

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

## Université de Ghardaïa



Faculté des Sciences et Technologies  
Département d'automatique et électromécanique

N° d'ordre :  
N° de série

Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de

## MASTER

**Domaine:** Sciences et Technologies

**Filière:** Électromécanique

**Spécialité:** Maintenance industrielle

**Présenté Par:**

Mr BOUCHENE Nadir

Mr CHIHANI Abdelhakim

## Thème

**Réalisation d'une éolienne avec un system de stockage**

**Soutenu publiquement le 24/06/2019**

**Devant le jury :**

<b>Dr.AKERMI Fouzi</b>	MAA	Université de Ghardaïa	<b>Président</b>
<b>Dr.MEDOUKALI Hemza</b>	MCB	Université de Ghardaïa	<b>Examineur</b>
<b>Dr.KHATTARA Abdelouahab</b>	MCB	Université de Ghardaïa	<b>Encadreur</b>

**Année universitaire 2018/2019**

# Remerciements

---

## Remerciement

**بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ وَالصَّلَاةِ وَالسَّلَامِ عَلَى أَشْرَفِ خَلْقِ اللَّهِ مُحَمَّدِ بْنِ عَبْدِ اللَّهِ صَلَّى اللَّهُ عَلَيْهِ وَسَلَّمَ**

Ce mémoire de Master est le résultat d'un travail des études et réalisation de noter projeté au plusieurs mois

En préambule nous voudrions reconnaître le mérite de nos parents qui ont contribué à ce que nous sommes maintenant.

Et nous souhaite adresser nos remerciements à toutes personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de cet ouvrage.

Nous remercions tout d'abord Noter encadreur, promoteur de ce mémoire qui a donné des idées alimentés réflexions.

Nos remerciements iront également aux membres du jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail de recherche.

Sans oublier tous nos enseignants qui nous ont assurés des études de haut niveau et qui nous permis d'acquérir des connaissances

# Résumé

---

## Résumé

La demande énergétique mondiale en constante augmentation, l'instabilité et l'incertitude du prix des énergies fossiles, la libéralisation du marché électrique et une conscience environnementale renforcée durant ces dernières années ont renouvelé l'intérêt du développement des énergies renouvelables. Parmi elles, l'énergie éolienne détient une situation privilégiée grâce à son progrès technologique et à ses coûts associés comparativement faibles, Le recours à l'énergie éolienne est primordial dans le cadre de la production de l'énergie électrique. La mise en place de ce système de production nécessite en partie un choix judicieux du site d'implantation des dispositifs composant ce système. Ce choix se base sur la complexité et la multitude d'hypothèses proposées. Dans ce contexte, l'apport envisagé avec ce travail est de collaborer à la conception optimale d'un système de production éolien isolé de petite taille, pour les sites où l'extension du réseau est difficile ou trop coûteuse Ce document présente l'étude présentée un état de l'art sur les éoliennes, les différentes structures d'alimentation et le type de génératrices utilisées, et la réalisation d'une éolienne à axe verticale tripale. Qui pourra assurer la charge continue d'une batterie de stockage d'énergie électrique. Etant donné que les populations adoptent de plus en plus des sources d'énergies renouvelables suite au déficit énergétique qui réside actuellement à l'Algérie. Notre méthodologie consiste tout d'abord à étudier les différents types d'éoliennes et des génératrices qui existent. Pour stockage de l'énergie nous avons donné les différentes technologies des stockages notamment les batteries solaires. Un outil d'optimisation pour un système de génération éolien chargeur de batterie est proposé et validé. Le système de puissance est composé d'une quantité minimale d'éléments. De cette façon, la simplicité du système permet de réduire les efforts de maintenance et d'augmenter sa fiabilité à un coût minimal. Le fonctionnement du prototype réalisé doit être associé à un système de stockage et de traitement d'énergie électrique en vue d'optimiser l'alimentation électrique de l'utilisateur

## Mots clés

Énergie éolienne, Génératrice, Stockage, Turbines, Multiplicateur de vitesse

# Résumé

---

## Abstract

The world's energy demand is constantly increasing; instability and uncertainty in the price of fossil fuels, the liberalisation of the electricity market and a heightened environmental awareness in recent years have renewed the interest in the development of renewable energies. Among them, wind power has a privileged position thanks to its technological progress and its comparatively low associated costs, The use of wind energy is crucial in the production of electrical energy. The implementation of this production system requires in part a judicious choice of the location of the devices that make up this system. This choice is based on the complexity and the multitude of hypotheses proposed. In this context, the contribution envisaged in this work is to collaborate on the optimal design of a small-scale isolated wind power system for sites where grid expansion is difficult or too expensive. This document presents the state-of-the-art study on wind turbines, the different power structures and the type of generators used, and the construction of a vertical three axis wind turbine, which will be able to ensure the continuous charge of an electric energy storage battery. As people are increasingly adopting renewable energy sources as a result of the current energy deficit in Algeria. Our methodology is first of all to study the different types of wind turbines and generators that exist. For energy storage we have given deferential storage technologies such as solar batteries. An optimization tool for a wind generator system battery charger is offered and validated. The power system consists of a minimum number of elements. In this way, the simplicity of the system reduces maintenance effort and increases reliability at minimal cost. The operation of the prototype must be combined with an electrical energy storage and processing system in order to optimise the power supply to the users

## Key Words

Wind energy, Generator, Storage, Turbines, Speed multiplier

إن الطلب العالمي المتزايد باستمرار على الطاقة ، وعدم الاستقرار وعدم اليقين في أسعار الوقود الأحفوري ، وتحرير سوق الكهرباء وزيادة الوعي البيئي في السنوات الأخيرة ، جدد الاهتمام بتطوير الطاقات المتجددة. من بينها ، تعد طاقة الرياح في وضع متميز بفضل التقدم التكنولوجي والتكاليف المرتبطة بها المنخفضة نسبيًا ، كما أن استخدام طاقة الرياح ضروري في سياق إنتاج الطاقة الكهربائية. يتطلب تنفيذ نظام الإنتاج هذا جزئيًا اختيارًا حكيماً لموقع غرس الأجهزة التي يتكون منها هذا النظام. يعتمد هذا الاختيار على التعقيد وعدد الفرضيات المقترحة. وفي هذا السياق ، تتمثل المساهمة المتوخاة في هذا العمل في التعاون على التصميم الأمثل لنظام صغير لتوليد الرياح المعزول ، للمواقع التي يكون فيها توسيع الشبكة أمرًا صعبًا أو مكلفًا للغاية. تعرض هذه الوثيقة الدراسة التي قدمت حالة من الفن على توربينات الرياح ، هيكل إمدادات الطاقة المختلفة ونوع المولدات المستخدمة ، وتحقيق توربينات الرياح مع المحور الرأسي ثلاثة محاور. والتي يمكن أن تضمن الشحن المستمر لبطارية تخزين الطاقة الكهربائية. مع تزايد اعتماد الناس لمصادر الطاقة المتجددة نتيجة للعجز الحالي في الطاقة في الجزائر. منهجنا هو دراسة أنواع مختلفة من توربينات الرياح والمولدات الموجودة. لتخزين الطاقة قدمنا التقنيات المختلفة للتخزين وخاصة البطاريات الشمسية يتم اقتراح أداة تحسين لشاحن بطارية نظام مولد الرياح والتحقق من صحتها. يتكون نظام الطاقة من الحد الأدنى من العناصر. وبهذه الطريقة ، تعمل بساطة النظام على تقليل جهود الصيانة وزيادة الموثوقية بأقل تكلف. يجب أن يرتبط عمل النموذج الأولي المحقق بنظام تخزين ومعالجة الطاقة الكهربائية من أجل تحسين إمدادات الطاقة للمستخدمين.

### الكلمات المفتاحية

طاقة هوائية، مولد كهربائية، تخزين، توربينات، مضاعف السرعة

# Sommaire

---

## Table de matières

Table de matière.....	V
Lise des Figures et tableaux .....	ix

## Sommaire

Remerciement.....	i
Résumé .....	ii
Introduction Générale.....	1
1. Chapitre 1 Généralité sur l'énergie éolienne .....	
1.1. Introduction.....	3
1.2. Définition de l'énergie éolienne .....	3
1.3. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne .....	4
1.4. Gisement éolien .....	5
1.5. Vitesses moyennes saisonnière du vent .....	6
1.6. Énergie éolienne en quelques chiffres .....	8
1.6.1. La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne.....	8
1.6.2. Objectifs du programme des Energies Renouvelables en Algérie (2015-2020-2030) .....	8
1.6.3. Efficacité des éoliennes .....	10
1.6.4. Futurs challenges et perspectives mondiales.....	11
1.6.5. Coût de base de l'énergie éolienne.....	11
1.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	12
1.7.1. Avantages .....	12
1.7.2. Inconvénients .....	14
1.8. Conclusion .....	15
2. Chapier 2 Type et champ d'application des turbines éoliennes .....	

# Sommaire

---

2.1.	Introduction.....	16
2.2.	Types des turbines éoliennes .....	16
2.2.1.	Eolienne à axe vertical .....	16
2.2.1.1.	Avantages.....	17
2.2.1.2.	Inconvénients .....	17
2.2.2.	Eoliennes à axe horizontal .....	18
2.2.2.1.	Avantages.....	18
2.2.2.2.	Inconvénients .....	18
2.3.	Constitution d'une éolienne moderne .....	19
2.4.	Aplication des éolennes .....	20
2.5.	Théorie de Betz.....	21
2.6.	La valeur $C_p$ est propre à chaque type d'éolienne. ....	23
2.7.	Zones de fonctionnement de l'éolienne .....	24
2.8.	Etat de l'art sur les générateurs utilisés dans le SCE.....	25
2.8.1.	Génératrices synchrones(GS).....	25
2.8.2.	Génératrices asynchrones a double alimentation (GADA).....	26
2.8.3.	Génératrices asynchrones à cage (GAS).....	27
2.8.4.	Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP).....	29
2.8.5.	Redresseur à diodes et onduleur MLI .....	29
2.8.6.	Redresseur et onduleur MLI.....	29
2.9.	Types de Machines Electriques pour les Petites Eoliennes .....	29
2.10.	Conclusion : .....	31
3.	Chpiter 3 Stockage d'énergie. ....	
3.1.	. Introduction.....	32
3.2.	Systèmes de stockage.....	32
3.2.1.	Techniques de stockage à court terme .....	33
3.2.1.1.	Stockage d'énergie magnétique.....	33

# Sommaire

---

3.2.1.2.	Stockage par Condensateurs à double couche .....	34
3.2.1.3.	Stockage sous forme d'énergie cinétique .....	34
3.2.2.	Techniques de stockage à long terme.....	35
3.2.2.1.	Stockage sous forme gravitaire .....	35
3.2.2.2.	Stockage sous forme d'air comprimé (pression) .....	36
3.2.2.3.	Stockage sous forme thermique.....	36
3.2.2.4.	Stockage sous forme chimique.....	37
3.2.2.4.1.	Les Batteries .....	37
3.2.2.4.2.	Les piles à combustibles .....	39
3.3.	Principe du fonctionnement des Batteries .....	41
3.3.1.	Les différents types de Batteries .....	42
3.3.1.1.	- La Batterie au plomb.....	42
3.3.1.2.	La Batterie Nickel - Cadmium .....	44
3.3.1.3.	La Batterie Lithium-Ion (Li-Ion) .....	45
3.3.1.4.	La Batterie Nickel-NaCl .....	45
3.3.1.5.	La Batterie Nickel-Zinc.....	45
3.3.1.6.	La Batterie au plomb .....	47
3.3.1.6.1.	Historique .....	47
3.3.1.6.2.	Paramètres de la batterie au plomb.....	47
3.3.1.6.3.	Constitution .....	48
3.3.1.6.4.	Technologie .....	48
3.3.1.6.5.	Principe de fonctionnement.....	49
3.3.1.6.6.	Définir la capacité de stockage des batteries au plomb.....	51
3.3.1.6.7.	Détermination la tension de l'installation éolienne .....	51
3.4.	Grandeurs caractéristiques des Batteries .....	52
3.4.1.	Capacité de stockage .....	52
3.4.2.	Rendement.....	52

# Sommaire

---

3.4.2.1. Rendement faradique .....	52
3.4.2.2. Rendement énergétique .....	52
3.4.3. La durée du vie .....	52
3.5. Conclusion .....	53
4. Chapitre 4 Partie de Réalisation .....	
4.1. Introduction.....	54
4.2. Choix des matériaux .....	54
4.3. Réalisation des pales .....	54
4.3.1. La vitesse des pales .....	55
4.4. Le support .....	56
4.5. Le multiplicateur de vitesse .....	57
4.6. Les paliers à roulement .....	58
4.7. La génératrice (à aimant permanent) .....	58
4.8. Le Régulateur.....	59
4.9. Les batteries .....	60
4.10. Conclusion .....	60
Conclusion général .....	61
Référence.....	63

# Liste des figures et tableaux

---

## Liste des Figures

Figure 1 1 Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	4
Figure 1 2 Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol. (Eté et Printemps).....	6
Figure 1 3 Atlas vent saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol (Hiver et automne) . .....	7
Figure 1 4 Evolution de la puissance éolienne totale installée dans le monde 2001-2017.....	8
Figure 1 5 phases du programme algérien des énergies recevables 2015 à 2030 (objectifs cumulée par filière).....	9
Figure 1 6 objectif du programme algérien des Energies Renouvelables 22GW à l'horizon 2030 .....	9
Figure 1 7 L'énergie éolienne mondiale (MW).....	11
Figure 2 1 Technologie éolienne à axe vertical. ....	16
Figure 2 2 Technologie éolienne à axe horizontale .....	18
Figure 2 3 Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW .....	19
Figure 2 4 Schéma de principe de Théorie de Betz .....	22
Figure 2 5 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes .....	23
Figure 2 6 courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.....	24
Figure 2 7 System éolien basé sur la machine synchrone à vites variable .....	25
Figure 2 8 System éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation .....	26
Figure 2 9 Système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse constante .....	28
Figure 2 10 Système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse variable.....	28
Figure 3. 1 Stockage par volant d'inertie.....	34
Figure 3. 2 Principe de stockage gravitaire hydraulique.....	35
Figure 3.3 Stockage à air comprimé en caverne. ....	36
Figure 3. 4 Système de stockage thermique.....	37
Figure 3. 5 Principe de fonctionnement d'une cellule. ....	38
Figure 3. 6 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible. ....	39
Figure 3. 7 Principe de fonctionnement d'accumulateur plomb/acide .....	44

## Liste des figures et tableaux

---

Figure 4 1 Les pales d'éolienne.....	56
Figure 4 2 Le support des pales .....	57
Figure 4 3 Le multiplicateur de vitesse.....	57
Figure 4 4 Les paliers à roulement.....	58
Figure 4 5 bobinage (stator).....	58
Figure 4 6 Volant magnétique (rotor) .....	59
Figure 4 7 La génératrice (à aimant permanent).....	59
Figure 4 8 Le Régulateur .....	60

### Liste des tableaux

Tableau 3 1 comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique .....	40
Tableau 3 2 Comparaison des caractéristiques techniques des batteries .....	46
Tableau 3 3 Détermination la tension de votre installation éolienne.....	51

## Liste des abréviations et Glossaire

---

### Glossaire

- P<sub>m</sub>** Puissance mécanique disponible sur l'Arber
- P** Densité de l'air
- C<sub>p</sub>** Coefficient de puissance de la turbine
- S** Surface balayée par la turbine
- V** Vitesse du vent
- C<sub>n</sub>** La capacité de stockage obtenue pour une décharge de n heures
- C<sub>d</sub>** la quantité d'électricité débitée à la décharge
- C<sub>c</sub>** Quantité d'électricité fournie lors de la charge
- η<sub>f</sub>** Le rendement en ampères-heures (ou faradique)

### Liste des abréviations

- RPM** Rotation par minute
- MLI :** Modulation de Largeur d'Impulsion
- GAS** La génératrice asynchrone a cage d'écureuil
- GSAP** La génératrice synchrone à aimants permanents

# **Introduction Générale**

# Introduction Générale

---

## Introduction Générale

L'énergie est l'un des moteurs du développement des sociétés. La civilisation industrielle s'est bâtie autour de l'exploitation du charbon à la fin du 18ème siècle, puis du pétrole au milieu du 20ème siècle. Depuis le premier choc pétrolier de 1973, les pays industrialisés optent progressivement pour les énergies nouvelles et renouvelables. D'une façon générale, les énergies renouvelables sont des modes de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources dont les stocks sont illimités, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes. Le solaire, l'éolien, l'eau,...etc. ne rejettent aucune pollution lorsqu'elles produisent de l'énergie.

