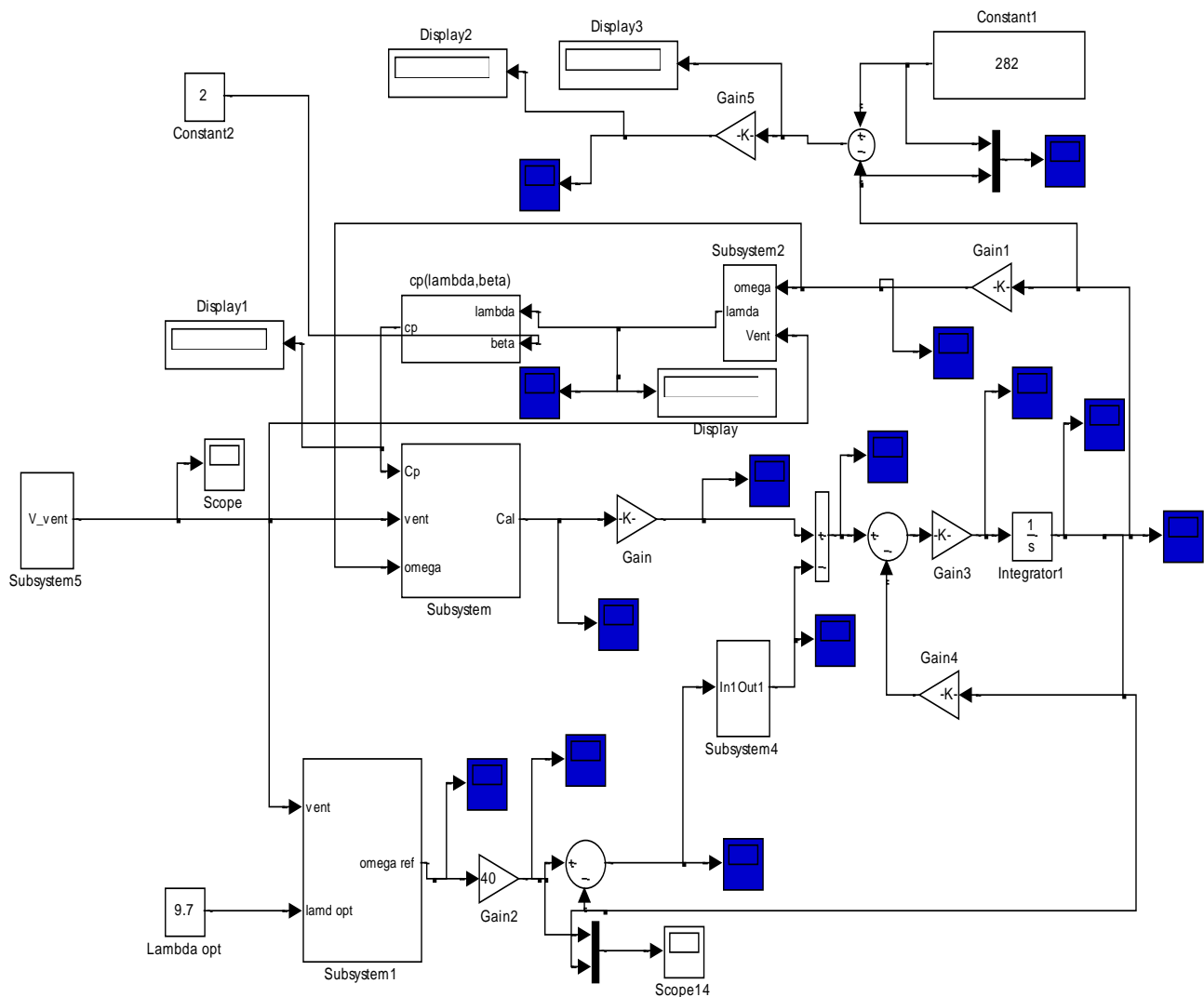


Figure IV.5 bloc de simulation de la turbine éolienne

IV.3 Analyse énergétique

Pour simuler le système, nous avons réalisé le schéma de simulation de la (Figure IV.5) sous le logiciel Matlab-Simulink 7.8 pour l'alimentation d'une charge (AC) pour un régime de basse tension sachant qu'au début nous utilisons l'éolienne seule pour alimenter cette charge avec une vitesse de vent bien contrôlée. Après nous utilisons le groupe diesel seul pour la même charge sachant que La synchronisation sera établie entre les deux sources d'énergies à $t=1.2s$ avec une vitesse du vent variant de 3 à 10 (m/s) .