L'éolienne, que l'on nomme aussi aérogénérateur, est une machine qui permet la transformation de l'énergie du vent en mouvement mécanique, puis le plus souvent en électricité. Lorsque l'on ne produit qu'une force mécanique pour actionner une pompe, on parlera seulement d'éolienne; par contre lorsque l'on produit de l'électricité, on parlera d'aérogénérateur [01]

Pour contribuer à l'optimisation du stockage d'énergie, nous souhaitons associer une éolienne pour la production de l'électricité en cas de vent d'où notre thème : « Réalisation d'une éolienne avec un système de stockage » Cette étude vise à améliorer le système de stockage.

Dimensionner et réaliser une éolienne et enfin faire des expérimentations de ce fait, nous avons subdivisé notre travail en quatre chapitres à savoir :

Le premier chapitre est consacré à des rappels sur les systèmes éoliens. Ces rappels sont suivis par une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde.

Dans le deuxième chapitre, Nous avons présenté les différentes technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal), et

## Introduction Générale

---

application et zone de fonctionnement de l'éolienne, ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens, et les convertisseurs qui leur sont associés.

Dans le troisième chapitre, Nous avons présenté les différents systèmes de stockage et les différents type et technologies sont utilisées pour stocker l'énergie fournie par la génératrice.

Dans le quatrième chapitre, nous avons fait une réalisation d'une éolienne à axe vertical avec trois pales avec un système de stockage.

Finalement, on terminera ce mémoire par une conclusion générale qui résume les résultats obtenus et expose quelques perspectives de recherche envisagées.

# **Chapitre 1**

## **Généralité sur**

### **l'énergie éolienne**

## 1.1. Introduction

Les besoins énergétiques de la planète s'amplifient à une vitesse croissante dans toutes les régions du monde. La dépendance excessive vis-à-vis des importations d'énergie en provenance d'un petit nombre de pays, et la volatilité des prix du pétrole et du gaz se traduisent par une situation chancelante de l'approvisionnement énergétique qui représente déjà un lourd fardeau pour l'économie mondiale.

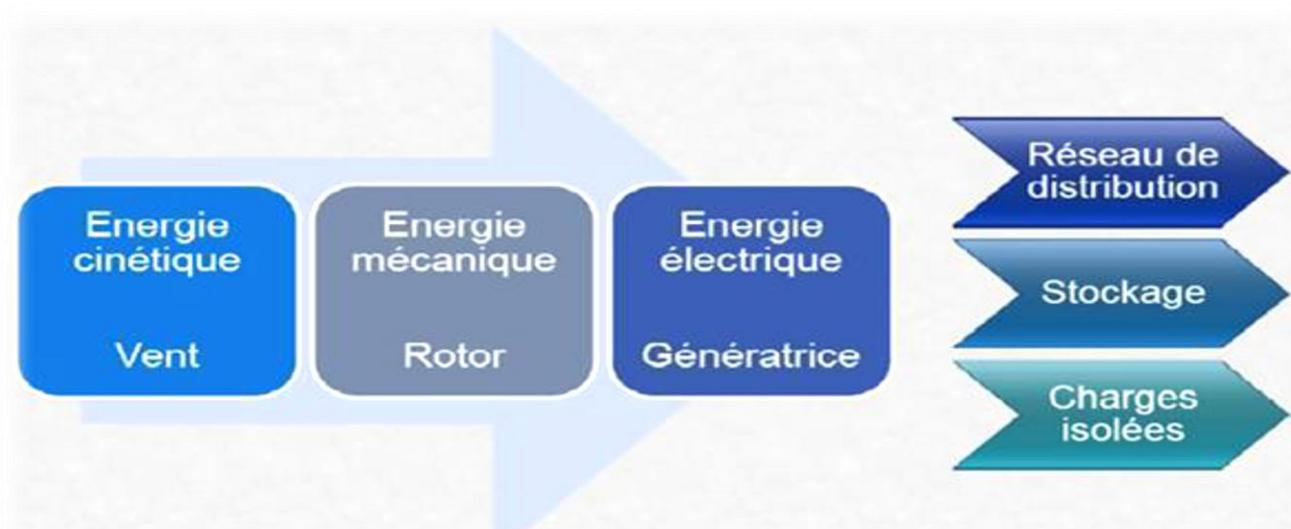
D'autre part les effets néfastes des combustibles fossiles sur l'environnement ajoutent une autre dimension de ce problème. Les usines d'énergie chargent l'atmosphère en gaz à effets de serre et des particules créant ainsi des îlots de chaleur. La génération et la consommation d'énergie sont en grande partie responsables de ces gaz qui seront émis dans l'atmosphère. De là vient l'importance de soutenir des sources d'énergie renouvelable comme celle du vent.

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes. [3]

## 1.2. Définition de l'énergie éolienne

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.

et pratiquement 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 (Figure. 1.1) [04].



**Figure 1 1 Conversion de l'énergie cinétique du vent**

### 1.3. Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19<sup>ème</sup> siècle), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable, [5].

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, DANIOUS POULE à Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [6].

Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs DANIOUS ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle [5].

C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985 [5].

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW [5].

Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés) [07].

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [07].

### 1.4. Gisement éolien

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Bejaïa et Oran), du Tassili et de Béni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s [08]. En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5

m/s. Cependant, nous pouvons observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.

**1.5. Vitesses moyennes saisonnière du vent**

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont représentés en Figure 1.2 (Eté et Printemps) et 1.3 (Hiver et Automne). On remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année [08]. Atlas vent saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol.

Tous les atlas établis présentent la région sud-ouest, à savoir Adrar, Timimoune et In Salah comme la zone les plus ventée, à l'exception de l'atlas hivernal qui se distingue par le microclimat de Tiaret qui présente les vitesses de vent les plus élevées.

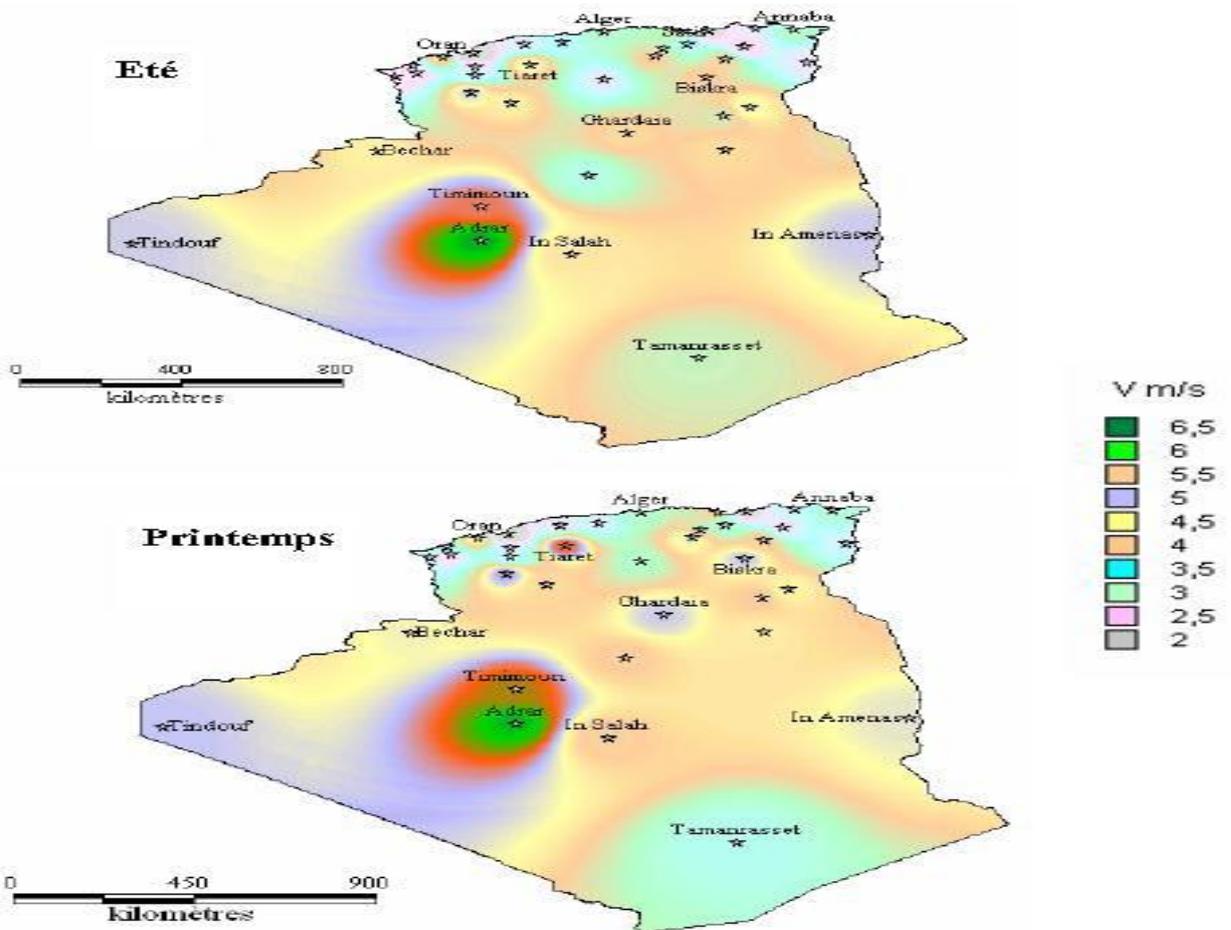


Figure 1 2 Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol. (Eté et Printemps)

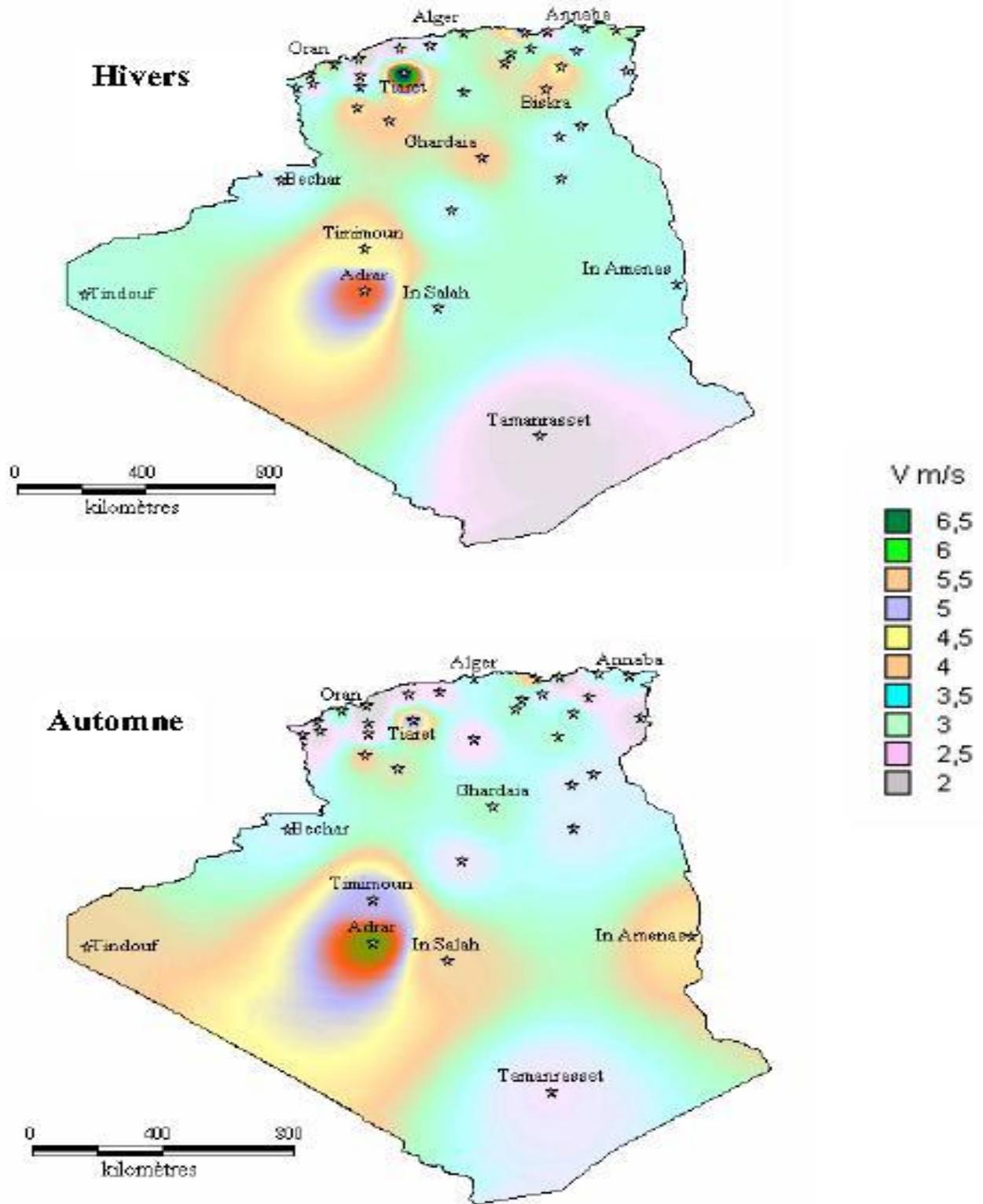


Figure 1 3 Atlas vent saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol (Hiver et automne) .