➤ **L'éolienne seule en service ($10 \leq V_m < 17$)m/s :**

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

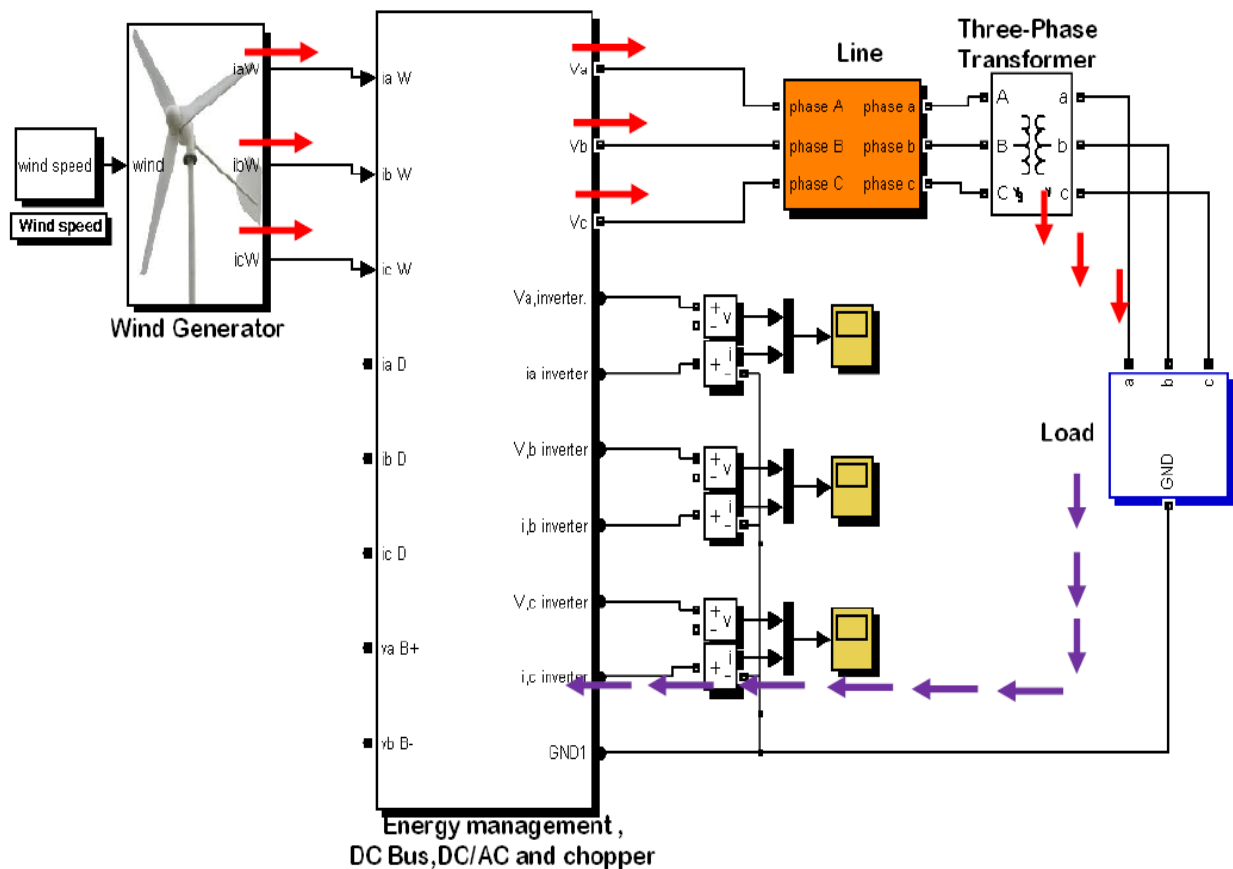


Figure IV.6 Schéma de simulation du système du éolien avec la charge.

Les formes d'ondes montrées dans la Figure IV.6 et la Figure IV.7 représentent les tensions simples v_{abc} (v) et les courants simples i_{abc} (A) générés par l'éolienne ou les courants sont d'environ $i = 4,8$ A et de tension 220v.

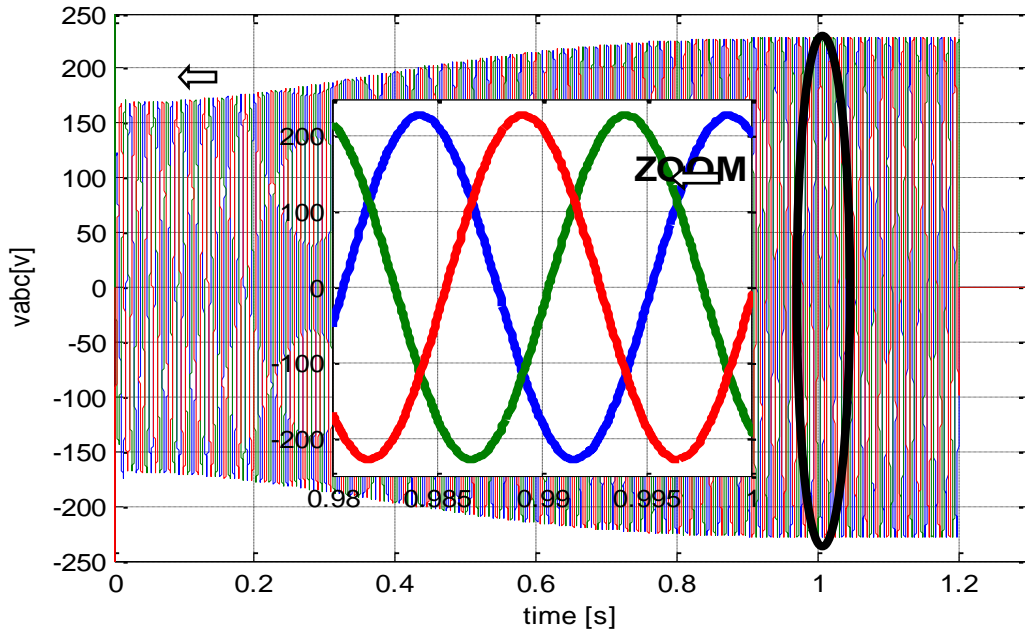


Figure IV.7 L'évolution des tensions statoriques

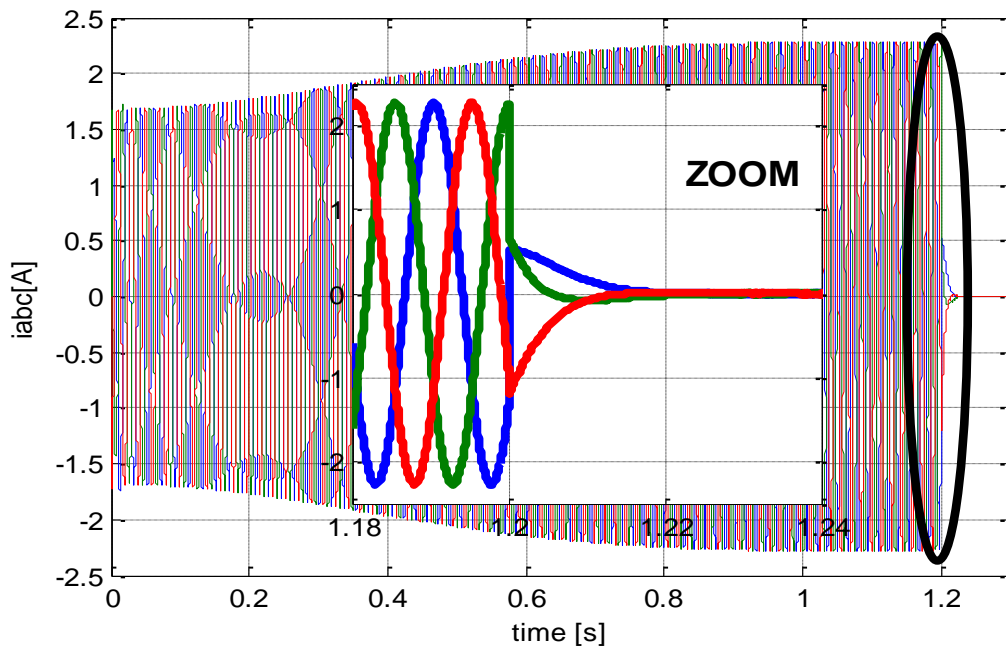


Figure IV.8 L'évolution des courants statoriques.

Le résultat de simulation montré à la Figure IV.8 démontre que l'éolienne est capable de fournir l'énergie demandée par la charge en présence de vent fort ($V_m > 10m/s$).

Dans ce cas la batterie a absorbé le surplus de puissance fournie par l'éolienne pour le stockage [72].

➤ **générateur diesel ($V_m < 3 m/s$):**

Le modèle du GD est donné à la Figure IV.9 ; il est validé par simulation pour s'assurer du bon fonctionnement du régulateur de tension et de vitesse.