## 1.6. Énergie éolienne en quelques chiffres

### 1.6.1. La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne

En 2017, l'énergie éolienne a couvert plus de 3% de la consommation d'électricité mondiale totale grâce à une puissance de 540'000 MW. [09] Comme il est montré sur les Figure 1.4 [09]

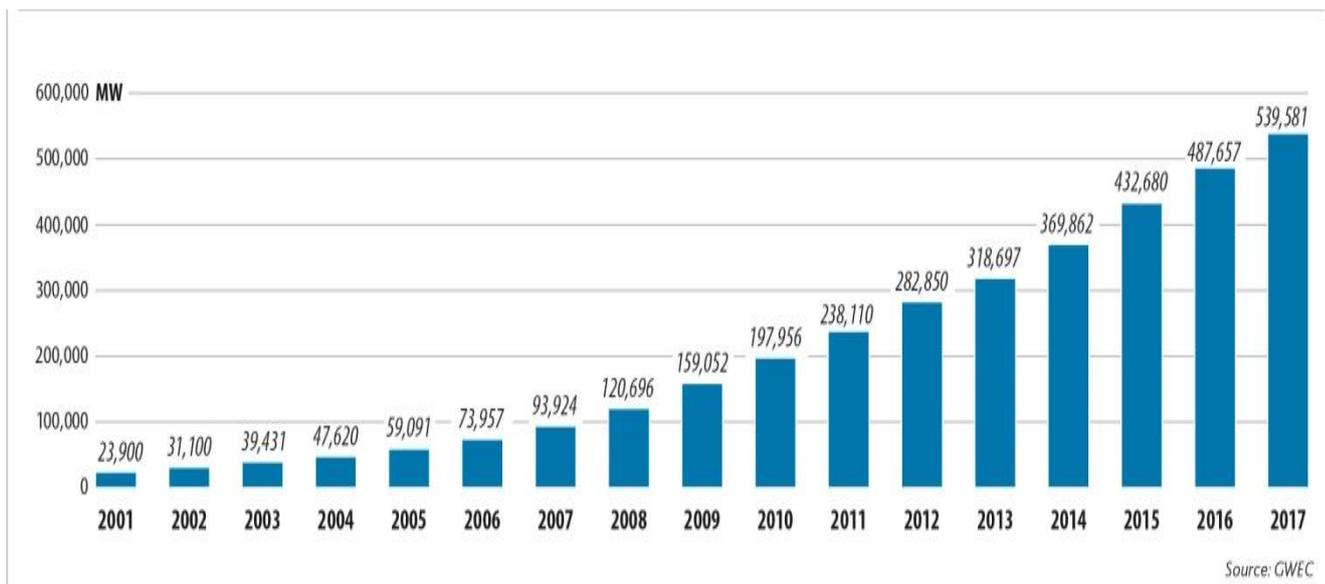
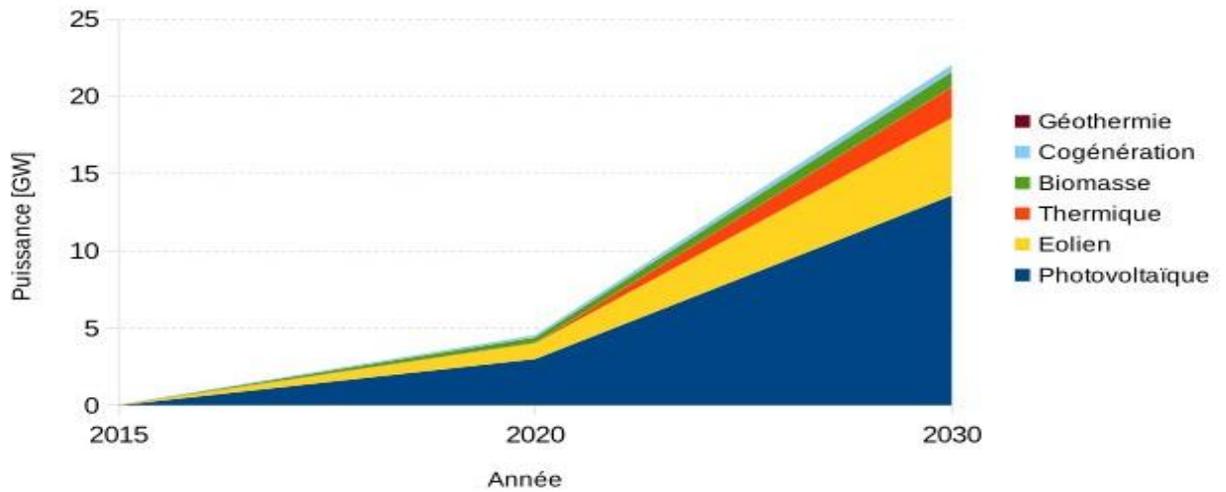


Figure 1 4 Evolution de la puissance éolienne totale installée dans le monde 2001-2017 [09]

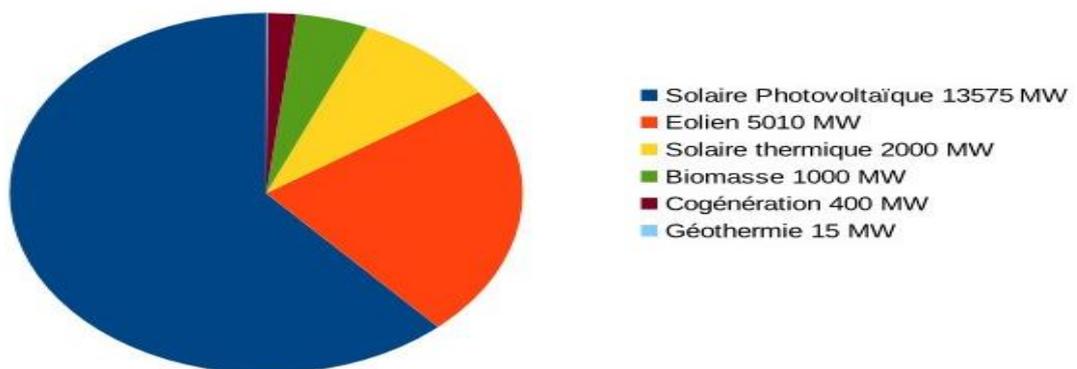
### 1.6.2. Objectifs du programme des Energies Renouvelables en Algérie (2015-2020-2030)

La révision du programme national porte essentiellement sur le développement du photovoltaïque et de l'éolien à grande échelle, sur l'introduction des filières de la biomasse (valorisation des déchets), de la cogénération et de la géothermie, et également sur le report, à 2021, du développement du solaire thermique. Ce programme a connu une première phase consacrée à la réalisation de projets pilotes et de tests des différentes technologies disponibles, durant laquelle des éléments pertinents concernant les évolutions technologiques des filières considérées sont apparus sur la scène énergétique et ont conduit à la révision de ce programme. Conformément à la réglementation en vigueur, la réalisation de ce programme national est ouverte aux investisseurs du secteur public et privé nationaux et étrangers [10].



**Figure 1 6 phases du programme algérien des énergies recevables 2015 à 2030 (objectifs cumulée par filière)**

La consistance du programme en énergies renouvelables à réaliser pour les besoins du marché national sur la période 2015-2030 est de 22 000 MW, dont plus de 4500 MW seront réalisés d'ici 2020 Figure 1.5. Ce programme consiste au développement du photovoltaïque, l'éolien à grande échelle, et les filières de la biomasse, de la cogénération et de la géothermie avec l'introduction du solaire thermique .à partir de 2021. Les capacités en énergie renouvelables seront installées selon les spécificités de chaque région : Région du Sud,



**Figure 1 5 objectif du programme algérien des Energies Renouvelables 22GW à l'horizon 2030**

pour l'hybridation des centrales existantes et l'alimentation des sites éparses compte tenu de la disponibilité des espaces et de l'important potentiel solaire et éolien qui privilégie ces régions ; Région des Hauts Plateaux pour leur potentiel d'ensoleillement et de vent avec possibilité d'acquisition des terrains ; Région du littoral selon la disponibilité des assiettes de terrain avec l'exploitation de tous les espaces tels que les toitures et terrasses des bâtiments et autres espaces non utilisés. Les besoins complémentaires pour d'autres domaines d'application sont intégrés dans la capacité totale du photovoltaïque, tels que le résidentiel, l'agriculture, le pompage, les ressources en eau, l'industrie, l'éclairage public et les services [10]

La réalisation du programme permettra d'atteindre à l'horizon 2030 une part de renouvelables de près de 27% dans le bilan national de production d'électricité et 37 % de la capacité installée. Le volume de gaz naturel épargné par les 22 000 MW en renouvelables, atteindra environ 300 milliards de m<sup>3</sup>, soit un volume équivalente à 8 fois la consommation nationale de l'année 2014.

### 1.6.3. Efficacité des éoliennes

Les éoliennes commencent à fonctionner à une vitesse de vent de 4 à 5 mètres par seconde et atteignent une puissance maximale d'environ 15 mètres par seconde.

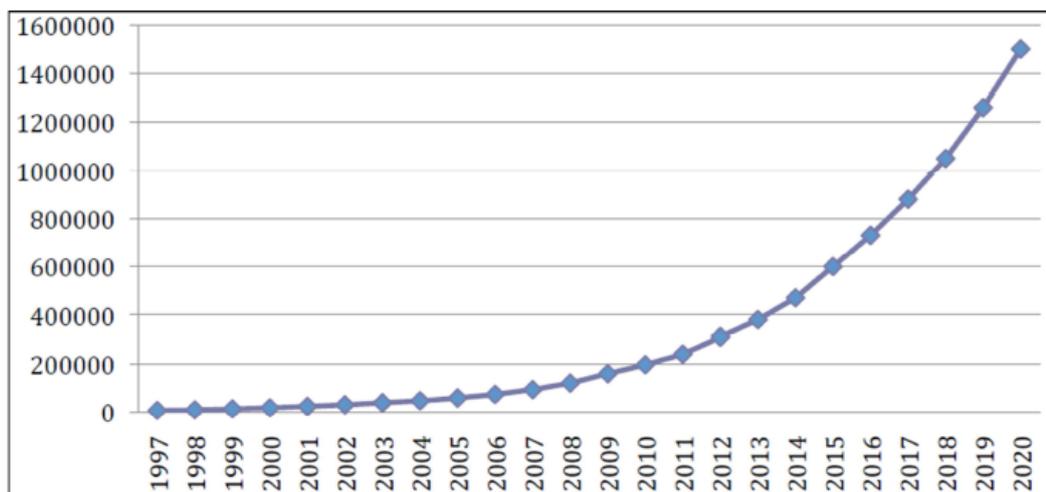
Lorsque la vitesse du vent est très élevée, c'est-à-dire que la force du vent souffle de 25 mètres / seconde, les éoliennes sont arrêtées. Une éolienne moderne produit de l'électricité dans 70 à 85% du temps, mais elle génère des rendements différents en fonction de la vitesse du vent. [10]

Au cours d'une année, il générera généralement environ 24% de la production maximale théorique (41% au large). Ceci est connu comme son facteur de capacité. Le facteur de capacité des centrales conventionnelles est en moyenne de 50% à 80%. En raison d'arrêts pour maintenance ou de pannes, aucune centrale électrique ne produit de l'énergie 100% du temps [10].

**1.6.4. Futurs challenges et perspectives mondiales**

Sur la base de l'expérience et des taux de croissance des années passées [11] prévoit que l'énergie éolienne continuera son développement dynamique dans les années à venir. Malgré les impacts à court terme de la crise financière actuelle qui rendent difficile les prévisions à court terme, on peut attendre, qu'à moyen terme, l'énergie éolienne attirera les investisseurs grâce à son faible risque et au besoin d'énergie propre et fiable. De plus en plus de gouvernements comprennent les bénéfices multiples de l'énergie éolienne et mettent en place des politiques favorables, incluant la promotion des investissements décentralisés par des producteurs indépendants, petits, moyens ou basés sur des communautés, tous ouvrant la voie vers un système de production d'énergies davantage renouvelables pour le futur [12].

En calculant rigoureusement et en prenant en compte des facteurs d'insécurité, on estime que l'énergie éolienne sera capable de contribuer en 2020 à au moins 12% de la consommation électrique mondiale [12]. En 2015, une capacité totale de 600 000 MW est possible. Fin 2020, au moins 1 500 000 MW peuvent être attendus [13].



**Figure 1 7 L'énergie éolienne mondiale (MW)**

**1.6.5. Coût de base de l'énergie éolienne**

Environ 75 % du coût total de l'énergie pour un projet d'énergie éolienne est lié aux coûts initiaux comme le coût de l'éolienne, des fondations, de l'équipement électrique et du raccordement au réseau [14]

En revanche, les coûts d'exploitation sont très faibles par rapport aux technologies des combustibles fossiles, où de 40 à 70 % des coûts sont liés au carburant et à l'exploitation et à la maintenance pendant toute leur durée de vie.

La durée de vie typique d'un parc éolien est de 20 ans, bien qu'il existe des projets dans l'Union européenne qui fonctionnent depuis plus longtemps. La prolongation de la durée de vie des parcs éoliens est un domaine de recherche actif. Le remplacement des projets existants par des technologies plus récentes et à plus grande échelle constitue également une stratégie importante à long terme pour améliorer la compétitivité des coûts. [14]

### 1.7. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

#### 1.7.1. Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO<sub>2</sub> a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050 [15]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années [15]. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [08].

« L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO<sub>2</sub> ».

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [15].

- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17,5 mille tonnes de Nox [15]. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides [15].

- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [08].

- 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. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [15].

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.

- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [15].

- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [15].

- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [16].

- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [16].

### 1.7.2. Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [08].

- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée [08].

- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [15] [17]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro-turbines [15].

- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes [15].

- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [15]

### 1.8. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre quelque généralité sur les systèmes éoliens, et on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne.