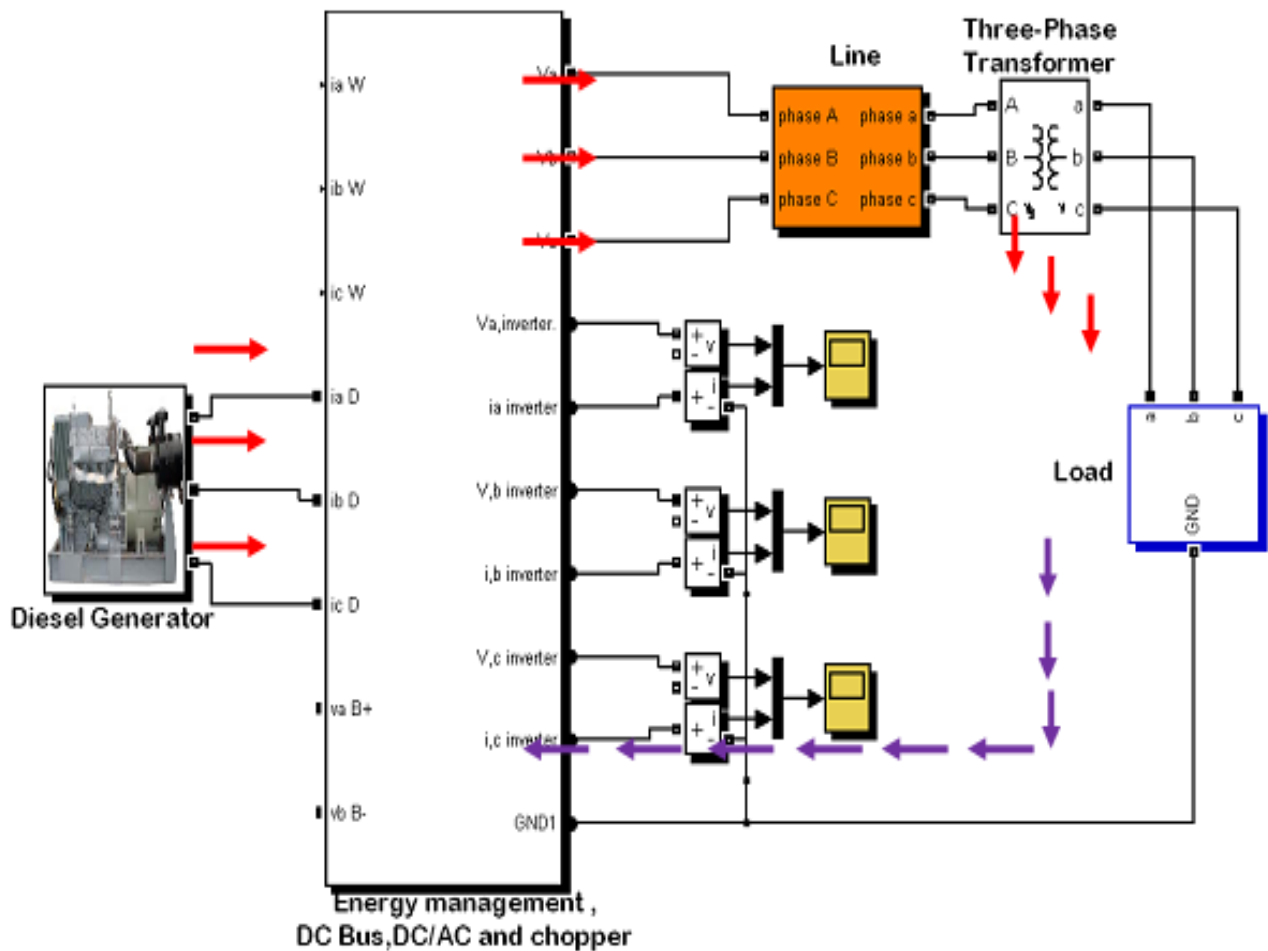


Figure IV.9 Schéma de simulation du système du générateur diesel avec la charge.

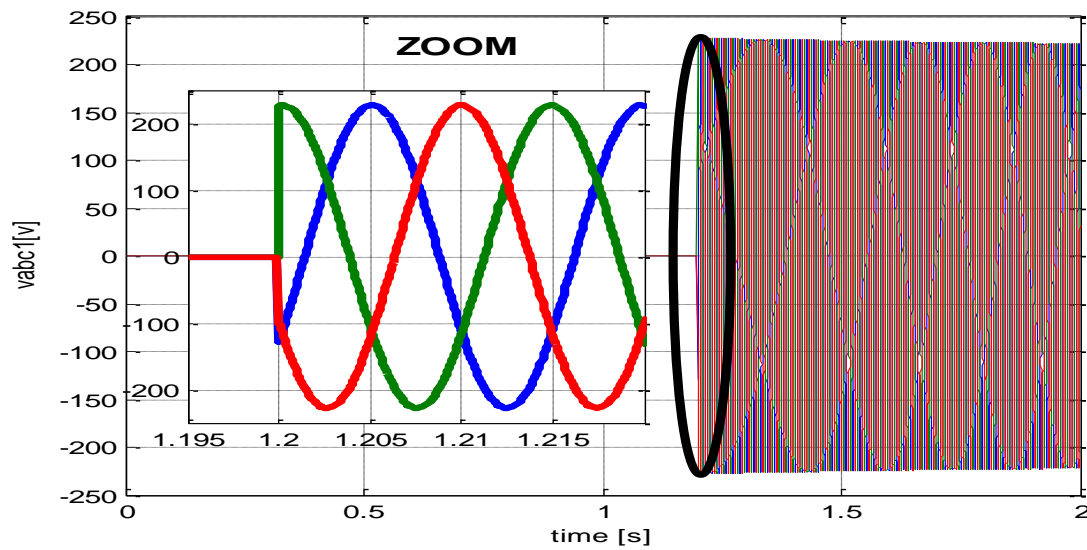


Figure IV.10 L'évolution des tensions statoriques.