Nous avons présenté quelques chiffres, quelques statistiques, et les Objectifs des programmes des Energies Renouvelables en Algérie et le monde.

On a donné des Aspects économiques et impact environnement des éoliennes.

Dans le chapitre suivant, nous parlerons sur l'énergie éolienne et leur production d'électricité, et les différentes génératrices et convertisseurs utilisées dans systèmes.

# **Chapier 2**

**Type et champ  
d'application des  
turbines éoliennes**

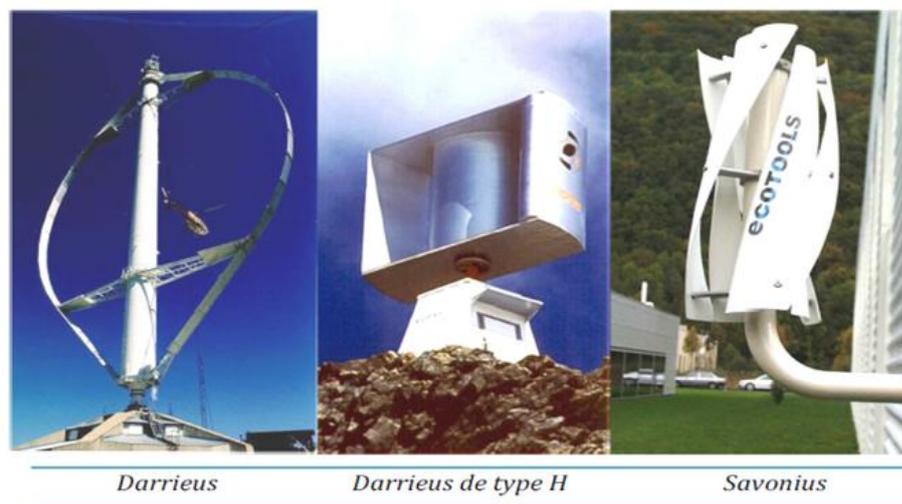
### 2.1.Introduction

Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

### 2.2. Types des turbines éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [19].

#### 2.2.1. Eolienne à axe vertical



**Figure 2 1Technologie éolienne à axe vertical.**

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux Figure 2.1 [19].

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins rependue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [20] [19].

### **2.2.1.1. 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.

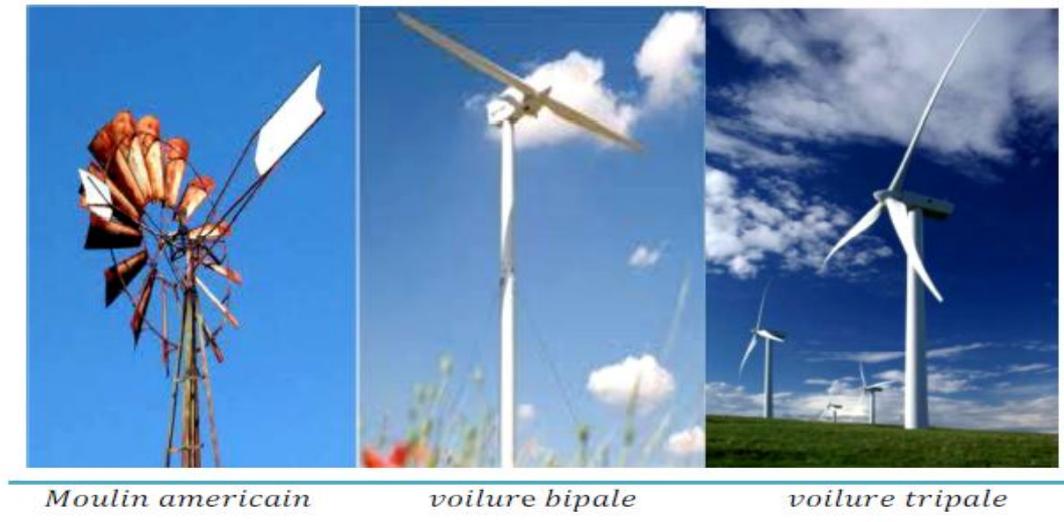
### **2.2.1.2. Inconvénients**

- 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.

### 2.2.2. Eoliennes à axe horizontal



**Figure 2 2 Technologie éolienne à axe horizontale**

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent Figure 2.2[19] [20].

#### 2.2.2.1. 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.

#### 2.2.2.2. Inconvénients

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

## Chapitre 2 Type et champ d'application des turbines éoliennes

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 [19].

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) [19].

### 2.3. Constitution d'une éolienne moderne

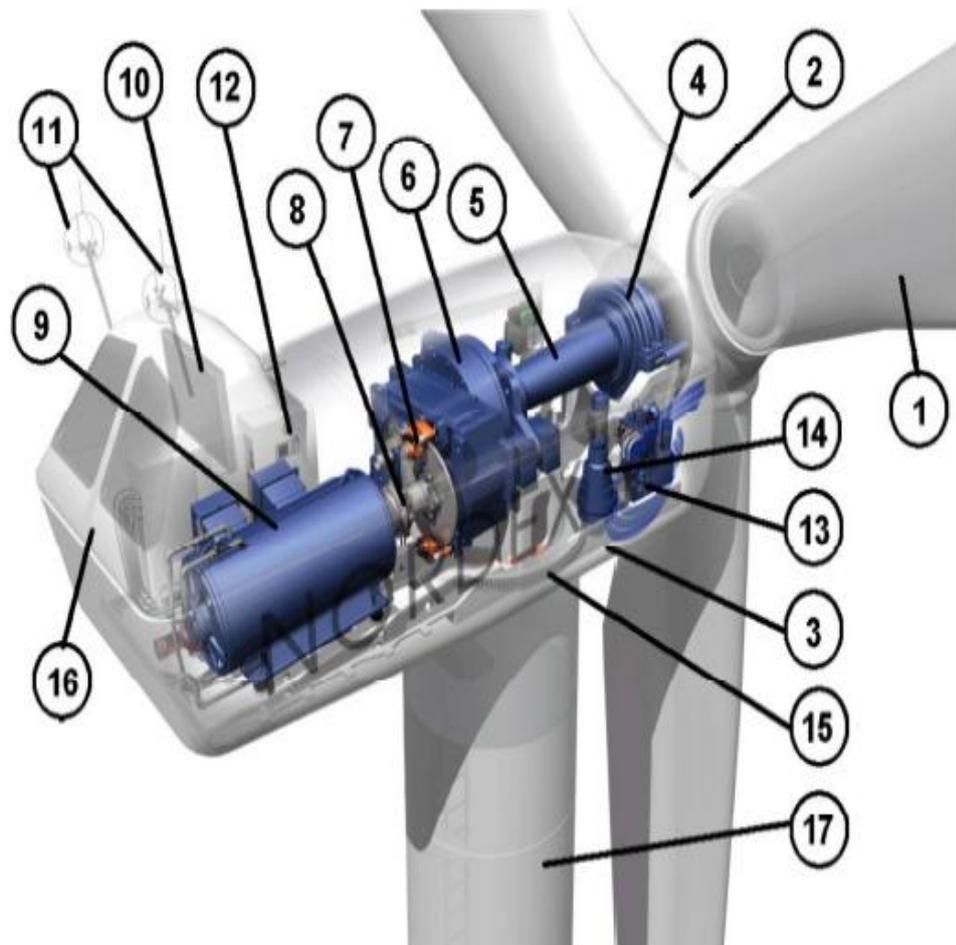


Figure 2 3 Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW . [21].

Elle est constituée d'une :

<b>01</b>	Les pales	<b>07</b>	frein mécanique à disque	<b>13</b>	Mécanismes d'orientation
<b>02</b>	le moyeu de la turbine	<b>08</b>	Accouplement flexible	<b>14</b>	Mécanismes d'orientation
<b>03</b>	La nacelle	<b>09</b>	Générateur	<b>15</b>	Mécanismes d'orientation
<b>04</b>	L'axe de transmission	<b>10</b>	system refroidissement	<b>16</b>	Capot en acier
<b>05</b>	Arbre lent	<b>11</b>	Un anémomètre et une girouette	<b>17</b>	La tour
<b>06</b>	Multiplicateur de vitesse	<b>12</b>	Equipements de contrôle		

### 2.4. Application des éolennes

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration:

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. D'une part, la complémentarité avec les moyens traditionnels de production, comme les centrales Sur le réseau électrique isolé thermiques classiques ou nucléaires et les barrages pour des régions disposant d'une infrastructure existante. D'autre part, la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement. Comme pour l'alimentation d'unités de désalinisation, la cogénération avec des groupes diesels et des panneaux photovoltaïques [23].

### 2.5. Théorie de Betz

La théorie globale du moteur éolien à axe horizontal a été établie par « Albert Betz » [19].. Betz suppose que le moteur éolien est placé dans un air animé à l'infini en amont d'une vitesse  $v_2$  et à l'infini en aval d'une vitesse  $v_1$ . La production d'énergie ne pouvant se faire que par la conversion de l'énergie cinétique, la vitesse  $v_1$  est nécessairement inférieure à  $v_2$ . Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant.

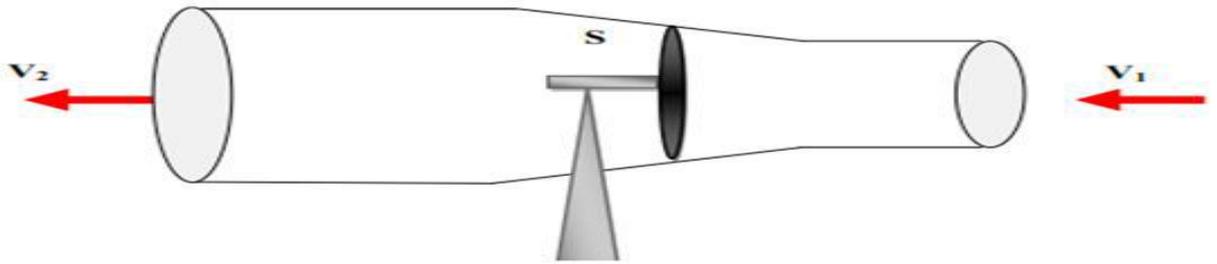


Figure 2 4 Schéma de principe de Théorie de Betz

Le physicien allemand Albert Betz a démontré théoriquement que la limite du rendement d'une éolienne était de 16/27, qui veut dire que Le maximum exploitable sur le total de la puissance contenue dans le vent est de 59%, cette valeur est connue sous le nom de Limite de Betz.

En d'autres termes, l'énergie cinétique du vent ne peut pas être entièrement récupérée, on introduit alors le coefficient de puissance C (sans dimension) qui correspond p au pourcentage de la puissance récupérée.

Donc, la puissance mécanique disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur ( $P_m$ ) s'exprime par l'équation suivant

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p S V^3$$

Le coefficient de puissance maximum théorique s'appliquant à tout modèle d'éolienne est de  $C_{pmax} = 0.59$ . Néanmoins, à cause des pertes, les éoliennes ne fonctionnent jamais à cette limite maximum. Le multiplicateur, les roulements, la génératrice et l'électronique de puissance réduisant l'efficacité globale. [19].

### 2.6. La valeur $C_p$ est propre à chaque type d'éolienne.

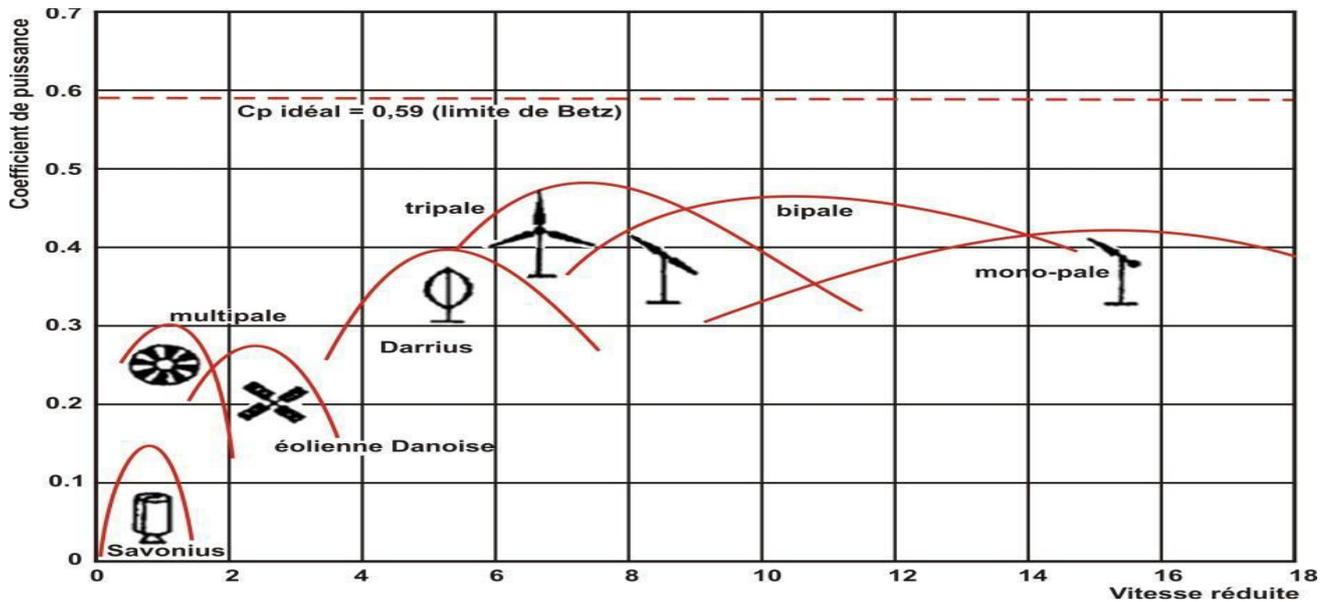


Figure 2 5 Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

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 (Figureure 2.5.) 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 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[24].

### 2.7. 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 :

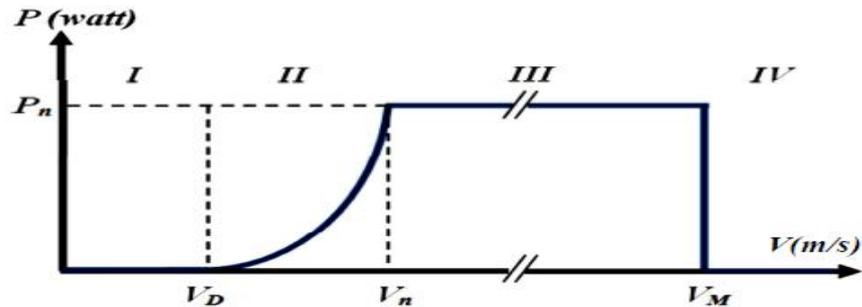


Figure 2 6 courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

$V_D$ : 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. [25].

### 2.8. Etat de l'art sur les générateurs utilisés dans le SCE

Diverses chaînes de production coexistent pour la production d'électricité par aérogénérateurs couplés au réseau. Elles peuvent être très différentes selon la nature du convertisseur électromécanique utilisé et le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable), on peut citer:

#### 2.8.1. Génératrices synchrones (GS)

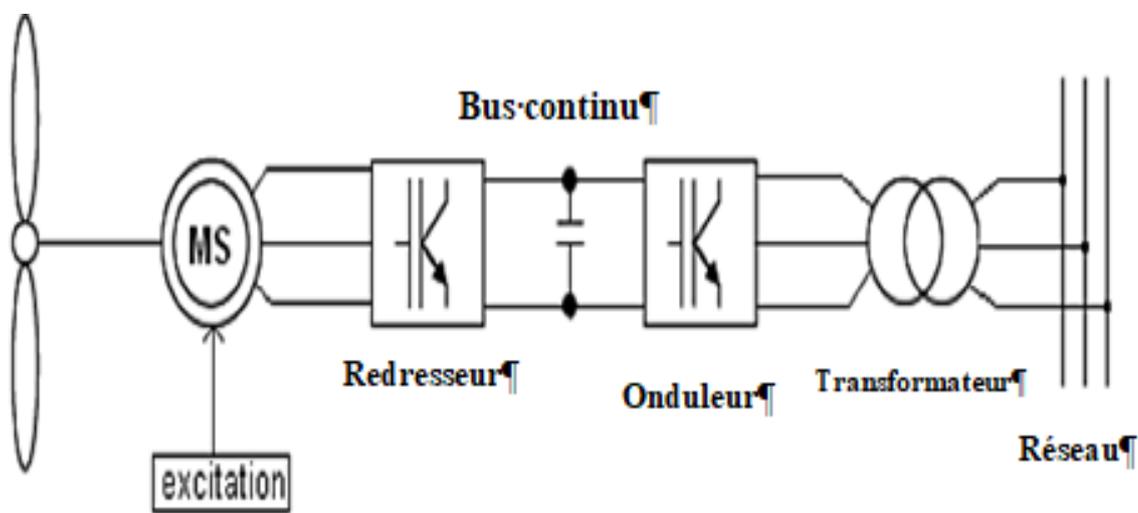


Figure 2 7 System éolien basé sur la machine synchrone à vites variable

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont conçues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. (Figure 2.8) Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts. Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive. Les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une source de tension indépendante. Par contre, la possibilité de réglage de l'inducteur de ces machines offre un moyen supplémentaire d'ajustement du point de

fonctionnement énergétique. Le couplage direct sur le réseau est proscrit car étant beaucoup trop rigide. Une électronique de puissance s'impose pour toutes les applications utilisant ce type de machine fonctionnant à vitesse variable [26].

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

### 2.8.2. Génératrices asynchrones à double alimentation (GADA)

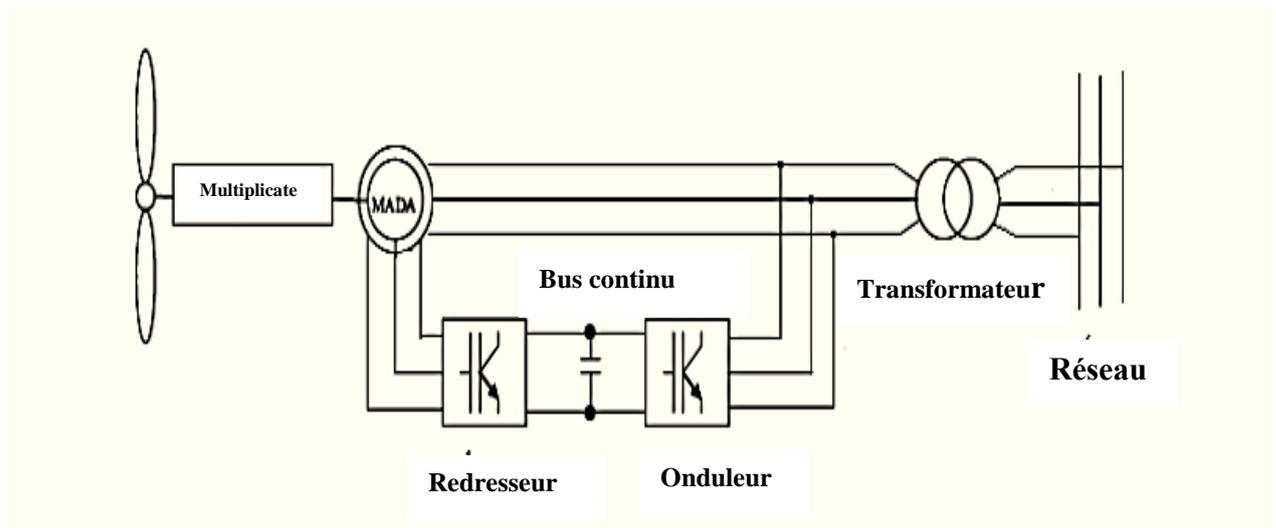


Figure 2 8 System éolien basé sur la machine asynchrone double alimentation

Dans ce cas, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors l'enroulement rotorique est connecté à ce même réseau via une interface d'électronique de puissance.

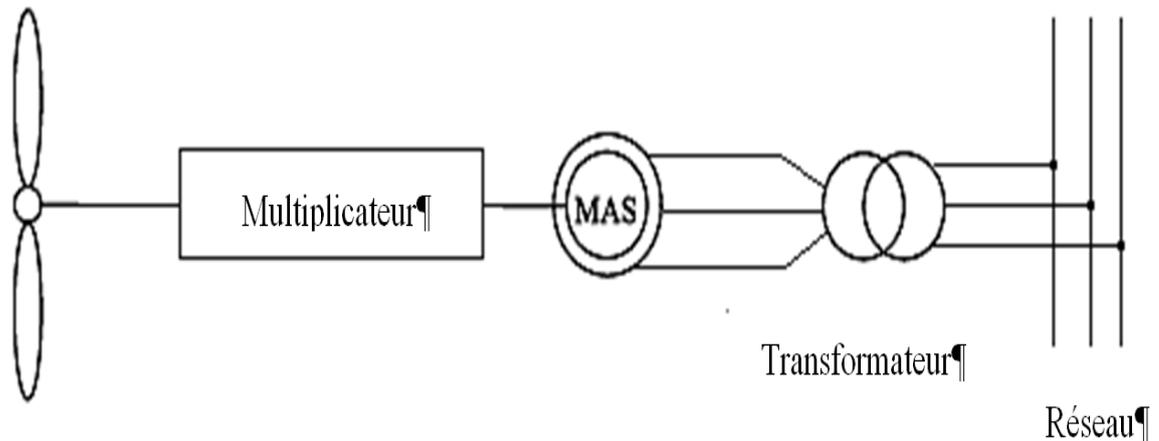
Le convertisseur de puissance connecté au rotor (coté rotor) partage un bus de tension continue avec un second convertisseur identique connecté au réseau électrique (coté réseau)

via un transformateur tel qu'illustré à la Figure 2.9. Le condensateur permet de découpler les deux convertisseurs et agit comme un réservoir d'énergie afin d'atténuer les perturbations de tension et courant lors des commutations. C'est le convertisseur coté rotor qui permet d'imposer les courants nécessaires afin de contrôler les puissances actives et réactives. Pour sa part, le convertisseur coté réseau s'occupe de maintenir la tension du bus constante en échangeant la puissance active fournie ou absorbée par le rotor avec le réseau électrique. La tension du rotor étant généralement différente de celle du stator, un transformateur est nécessaire afin d'adapter les différents niveaux de tension. [26]

De même, l'utilisation d'un filtre juste après les convertisseurs s'impose pour contrôler le niveau des harmoniques. Le multiplicateur est présent dans ce cas aussi. Ses principaux avantages sont le fonctionnement à vitesse variable ( $\pm 30\%$  de la vitesse de synchronisme) et l'optimisation de la puissance extraite pour les vents faibles et moyens. De plus les prix ne sont pas trop élevés car la machine est standard et l'électronique de puissance est dimensionnée seulement à 30% de la puissance nominale. Il reste toutefois, la maintenance de la boîte de vitesse, le contrôle est complexe et la présence de système à bagues et balais comme inconvénients.

### 2.8.3. Génératrices asynchrones à cage (GAS)

La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur. Mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues, la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse pour adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. [26]

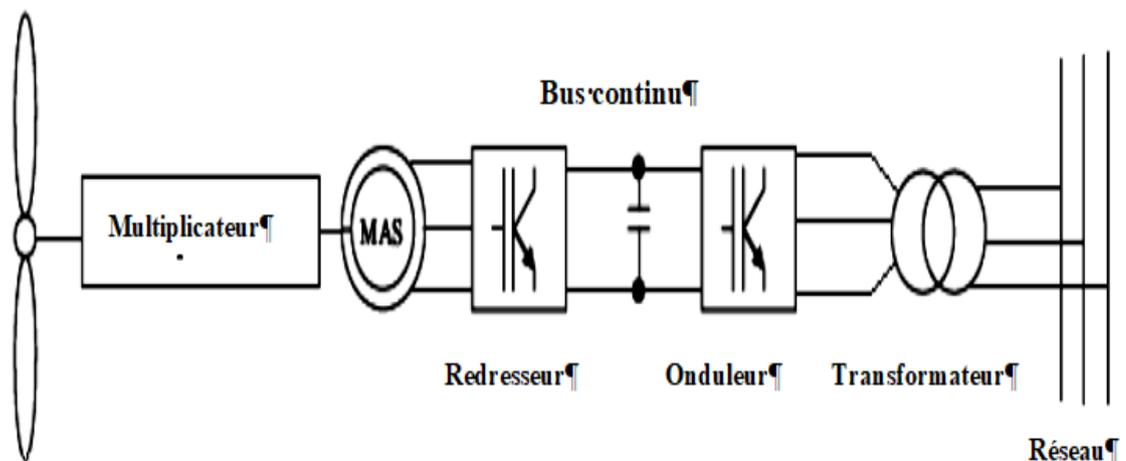


**Figure 2 9 Système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse constante**

Le principal avantage de cette structure est le faible coût de la machine et l'absence d'électronique de puissance d'interfaçage. Néanmoins, on peut noter comme inconvénients, la puissance extraite est non optimisée, et la maintenance de la boîte de vitesse

Si la machine asynchrone fonctionne en autonome, il faut introduire des capacités d'auto-excitation pour sa magnétisation.

Dans le cas du fonctionnement à vitesse variable, l'utilisation des convertisseurs de puissances s'impose pour découpler la fréquence délivrée par la machine et celle du réseau. (Figure 2.10).



**Figure 2 10 Système éolien basé sur une machine asynchrone à vitesse variable**

### 2.8.4. Générateur Synchrone à Aimants Permanents (GSAP) :

La caractéristique d'auto excitation du GSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne [29]. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé

Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif.:

### 2.8.5. Redresseur à diodes et onduleur MLI

Cette topologie utilise un redresseur à diodes entre le bus continu et la génératrice, et un onduleur à IGBT (contrôlé par MLI) placé entre le bus continu et le réseau. La puissance transitée entre la génératrice et le bus continu est donc unidirectionnelle : la génératrice ne peut pas être freinée. Le réglage de la vitesse de la GAS est donc limité ce qui réduit la possibilité d'extraire la puissance maximale. [26]

### 2.8.6. Redresseur et onduleur MLI

Le redresseur est un convertisseur à IGBT fonctionnant à fréquence variable. La vitesse de la GAS est alors parfaitement contrôlable. Un deuxième convertisseur (onduleur à MLI) connecté au réseau est nécessaire pour contrôler le transit de puissance.

## 2.9. Types de Machines Electriques pour les Petites Eoliennes

Trois types de machines électriques se retrouvent principalement dans une éolienne de petite taille (<20 kW) : l'alternateur à aimants permanents, la génératrice à courant continu et l'alternateur à excitation bobinée sans balai. Chaque machine a des avantages et des inconvénients qui lui sont propres (Association Canadienne de l'Energie Eolienne ACCE, 2006).

Dans les alternateurs à aimants permanents, le champ magnétique créé par les aimants est constant. Ces alternateurs sont beaucoup plus légers que les autres types de générateurs qui utilisent un enroulement de cuivre autour d'un noyau magnétique pour créer le champ magnétique. Les alternateurs à aimants permanents produisent un courant et une tension de fréquence proportionnelle à la vitesse de rotation (qui varie elle-même avec la vitesse du vent

dans le cas d'une éolienne). Ainsi, un matériel électrique conçu pour fonctionner à la fréquence du réseau ne peut pas être connecté directement à l'alternateur d'une éolienne. Il est nécessaire de passer par un convertisseur de fréquence, en général, par un redresseur et un onduleur. La tension intermédiaire délivrée par le redresseur étant de nature continue, un stockage d'énergie sous forme de batterie est en outre envisageable. [27]

La génératrice à aimants permanents est simple et présente un bon rendement. Dans plusieurs éoliennes de petite taille, les aimants tournent autour du stator alors situé au centre de la machine. Il est possible d'immobiliser le rotor en présence de vents modérés de façon à réaliser la maintenance de la turbine.

Certains fabricants affirment que les alternateurs à aimants permanents sont les meilleures machines pour de petites éoliennes en raison d'un entretien réduit.

L'entretien d'une génératrice à courant continu est plus fréquent puisqu'il faut remplacer les balais tous les 6 ou 10 ans. Toutefois, ce remplacement ne présente pas de difficultés particulières. Pour le fabricant, le principal avantage des alternateurs à aimants permanents réside dans leur coût relativement faible : les aimants sont moins coûteux que les bobinages en cuivre dans la gamme de puissance des petites éoliennes. Il y a également d'autres avantages pour l'utilisateur : le freinage dynamique et la production d'un courant alternatif plutôt que continu, ce qui représente des économies à l'achat du câble électrique reliant l'éolienne à l'armoire électrique.

Cependant, contrairement aux alternateurs à aimants permanents dans lesquels l'induction d'excitation demeure constante, l'induction magnétique dans l'alternateur à rotor bobiné peut être modulée selon la vitesse du vent pour une utilisation optimale de l'éolienne.