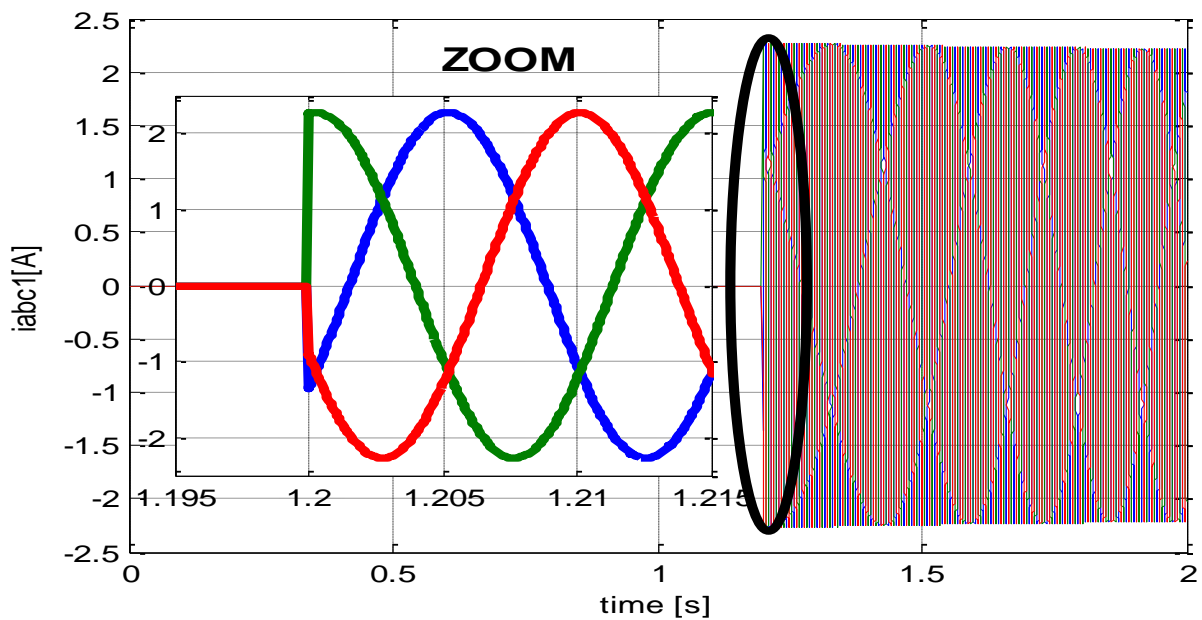


Figure IV.11 L'évolution des courants statoriques.

Les formes d'ondes montrées dans la Figure IV.10 et la Figure IV.11 représentent l'évolution des tensions simples statoriques V_{abc} (V) et l'évolution des tensions simples statoriques i_{abc} (A) respectivement générées par le groupe diesel.

➤ Eolienne/Diesel en service ($3 \geq V_m > 10$)m/s :

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

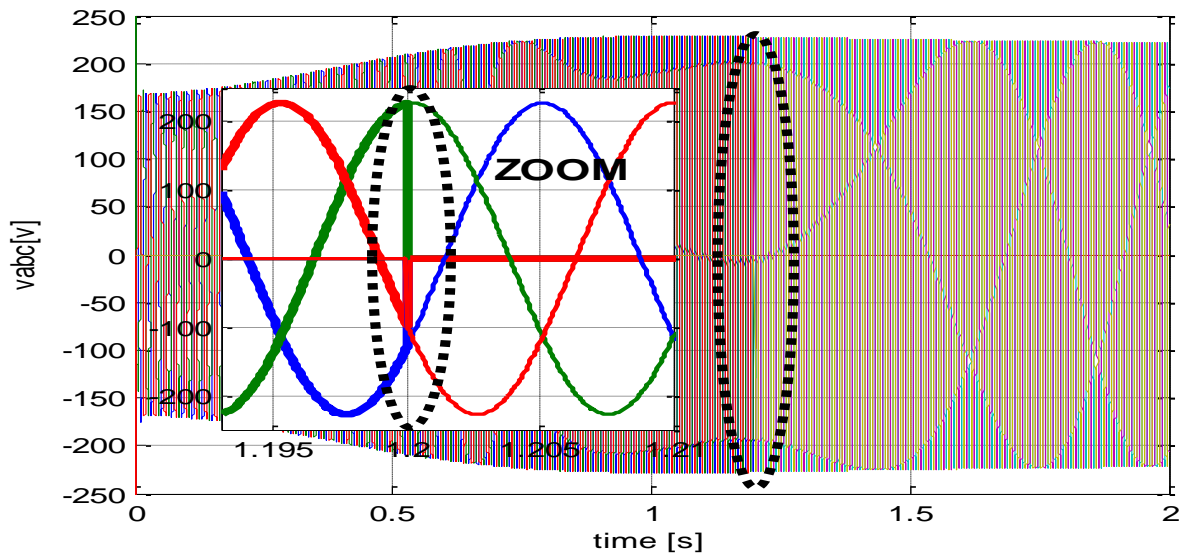


Figure IV.12 Courants produits par (Eolienne/Diesel).

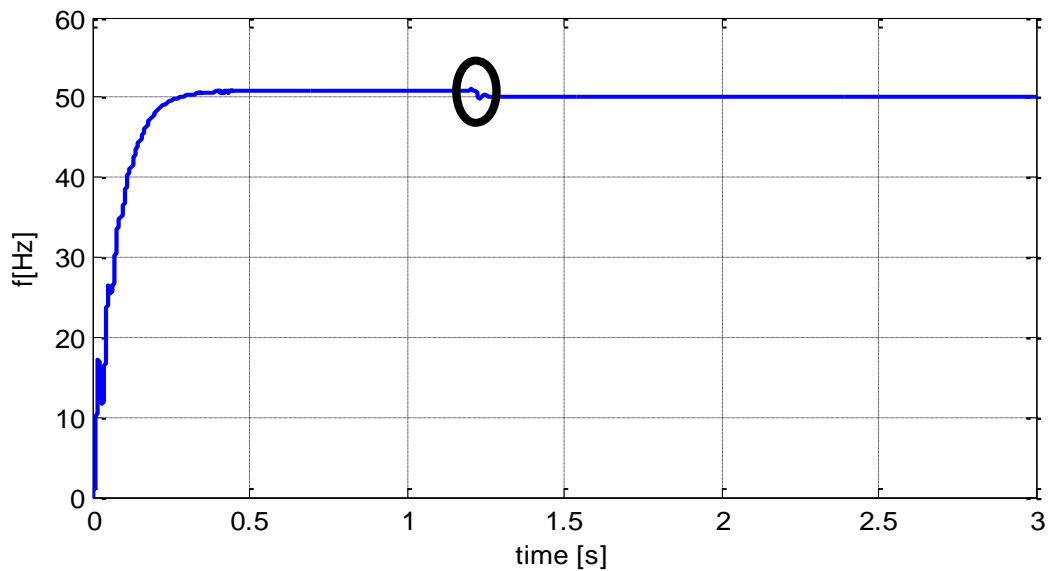


Figure IV.13 Aperçu de La fréquence

Le résultat de simulation montré dans les Figures IV.12 et IV.13 prouve le bon fonctionnement du système. La tension est parfaitement régulée et maintenue constante à l'aide du convertisseur de puissance.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une méthode de dimensionnement optimal d'un système hybride de production d'électricité (éolien - diesel) totalement autonome. Pour une charge et une probabilité de perte d'énergie données.

A partir de ces données indispensables, on a dimensionné le générateur éolien et le groupe électrogène qui convient à notre installation.

Notre choix s'est porté sur un dispositif de stockage d'énergie par batteries. La simulation numérique de tout le système hybride montre l'efficacité et la fiabilité de ce dispositif.

Les résultats obtenus ont montrés que la charge est alimentée sans interruption, la tension d'alimentation reste constante durant tous les modes de fonctionnement.

Conclusion générale

Dans ce travail nous avons analysé l'intégration d'un système hybride avec un système de stockage situé dans un site isolé. Le système hybride comprend une éolienne à vitesse variable contrôlée par la commande MPPT (Maximum Power Point Tracking), un groupe électrogène diesel et une batterie électrochimique comme système de stockage. La simulation de la gestion de ce système a été appliquée au site d'Adrar où les données météorologiques (vitesse du vent, température, relief) sont disponibles.

Selon les résultats obtenus, la gestion nous a permis d'obtenir un gain technico-économique en carburant, une longévité du groupe électrogène, une assurance en continuité de service et l'élimination d'une partie des gaz à effet de serre lors du fonctionnement en éolien.

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

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

[1] : BOYETTE, Armand. Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne. 2006. Thèse de doctorat. Université Henri Poincaré-Nancy I.

[2] : https://www.sciencesetavenir.fr/nature-environnement/le-renouvelable-seconde-source-deelectricite-en-2016_10537

[3] : J. Royer, T. Djiako , E. Schiller et B. Sadasy « Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens » sous la direction de ARIC SCHILLER, université d'OTTAWA, 1998.

[4] : D. Madet « Hydraulique et géothermie : principe physique et modalité d'utilisation » école d'été de physique, 2001.

[5] www.wikipedia.com.

[6] : A. Boutiba « Accélération du durcissement par énergie renouvelable du béton frais et caractérisation du béton durci » mémoire de magister, université de boumerdés.

[7] : A. Mirecki « Etude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance » thèse de doctorat de l'institut nationale polytechniques de Toulouse, France, 2005.

[8] : <https://www.evwind.es/tags/world-wind-energy-association>.

[9] :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

[10] : Technique de l'ingénieur BM 4640.

[11] : H. Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable", Thèse de doctorat, 18 décembre 2003, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux.

[12] : L. Chang, "Systèmes de conversion de l'énergie éolienne", IEEE Canadian Review, Summer/Été 2002, PP. 1-5.