Un avantage des alternateurs à inducteur bobiné est leur capacité de démarrage par vents faibles. Ceci s'explique par le fait qu'il n'y a presque pas de flux magnétique développé par l'inducteur, donc une très faible résistance au mouvement pour l'armature en rotation. L'induction magnétique peut être augmentée au fur et à mesure que les vents se renforcent. En conséquence, la génératrice à rotor bobiné permet de délivrer une puissance évoluant comme le cube de la vitesse du vent, multipliant par 8 la puissance recueillie en sortie de la

génératrice lorsque la vitesse du vent double. Les alternateurs à aimants permanents présentent une induction magnétique constante quelle que soit la vitesse de rotation du rotor. Le rotor est donc plus difficile à démarrer et l'alternateur n'est performant que dans une gamme limitée de puissance. Les autres points de fonctionnement ne correspondent qu'à des compromis lors du dimensionnement, ce qui est particulièrement pénalisant en cas de vents moyens ou faibles, c'est-à-dire le plus souvent pour une éolienne.

Afin de limiter ce problème, les fabricants qui utilisent des alternateurs à aimants permanents conçoivent les pales pour maximiser le couple de démarrage afin que le rotor puisse démarrer à vent réduit. Cette conception d'hélice a aussi un impact sur le rendement aérodynamique à des vitesses de vent plus élevées.

Quant aux alternateurs à excitation sans balais, ils cumulent les avantages des deux types de machines. Ils possèdent un inducteur bobiné et n'ont pas de balais. Cependant, comparativement aux alternateurs à aimants permanents, les alternateurs sans balais sont plus complexes. Ils sont donc plus coûteux, à l'achat comme à l'entretien.

### **2.10. Conclusion :**

Ce chapitre nous a permis de dresser un panel de solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés,

# **Chpiter3**

## **Stockage d'énergie.**

### **3.1.. Introduction**

Dans le contexte actuel d'un accroissement de la production d'électricité à partir des énergies renouvelables, accompagnée d'une décentralisation des moyens de production, les dispositifs de stockage d'énergie trouvent un nouveau champ d'applications propice, à leur développement.

Les ressources renouvelables présentent un inconvénient majeur : leur fluctuation indépendamment de la demande. elles sont extrêmement abondantes et les coûts d'investissement des systèmes, qui permettent de la convertir, ne cessent de baisser pour atteindre progressivement les seuils de compétitivité. Leur contribution significative au développement durable nécessitera sans doute de développer largement des moyens de stockage.

La puissance produite au fil du temps par les éoliennes est caractérisée par sa fluctuation due à leur source primaire difficilement prévisible et très fluctuante. Ceci augmente les problèmes induits par l'intégration en grand nombre d'éoliennes dans les réseaux et rend difficile leur participation aux services systèmes (réglage de la tension et de la fréquence, fonctionnement en îlotage, etc.) la stabilité du réseau repose sur l'équilibre entre production et consommation. L'augmentation du taux de pénétration des éoliennes sera donc conditionnée par leur participation à ces différents services, ce qui sera favorisé par l'association à ces éoliennes des systèmes de stockage de l'énergie électrique.

### **3.2. Systèmes de stockage :**

Dans une installation photovoltaïque, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur photovoltaïque, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite d'envisager des stockages suivant les conductions météorologiques. [28] Le stockage de l'énergie électrique passe plus souvent par une forme d'énergie intermédiaire quelconque, (gravitaire, de compression, électrochimique, électrostatique, électromagnétique, cinétique, thermique, etc.) transformable en second temps en électricité. Il y a deux types de stockage à envisager :

- stockage à court terme : (temps de stockage inférieur à 10 minutes).
- stockage à long terme : (temps de stockage supérieur à 10 minutes).

Le choix du système de stockage se fait suivant des caractéristiques fondamentales qui sont : [31], [07]

- La puissance massique en (W/Kg)
- l'énergie massique (en Wh/kg).
- le nombre de cycles de fonctionnement.
- le coût.
- le rendement énergétique.

### **3.2.1. Techniques de stockage à court terme**

#### **3.2.1.1. Stockage d'énergie magnétique**

Dans des bobinages supraconducteurs (SMES Super condensateurs Magnétique Ennery Storage) L'énergie peut être stockée sous forme d'énergie d'un champ magnétique créé par un courant circulant dans une bobine supraconductrice. Pour maintenir la bobine dans l'état supraconducteur, on l'introduit dans un cryostat rempli d'hélium liquide. La bobine court-circuitée permet de stocker Avec  $L$  l'inductance de la bobine et  $I_{sp}$  le courant la traversant. Pour récupérer l'énergie il suffit d'ouvrir le circuit et de le brancher sur le récepteur et l'énergie stockée est transférée en un temps très court. Cependant, les coûts de fabrication et de maintenance sont très élevés et il y en a très peu de SMES en fonction. Même si les recherches envisagent des SMESs de l'ordre de 10 — 100 MW, les systèmes disponibles actuellement sont compris entre 1 et 10 MW. [13]

### 3.2.1.2. Stockage par Condensateurs à double couche :

Super condensateurs Le condensateur électrique à double couche est un condensateur à très forte capacité ; on le dénomme couramment "super condensateur". Les modèles actuels se caractérisent par leur densité de puissance très élevée (bien supérieure à 1000 W/kg), leur longévité (plus de 100.000 cycles) et par un rendement relativement élevé (en général supérieur à 80 %). De par ces caractéristiques, ils sont généralement bien adaptés à la Fonction d'égalisation de charge pour une batterie ou une pile à combustible.

En effet, ils présentent une densité d'énergie fort inférieure à celle des autres sources de puissance : seulement de 3 à 7 Wh/kg ! Compte tenu par ailleurs des considérations de poids et d'encombrement, on n'arrive ainsi qu'à une ou deux centaines de wattheures d'énergie. [32]

### 3.2.1.3. Stockage sous forme d'énergie cinétique :

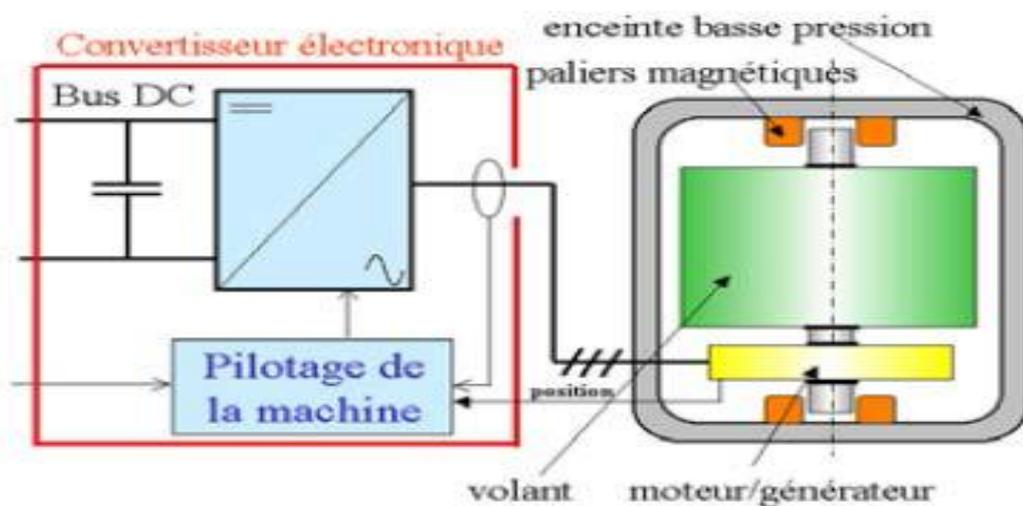


Figure 3 1 Stockage par volant d'inertie.

Volant d'inertie (Fly Wheel) le système de volant d'inertie est composé d'une masse inertielle mouvante, circulaire ou non tournant à une vitesse de rotation, construite en matériau composite ou en acier pour le stockage d'énergie et un moteur/générateur à haute vitesse de rotation pour le transfert de cette énergie. Ce système, suspendu sur des paliers magnétiques ou à billes, opère dans une enceinte sous vide afin de limiter les pertes par ventilation et par frottement. L'enceinte externe doit être très résistante afin d'éviter une dispersion des débris en cas de rupture du disque d'inertie en cours de fonctionnement. Le

fonctionnement du système de stockage inertiel est basé sur la conversion de l'énergie sous forme cinétique, qui est reconvertie en cas de besoin en énergie électrique. Pour cela un volant d'inertie est entraîné par une machine électrique réversible fonctionnant dans un premier temps, en moteur pour fournir de l'énergie à la masse inertielle. Le système d'entraînement désaccouplé, le volant d'inertie stocke de l'énergie dans sa rotation. A la demande cette dernière sera transformée en énergie électrique par le générateur. Il est utilisé en application de véhicules électriques. [07], [32]

### 3.2.2. Techniques de stockage à long terme

#### 3.2.2.1. Stockage sous forme gravitaire

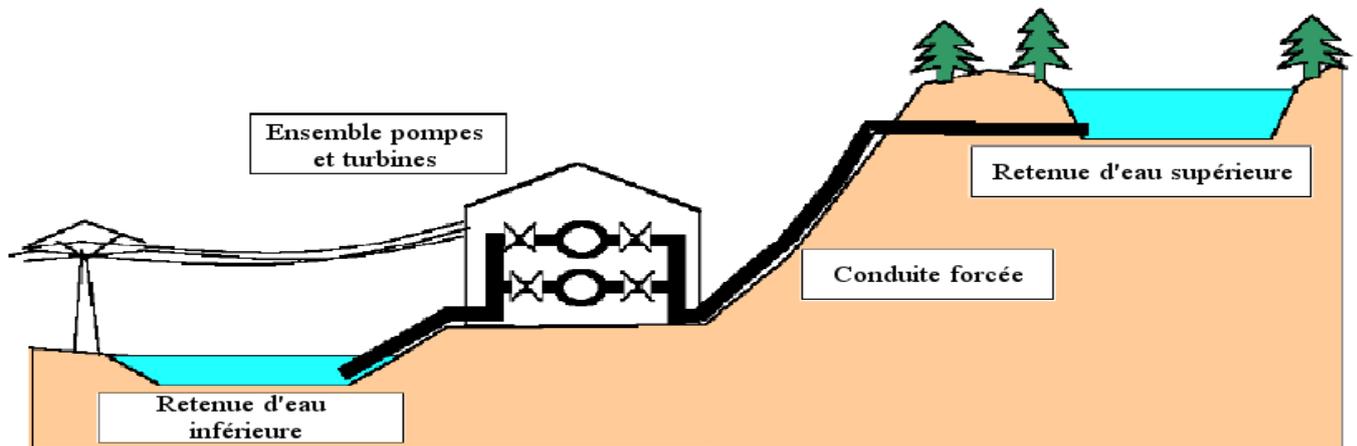


Figure 3 2 Principe de stockage gravitaire hydraulique.

Cette technique est ancienne et nommée aussi stockage par pompage hydraulique. Ce système de stockage est constitué de deux grands réservoirs situés à des hauteurs différentes, l'eau est pompée du réservoir inférieur au réservoir supérieur. L'eau pompée revient au bassin inférieur selon la demande toute en traversant une ou plusieurs turbines qui transforment l'énergie potentielle de l'eau en énergie mécanique, cette dernière est régie par la formule ( $w=mgh$ ), puis des générateurs entraînés par ces turbines transforment l'énergie mécanique en énergie électrique. (Figure I2.2)

Cette technique de stockage nous fournis jusqu'à 1000 MW, mais ils sont conditionnés par les contraintes géographiques, géologiques, environnementales et le coût assez élevé de leur construction. Ce dispositif ne peut pas être implanté au voisinage des centres de

consommation et ils sont difficilement transportables. En général, le rendement associé à cette technique de stockage est de l'ordre 75%. [07]

### 3.2.2.2. Stockage sous forme d'air comprimé (pression)

L'air avec un turbocompresseur. L'air comprimé est stocké dans des cavernes situées à grande l'air turbine à gaz. Il est réchauffé dans une chambre de combustion grâce à un appoint de gaz durant la phase de pompage et brûler 1,22 kWh de gaz naturel durant le déstockage. [13].

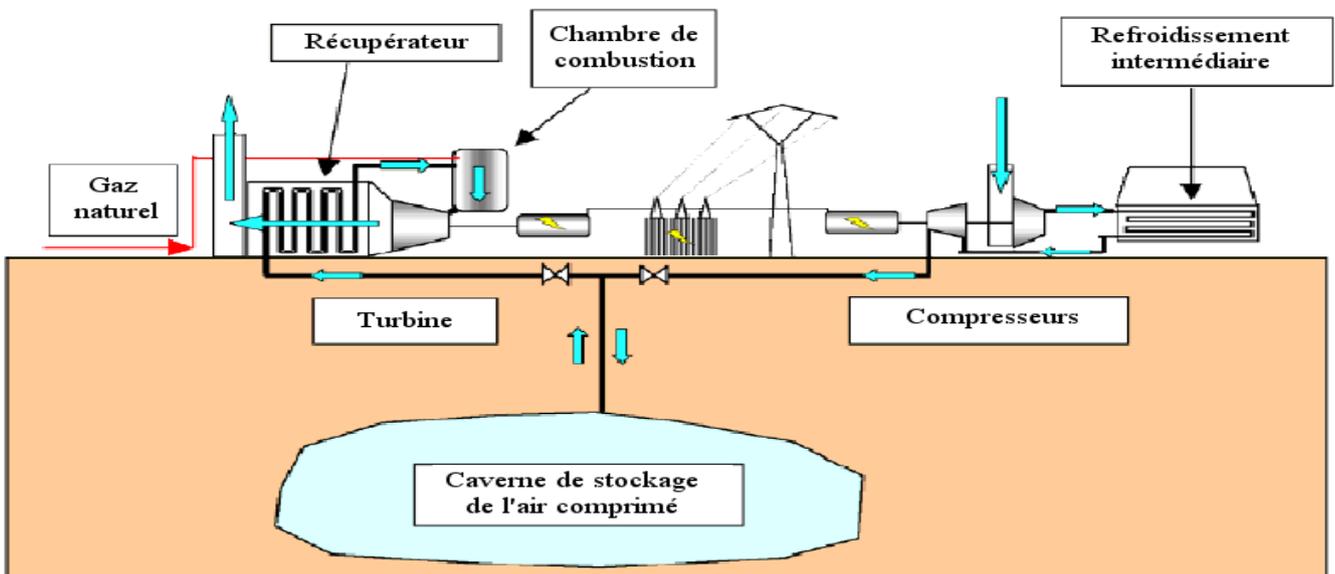


Figure 3 3 Stockage à air comprimé en caverne.