[13] : HOUASNIA ADEL « Stratégie de gestion multi énergie dans un système Hybride Eolien - Diesel-Dispositif de stockage » Université du Québec à Trois-Rivières, 2007.

[14] : Majid ZANDI. Contribution au pilotage des sources hybrides d'énergie électrique. 2010. Thèse de doctorat. Vandoeuvre- les- Nancy, INPL.

[15] : Baring-Gould, E. I., Flowers, L., Lundsager, P., Mott, L., Shirazi, M., & Zimmerman, J. (2003, June). Worldwide status of wind/diesel applications. In Proceedings of the 2003 AWEA Conference, Austin, TX (No. 0.2, pp. 0-4).

[16] : Weis, T. M., et A. Ilinca. 2008. « The utility of energy storage to improve the economics of wind-diesel power plants in Canada ». Renewable Energy, vol. 33, no7, p. 1544-57.

[17] : VALENCIAGA, Fernando et PULESTON, Paul F. Supervisor control for a stand-alone hybrid generation system using wind and photovoltaic energy. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2005, vol. 20, no 2, p. 398-405.

[18] : AGBOSSOU, Kodjo, KOLHE, Mohanlal, HAMELIN, Jean, et al. Performance of a stand-alone renewable energy system based on energy storage as hydrogen. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2004, vol. 19, no 3, p. 633-640.

[19] : D.B. Nelson, M.H. Nehrir, C.Wang "Unit Sizing and Cost Analysis of Stand Alone Hybrid Wind/PV/Fuel Cell Power Generation Systems" Renewable Energy, August 2005

[20] : KHAN, M. J. et IQBAL, M. T. Dynamic modeling and simulation of a small wind-fuel cell hybrid energy system. Renewable energy, 2005, vol. 30, no 3, p. 421-439.

[21] : T. Senjyu, T. Nakaji, K. Uezato, T. Funabashi "A Hybrid Power System Using Alternative Energy Facilities in Isolated Island" IEEE Transactions on Energy Conversion, June 2005.

[22] : Abdelkader Gould Mahmoud « Caractérisation, modélisation, fonctionnement et impact d'un système hybride pour alimentation de charges mixtes » Thèse de doctorat Université de Nouakchott 2008.

[23] : L'abbé, "L'hydrogène électrolytique comme Moyen de Stockage d'électricité Pour Systèmes Photovoltaïques Isoles», Thèse de Doctorat, l'Ecole des Mines de Paris, pp. 5-17-18-21-50-68-69, 21 décembre 2006.

[24] : M. Huart, "Guide des énergies renouvelables", Association pour la Promotion des Energies Renouvelables, Ministère de la Région Wallonne éditeur, 1994.

[25] : J. Muller, R. Desserrières, "Conversion photovoltaïque", Publié par : Club CRIN, 2002.

[26] : C. Alonso, J. Alzeu, C. Andrieu, S. Astier, J. Bonal, A. H. Ben, C. Combes, F. Costa, B. Dakyo, R. Desserrières, J. Fonio, O. Gergaud, C. Glazie, J-C. Muller, B. Multon, C. Nichita, X. Roboam, P. Rossetti, "L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables", ECRIN, ISBN : 2-912154-08-1, Paris, 2002.

[27] : F. Benyarou "Conception assistée par ordinateur des systèmes photovoltaïques modélisation, dimensionnement et simulation ", Thèse de Doctorat d'état. Université de Tlemcen Juillet 2004.

[28] : A. ABDELLI, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive", Thèse de Doctorat, L'institut National Polytechnique De Toulouse, p 9-13, 15 octobre 2007.

[29] : P. Lundsager, H. Bindner, N. Clausen, S. Frandsen, L. H. Hansen, J. C. Hansen, "Isolated systems with wind power", Risø-R-1256(EN), 2001.

[30] : «La première pile à combustible installée en France», Isabelle Duffaure-Gallais, CSTB Magazine, 1999.

[31] : I. Kamwa, B. Saulier, "Modélisation, simulation et régulation d'un réseau éolien/diesel autonome", Rapport N°IREQ4340, Varennes, Canada, 1989.

[32] : Michel Vandenberg, "Systèmes hybrides PV/Diesel pour l'électrification rurale" Institut für Solare Energieversorgungstechnik (ISET) e. V. Königstor 59 D-34119 Kassel (Germany).

[33] : I. Cruz, F. Arias, F. Avia, L. M. Arribas, R. P. Fiffe, "Assessment of different energy storage systems for wind energy integration", European Wind Energy Conference 2001.

[34] : «Association canadienne de l'énergie éolienne », <http://www.smallwindenergy.ca> .

[35] : Miloud REZKALLAH. Amélioration de la qualité d'énergie fournie au réseau autonome hybride éolien-diesel. 2010. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure.