### 3.2.2.3. /Stockage sous forme thermique

Le principe de stockage thermique consiste à chauffer un corps (sodium, sel, eau sous pression, etc..) qui ne subit pas de changement d'état pendant la phase d'accumulation ; la chaleur est ensuite récupérée pour produire de la vapeur d'eau qui entraîne un groupe turboalternateur. Pour stocker l'électricité sous forme thermique, il faut :

- transformer l'électricité en chaleur dans des résistances électriques.
- stocker la chaleur produite dans des réfractaires.
- transformer la chaleur en électricité grâce à une turbine à gaz.

Cette idée qui aurait pu paraître incongrue il y a quelques années devient maintenant envisageable grâce au développement des turbines à gaz à haute température (supérieure à

1400°C), qui autorisent un rendement de conversion de la chaleur en électricité de 60 % dans les cycles combinés. De plus, à ce niveau de température, la densité d'énergie qu'il est possible de stocker dans des réfractaires est considérable. (Il faut 500 kWh pour chauffer une tonne de réfractaires à 1400°C).

Les résistances nécessaires existent. Les réfractaires nécessaires pour stocker la chaleur à 1400°C sont déjà largement employés en sidérurgie. L'isolation thermique à ce niveau de température est également bien maîtrisée par cette industrie. Une première analyse montre d'ailleurs que les pertes thermiques d'un tel système sont relativement d'autant plus réduites que la taille du stockage est grande. En plus tous les ingrédients nécessaires pour développer de tels systèmes de stockage sont disponibles. [33], [07]

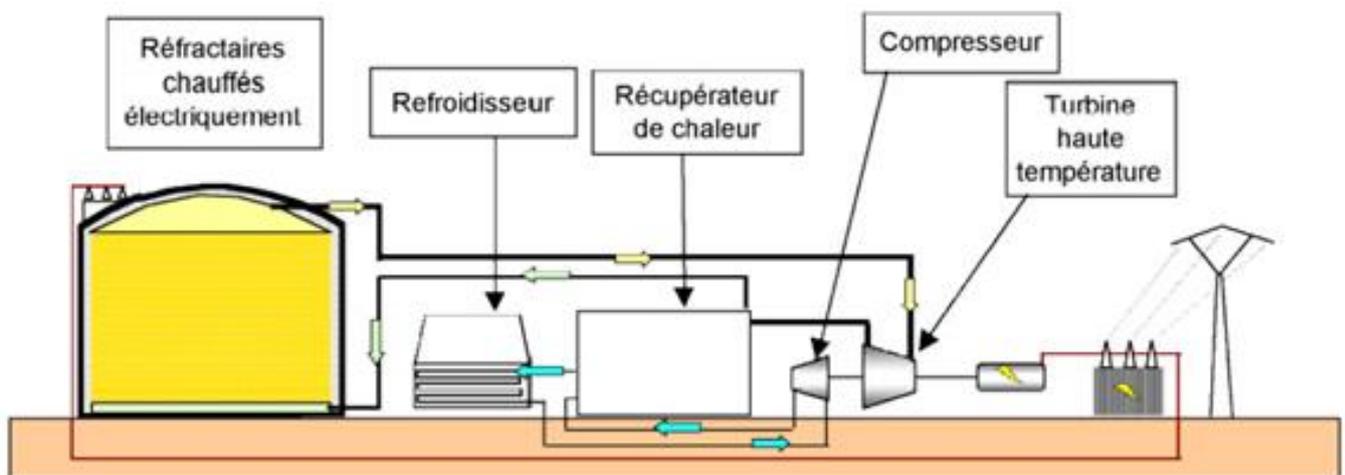


Figure 3 4 Système de stockage thermique.

### 3.2.2.4. Stockage sous forme chimique

#### 3.2.2.4.1. Les Batteries

Lorsqu'on parle de stockage d'électricité, on pense immédiatement aux batteries électrochimiques qui constituent ainsi les références en la matière. [31]

Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique. En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et

en la stockant sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité. [13]

Une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module s'appelle batterie est uniquement destinée à disposer d'une tension plus relevée aux bornes du dispositif. Une cellule est constituée de trois éléments de base :

- une électrode positive (cathode),
- une électrode négative (anode),
- un électrolyte.

Globalement, l'objectif d'une cellule est de créer une différence de potentiel entre les deux électrodes liée à leurs matériaux constitutants. L'électrolyte permet la migration des ions entre l'anode et la cathode tout en interdisant le transfert des électrons. Ceux-ci devront transiter au travers d'un circuit électrique qui est la charge. En règle générale, une technologie de batterie est définie par le couple des matériaux d'électrodes. Au besoin, le type d'électrolyte peut également être précisé (Figure 3.5). [34]

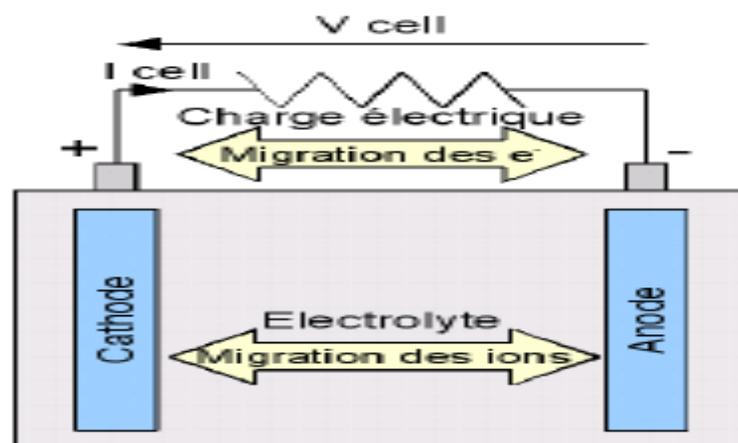


Figure 3 5 Principe de fonctionnement d'une cellule.

### 3.2.2.4.2. Les piles à combustibles

La pile à combustible est parmi les technologies envisagées pour l'avenir en termes de production d'énergie électrique décentralisée tel qu'elle suscite de nombreux travaux de recherche et développement à travers le monde. La technologie évolue vite et fortement, d'autant plus qu'elle est poussée par la volonté des constructeurs de piles de proposer le plus rapidement possible des produits économiquement viables et fiables [35]

La pile à combustible est un dispositif électrochimique réalisant l'opération inverse de l'électrolyse de l'eau. Là où une électrolyse dissocie la molécule d'eau en hydrogène et en oxygène grâce au passage d'un courant ; la Pile à combustible permet de les réunir en produisant donc de l'électricité et de l'eau et également de la chaleur (Figure 3.6).

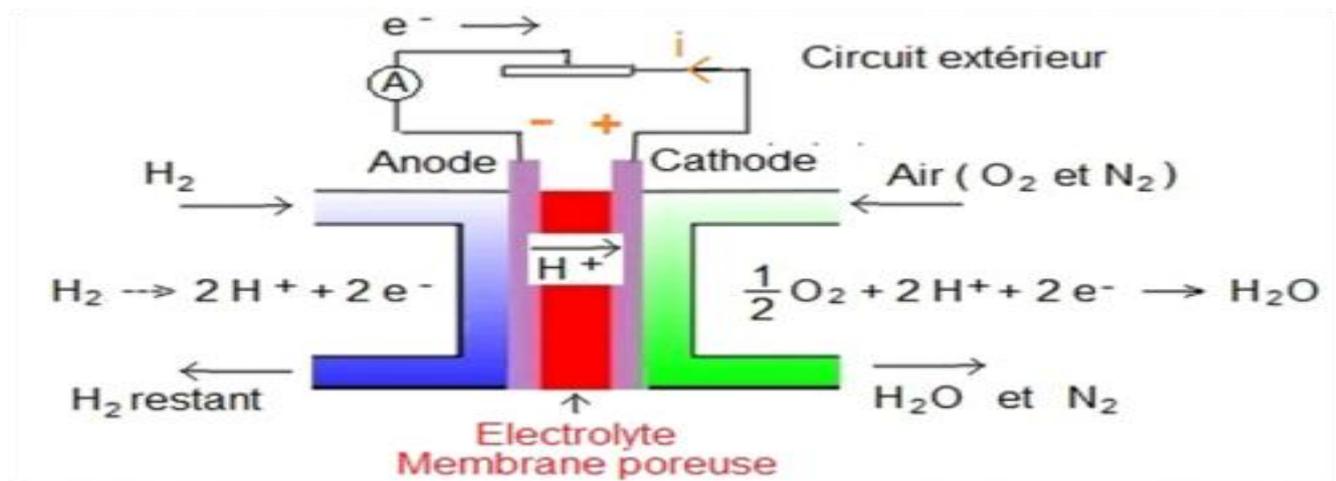


Figure 3 6 Principe de fonctionnement d'une pile à combustible.

Une cellule de pile à combustible comporte deux électrodes : l'anode et la cathode. À l'anode, se produit une réaction d'oxydation du carburant (par exemple, de l'hydrogène) tandis que, à la cathode, se produit une réaction de réduction de carburant (le plus souvent de l'oxygène). Les électrodes sont recouvertes d'un catalyseur afin de faciliter les réactions d'oxydoréduction et séparées par un électrolyte. Ce dernier laisse transiter les protons de l'anode à la cathode mais bloque les électrons. Ainsi, ils doivent emprunter un circuit extérieur (la charge) afin de migrer.

Il existe plusieurs technologies généralement classifiées en fonction du type de leur électrolyte et de leur température de fonctionnement. [34]

La réaction globale s'écrit :  $H_2 + \frac{1}{2}O_2 \rightarrow H_2O + \text{électricité} + \text{chaleur} \dots\dots\dots (1.1)$

**Tableau 3 1 comparaison entre les modes de stockage de l'énergie électrique**

Technologie	Avantages	Inconvénients
Batterie	Faible coût	Durée de vie
Air comprimé	Capacité de stockage importante	Site spécifique  Coulé avec le gaz naturel
Pompage hydraulique	Stockage important  Faible coût	Délais de construction  Site favorable
Volant d'inertie	Puissance élevée	Faible densité d'énergie  Le coût
Supraconducteur	Puissance élevée	Coût élevé  Faible densité d'énergie
Super condensateur	Durée de vie  Bon rendement	Faible densité d'énergie

•les barrages hydroélectriques et le stockage d'air comprimé : sont des dispositifs gigantesques et nécessitent de disposer d'une géologie favorable.

- les supraconducteurs : leur développement est encore à ce jour limité, ce qui les rend très onéreux.

- pour le volant d'inertie, le coût élevé de cette technologie risque d'être un obstacle à son développement et son utilisation en plus de sa sensibilité aux chocs malgré les différents avantages qu'il possède.

- les piles à combustibles ont un coût d'investissement encore prohibitif, leur rendement global est très faible et leur durée de vie insuffisante.

- les accumulateurs électrochimiques, se reconnaissent par une bonne énergie massique. Leur utilisation paraît intéressante dont la charge très peu fluctuante.

En plus, ils respectent certaines contraintes notamment un bon rapport cout/performance, une grande fiabilité, une bonne sécurité. [31], [07]

Vu tous les avantages présentés par le stockage par batteries, leur association au système photovoltaïque est presque impératif dans les systèmes de production décentralisée. Voilà pourquoi on a opté dans la suite de ce travail à l'étude et à l'application du système de stockage par batteries, dans un système de production photovoltaïque autonome.

### **3.3.Principe du fonctionnement des Batteries**

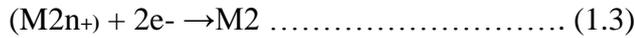
Deux électrodes plongeant dans un électrolyte constituent une chaîne électrochimique. Des lames métalliques de nature différente peuvent jouer, par exemple, le rôle d'électrodes. La chaîne électrochimique joue le rôle d'un générateur de courant par la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. C'est au niveau de ces électrodes que se passent les réactions électrochimique. On peut décrire en générale ces réactions comme suit : [36]

Au niveau de l'anode qui est l'électrode négative se fait la réaction de l'oxydation pendant la décharge et cela se caractérise par la formule suivante :



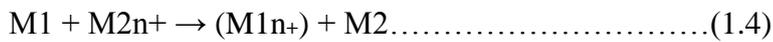
M1 : étant l'espèce active de l'anode.

Les électrons libérés vont transiter via le circuit extérieur pour atteindre la cathode, qui est l'électrode positive, là où se fait la réaction de réduction :



M2 : étant l'espèce active de la cathode.

La réaction de l'oxydoréduction globale est la suivante :



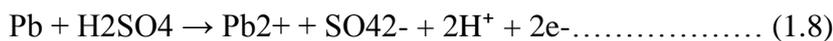
### 3.3.1. Les différents types de Batteries

#### 3.3.1.1. - La Batterie au plomb

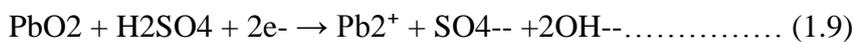
Elle se compose de deux électrodes (positive et négative) et d'un électrolyte.

L'électrode positive est en dioxyde de plomb (PbO2) et la négative en plomb (Pb). L'électrolyte est une solution d'acide sulfurique (H2SO4) qui permet le flux d'ions entre les deux électrodes et crée un courant. la densité de l'électrolyte décroît lors de la décharge lorsque la batterie débite un courant les matières actives vont se transformer en sulfate et en eau.

La réaction chimique au niveau de l'anode



La réaction chimique au niveau de la cathode



La réaction globale en partant du produit chimique  $PbO_2$  ,  $Pb$  , et  $H_2SO_4$  est la suivante :

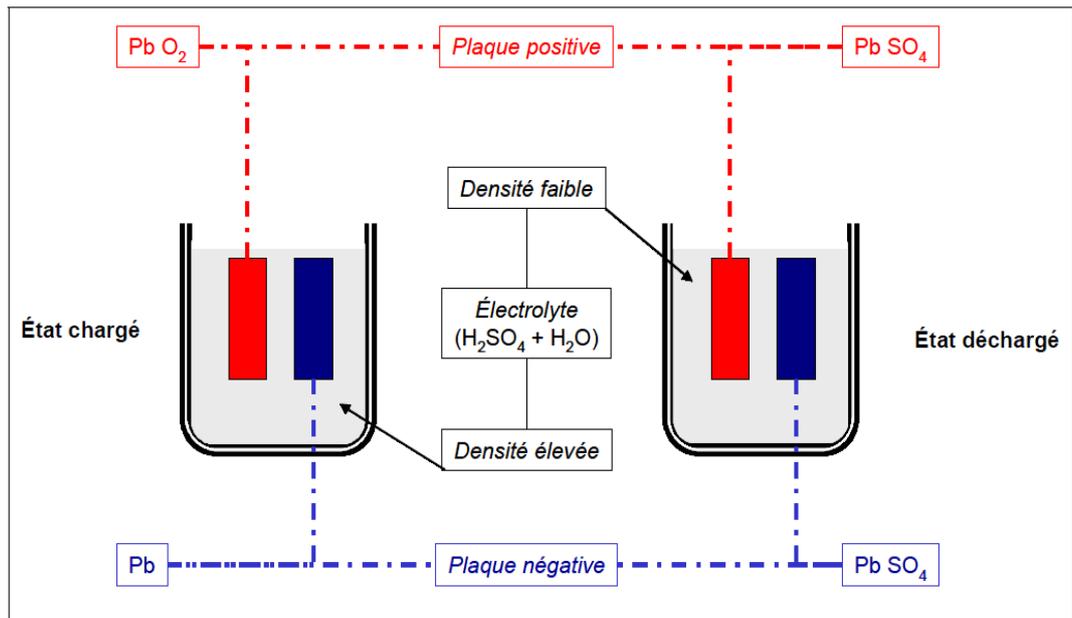


Cela se passe pendant la décharge et pour la charge ça se fait en sens inverse

La tension de ce type d'accumulateur est voisine de 2V.