[36] : FADAEINEDJAD, Roohollah, MOSCHOPOULOS, Gerry, et MOALLEM, Mehrdad. The impact of tower shadow, yaw error, and wind shears on power quality in a wind-diesel system. Energy Conversion, IEEE Transactions on, 2009, vol. 24, no 1, p. 102-111.

[37] Ensalem R., « Climatologie Générale », Ed. ENP, Alger 1989.

[38] : Désiré Le GOURIERE, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982

[39] : Frédéric POITIERS, Etude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'utilisation de l'Energie Eolienne, Machine asynchrone à cage autonome ; Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau, Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, 2003.

[40] : STOYANOV, Ludmil. Etude de différentes structures de systèmes hybrides à sources d'énergie renouvelables. 2011. Thèse de doctorat. Université Pascal Paoli.

[41] : KHALED FERKOUS "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne.", Mémoire de Magister, Université M'entourai Constantine (2009).

[42] : F. POITIERS «Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne-Machine asynchrone à cage autonome-Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau» Thèse de Doctorat Université de Nantes, 2003.

[43] : TIR ZOHEIR «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade» mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.

[44] : Kasbadji Merzouk N. et H. Daaou, «Atlas Energétique Eolien de l'Algérie ». SIPE5, Béchar, 2000

[45] : O. De Vries, "On the theory of the horizontal axis wind turbine", Ann. Rev. Fluid. Mech. 1983, 15, pp. 77-96.

[46] : METATLA SAMIR «Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base d'une MADA » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique d'Alger, 2009.

[47] : Désiré Le GOURIERE, Energie éolienne, Théorie, Conception et calcul pratique des installations, édition Eyrolles, 1982.

[48] : Thomas Ackermann, Wind Power in Power systems, Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 2005.

[49] : <http://www.windpower.org/fr/core.html>

[50] : A. Davigny « Participation aux services système de fermes d'éolienne à vitesse variable intégrant du stockage inertiel d'énergie », Thèse de doctorat, Université des Sciences et Technologies de Lille, Lille, France, 2007.

[51] : 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 Supérieur d'Arts et Métiers, Centre de Bordeaux, France, 2003.

[52] : L. Chang « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne », IEEE Canadian Review-summer / Eté 2002, pp. 1-5.

[53] : F. Poitiers « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne : Machine asynchrone à cage autonome, Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau », Thèse de doctorat, Université de Nantes, France, 2003.

[54] : A. MIRECKI «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat, INPT de France, 2005.

[57]. A. MIRECKI, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," Thèse de Doctorat, Institut national Polytechnique, Toulouse, 2005.

[58]. Bouaraki Mouloud, « Etude d'un entraînement à double alimentation pour turbine éolienne à vitesse variable : Application sur un site à TINDOUF », thèse de magistère, Université M'hamedbougara-boumerdes, 2012.

[59]. N. abu-tabak. « Stabilité dynamique des systèmes électriques multimachines : modélisation, commande, observation et simulation». Thèse de Doctorat, École Centrale de Lyon 2008.

[60] Salma EL AIMANI
« *Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension* » Thèse de Doctorat de l' Ecole Centrale de Lille,
Soutenue le 06 Décembre 2004.

[61] Adam MIRECKI,
« *Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance* » Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse.

Soutenue le 5 avril 2005.

[62] M. Kant, « Actionneurs à collecteur à aimant permanent », Techniques de l'Ingénieur,

traité Génie électrique D 3 695.

[63] G. Grellet, G. Clerc, « Actionneurs électriques », Editions Eyrolles, Paris, France, 1997.

[64] S. El aimani, « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat de l'Ecole Centrale de Lille (ECL) Cohabilitation avec L'université Des sciences et technologies de Lille 1 (USTL) Spécialité : Génie électrique - Electronique - Automatique, 06 décembre 2004.

[65] 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.

[66] F. Delfosse, "Détermination de l'Etat de Charge des Batteries d'un Véhicule Electrique",

Travail de fin d'études, Université de Liège, 1998.

[67] M. Thele, S. Buller, D. U. Sauer, R. W. De Doncker, E. Karden, "Hybrid Modelling of Lead-Acid Batteries in Frequency and Time Domain", Journal of Power Sources, Vol. 144, Pages 461-466, 2005.

[68] A. Jossen, J. Garche, H. Doering, M. Goetz, W. Knaupp, L. Joerissen, "Hybrid systems with lead-acid battery and proton-exchange membrane fuel cell", Journal of Power Sources, Vol. 144, pp. 395-401, 2005.

[69] A. D. Hansen, P. Sørensen, L. H. Hansen, H. Bindner, "Models for Stand-Alone PV System", Risø-R-1219(EN)/SEC-R-12, 2000.

.....

[70] C.D. Barley and C.B. Winn, "Optimal dispatch strategy in remote hybrid power

systems”, Solar Energy ,Vol. 58,(1996) No.4-6,pp 284-289.

[71] 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.

[72] Harris, R. I. 2008. « The macrometeorological spectrum-a preliminary study ». Journalof Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, vol. 96, no12, p. 2294-2307.