On parle ici d'une cellule et une batterie est un assemblage de plusieurs cellules, unités indépendantes et complètes possédant toutes les caractéristiques électrochimiques nécessaires au stockage. Leur assemblage au sein d'un module appelé batterie est uniquement destinée à disposer d'une tension plus élevée aux bornes du dispositif

- les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité.
- si la charge se poursuit trop longtemps, la tension peut atteindre une valeur de seuil à partir de laquelle on assiste à la décomposition de l'eau (électrolyse) en dioxygène  $O_2$  gazeux à l'électrode positive et en dihydrogène  $H_2$  gazeux à l'électrode négative.[31],[34],[36]



**Figure 3 7 Principe de fonctionnement d'accumulateur plomb/acide**

### 3.3.1.2. La Batterie Nickel - Cadmium

Les batteries Cadmium-Nickel sont réalisés à partir de 2 électrodes (hydroxyde de Nickel et Cadmium) immergés dans une solution de potasse. La réaction réversible globale est la suivante:



L'électrode positive est l'hydroxyde de Nickel, et le Cadmium l'électrode négative. L'électrolyte est à base de potasse, d'où le nom d'accumulateur alcalin. La tension varie de 1.15 à 1.45 V par élément avec une valeur nominale à 1.2 V.

Bien que moins performants que les accumulateurs au Plomb, les accumulateurs au Cd-Ni présentent les avantages suivants:

- très bonne résistance mécanique (applications embarquées)
- ne craignent pas le gel et supportent les températures élevées.

- supportent les décharges totales
- pas d'émanation toxique. [37]

### **3.3.1.3. La Batterie Lithium-Ion (Li-Ion)**

L'électrolyte est constitué d'une solution organique ou d'un polymère solide. La grande légèreté de ce métal autorise l'obtention de densité énergétique extrêmement élevées et la tension de cellule, une densité de puissance importante. Leur coût est 10 fois plus élevé que le Pb (600€/ kWh) et ils ne sont encore utilisés couramment que pour les applications de petites puissances [32], [37]

### **3.3.1.4. La Batterie Nickel-NaCl**

Simple, de très forte capacité pouvant subir un très grand nombre de cycles et extrêmement robustes. Ces accumulateurs fonctionnent malheureusement à 200°C et nécessitent qu'une partie de l'énergie soit utilisée pour les maintenir à cette température. Leur développement est provisoirement arrêté mais pourrait bien reprendre. [37]

### **3.3.1.5. La Batterie Nickel-Zinc**

Dans le contexte actuel de souci environnemental, le remplacement du Cadmium par le Zinc serait le bienvenu et ces batteries ont une densité d'énergie élevée (25% plus que la batterie NiCd). La tension d'une cellule varie de 1.6 à 1.8 V. La durée de vie reste le problème majeur à résoudre. [37]

Il existe d'autres types de batteries qu'on n'a pas citées. On donne ci-dessous un tableau de comparaison entre quelques différents types batteries.

**Tableau 3 2 Comparaison des caractéristiques techniques des batteries**

Technologie	Plomb	Ni/Cd	Ni/MH	Li/Ion
Energie spécifique (Wh/kg)	35-50	50-60	70-95	60-130
Puissance spécifique (W/kg)	80-150	150-400	200-1000	500-4000
Rendement (%)	>80	75	70	>95
Nombre cycle	500-1000	800	750-1200	1000
Avantages	Faible coût	Fiabilité Performances à froid	Très bonne densité d'énergie	Excellente puissance et énergie
Inconvénient	Durée de vie	Toxicité	Comportement	Le coût élevé

La plupart des utilisateurs de générateurs d'électricité en sites isolés utilisent des batteries (photovoltaïque, éolienne.). La batterie au plomb - acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus couramment utilisée, en raison de son :

- faible coût.
- bon rendement.
- meilleur compromis en termes de cout / performance / entretien.

- sa durée de vie.
- caractéristiques électrochimiques favorable.
- une large disponibilité.
- entretien faible ou nul.
- bonne tenue aux températures extrêmes.

### **3.3.1.6. La Batterie au plomb**

#### **3.3.1.6.1. Historique**

C'est en 1859 que Gaston Planté réalisa l'accumulateur au plomb par formation de feuilles de plomb pur, dans de l'acide sulfurique et sous l'influence d'un courant électrique. Il fallut cependant attendre l'apparition en 1880 de la dynamo Gramme et la réalisation de l'accumulateur à grilles et à oxyde rapporté pour que l'industrie de l'accumulateur commence à se développer. [39]

#### **3.3.1.6.2. Paramètres de la batterie au plomb**

On peut classer les paramètres de la batterie en 2 groupes :

- les accessibles représentés par les données physiques visibles et mesurables depuis l'extérieur de la batterie (température, tension, courant, impédance, et quantité d'énergie stockée « capacité») : ce sont ces grandeurs qui intéressent l'utilisateur et servent à définir les caractéristiques des accumulateurs. Parmi ces grandeurs nous différencierons les grandeurs externes (courant et tension) et internes (résistance et l'état de charge).
- les inaccessibles qui sont des grandeurs internes qui concerne la chimie et représentent l'état de l'accumulateur (quantité de matière active, la densité de l'électrolyte, pression interne).

**3.3.1.6.3. Constitution**

Une batterie au plomb acide est un ensemble d'éléments de 2 volts connectés en série pour obtenir la tension d'utilisation désirée. Ces éléments sont constitués de plaques positives et négatives, assemblées en alternance, ces plaques sont recouvertes de matières actives - bioxyde de plomb pour la positive et plomb spongieux pour la négative. Ces électrodes plongent dans une solution d'acide sulfurique, la quantité de matières formées donne une capacité plus ou moins grande.

Le nombre de plaques de chaque polarité, leur surface, ainsi que la quantité d'acide disponible dans l'électrolyte (composé chimique liquide ou gélifié dont le rôle est de fournir les ions sulfates nécessaires aux réactions d'oxydoréduction produites lors des recharges et décharges d'une batterie) sont des paramètres qui définissent la capacité de l'élément (aptitude pour une batterie chargée de restituer un certain nombre d'ampères heure, en régime de courant de décharge constant, sous une tension d'arrêt et une température définies).

**3.3.1.6.4. Technologie**

Il existe quatre gammes de batteries stationnaires au plomb. Elles se différencient par le type de construction de l'électrode positive. Il s'agit en particulier des éléments à plaques positives :

- A grande surface : la masse active à la même composition que le matériau porteur, grâce à la surface lamellée de la plaque, la surface est multipliée de 8 à 12 fois % à celle de la plaque de Pb lisse, la plaque à grande surface a un bon comportement à courant élevé.

- La tubulaire : la masse active se trouve entre la tige et le petit tuyau. Les plaques tubulaires sont appropriées aux décharges de plusieurs cuves et ce, grâce à l'optimisation de la masse active.

- A tige : elles se composent de tiges de plomb disposées verticalement enfilées dans des pochettes. La masse active se trouve dans l'espace entre la tige de plomb et la pochette. La plaque à tige est une version améliorée de la plaque tubulaire. Elle a les avantages de la plaque tubulaire et de la grande surface.

•A grilles : elles sont constituées d'une grille de plomb, dans laquelle est empâtée la masse active.

### 3.3.1.6.5. Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'un générateur électrochimique est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction chimique d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est en effet susceptible de donner naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées. Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système. Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire.



Si cette réaction est décomposée en deux réactions partielles, simultanées, distinctes dans l'espace, dont l'une donne lieu à une capture et l'autre à une libération d'électrons, l'échange de ces électrons s'effectue alors par un courant extérieur et fournit de l'énergie électrique.



L'électrolyte doit avoir une conductibilité électronique nulle (sous peine de court-circuiter les électrodes) et être dissocié en ions porteurs de charges électriques. Le passage du courant dans l'électrolyte est dû au déplacement des ions sous l'influence du champ électrique existant entre les électrodes.

Durant la charge, l'acide est éliminé des plaques. Les pores en premier temps absorbent l'acide, ce qui entraîne une plus grande densité de l'acide interne aux pores à l'acide externe. Donc il va avoir un gradient de concentration de l'intérieur vers l'extérieur.

Le chemin de la diffusion devient plus long, la conversion chimie déplace de plus en plus vers l'intérieur donc la densité de l'acide interne augmente ainsi que la tension de l'élément. Quand la tension de charge atteint 2,35 – 2,40 V, il se produit en plus de la transformation (du sulfate de plomb en PbO<sub>2</sub> à l'électrode positive; une décomposition de l'eau sur l'électrode négative. La tension augmente jusqu'à une valeur stable, la grandeur de cette valeur dépend du courant de charge, de la température, de la conception et de l'âge de l'élément. Des particules de la masse active sont arrachées par le fort dégagement gazeux de la dernière étape de charge. Des résidus s'accumulent dans la cellule. Le courant de charge ne doit pour cela en aucun cas être dépassé. L'effet principal durant la décharge réside dans la réduction du PbO<sub>2</sub> à l'électrode positive et l'oxydation du Pb à l'électrode négative. La sulfatation résulte de ces deux effets.

La densité est le paramètre le plus simple pour définir l'état de charge et de santé d'un élément. La densité de l'électrolyte dans un accumulateur au plomb-acide est fonction de la concentration d'acide sulfurique, de l'état de charge et de la température. Pour les batteries à usage solaire, la densité haute peut varier ,4 V pour les batteries stationnaires à 1,30 V pour les batteries à plaques planes (type démarrage à proscrire pour des installations photovoltaïques, car elles ne supportent pas les cyclanes). En fin de décharge, la densité peut avoisiner 1,15. Arrivée à 1.10, la batterie n'est plus rechargeable.

Le relevé de la densité, facile d'apparence, peut poser des problèmes. Au moment de la mesure, la température de l'électrolyte doit être relevée pour avoir des valeurs comparatives, les densités nominales étant annoncées pour une température de référence (la densité décroît lorsque la température monte). Avant d'effectuer la mesure, il faut homogénéiser l'électrolyte soit par brassage mécanique (on envoie des bulles d'air par le bas de l'élément) soit en provoquant une surcharge (production massive de gaz). Ces conditions de relevés maîtrisées, il faut tenir compte de l'âge de la batterie car en vieillissant, une partie de l'acide absorbé par la sulfatation irréversible et l'oxydation des grilles, n'est plus restitué à l'électrolyte. Il s'ensuit une baisse de densité qui s'accroît au fur et à mesure que la batterie vieillit.

### 3.3.1.6.6. Définir la capacité de stockage des batteries au plomb

La première question à se poser est la question de la capacité de stockage d'énergie solaire ou éolienne, dont vous avez besoin.

La capacité d'une batterie solaire est exprimée en Ampères Heure (Ah) ce qui désigne le débit totale d'énergie de la batterie dans des conditions données (10 heures, 20 heures, ...)

Avec un régulateur solaire (qui se branche entre les panneaux solaires et la batterie), vous réglez la charge de la batterie, qui ne doit pas dépasser 90%, ni ne doit descendre sous les 40%, car une surcharge comme une décharge trop profonde endommage ces batteries et diminue leur durée de vie.

### 3.3.1.6.7. Détermination la tension de l'installation éolienne

Il faut déterminer la tension de stockage de l'énergie éolienne : 12V, 24V ou 48V.

La règle pour cela est assez simple : plus vous utilisez d'énergie, plus vous devez utiliser une tension élevée, afin de diminuer les déperditions d'énergie, qui surviennent quand l'énergie est transportée ou stockée.

On peut conseiller les trois cas suivants :

**Tableau 3 3 Détermination la tension de votre installation éolienne**

Puissance de l'installation éolienne	Tension recommandée
De 0 à 800 WC	12 V
De 800 à 1600 WC	24 V
Au-dessus de 1600 WC	48 V

Le montage des batteries se fait en série ou en parallèle le pour augmenter la tension ou la capacité :

- Le montage en parallèle (qui consiste à relier les bornes "+" aux bornes "+" et les bornes "-" aux bornes "-") permet d'additionner les capacités de stockage (en Ah) tout en conservant la même tension (en Volts).

- Le montage en série permet d'additionner la tension des batteries, en revanche la capacité en Ah reste celle d'une seule batterie

### **3.4. Grandeurs caractéristiques des Batteries**

#### **3.4.1. Capacité de stockage**

La capacité de stockage  $C$  exprimée en ampères-heures représente la quantité de charge qu'il est possible d'obtenir lors d'une décharge complète de la batterie, initialement chargée, avec un courant constant. La nomenclature utilisée pour désigner la capacité de stockage obtenue pour une décharge de  $n$  heures est  $C_n$ . De manière générale, lorsque l'on parle d'une capacité  $C_5$ , cela revient à évoquer la quantité de charge obtenue lors d'une décharge de 5 heures. De même, lorsque l'on parle d'une capacité  $C_{0.5}$ , cela revient à désigner la quantité de charge mesurée pendant une décharge de  $\frac{1}{2}$  heure. [40]

#### **3.4.2. Rendement**

##### **3.4.2.1. Rendement faradique**

Le rendement en ampères-heures (ou faradique)  $\eta_f$  est le rapport entre la quantité d'électricité débitée à la décharge  $C_d$  et la quantité d'électricité fournie lors de la charge  $C_c$  (Ah récupérés lors de la décharge/ Ah fournis pendant la charge).

##### **3.4.2.2. Rendement énergétique**

La définition du rendement énergétique est analogue à celle du rendement faradique à la différence que les grandeurs mises en jeu sont des énergies et non des quantités de charge. [40]

#### **3.4.3. La durée du vie**

La durée de vie d'une batterie solaire ou éolienne s'évalue en nombre de cycles de charge/décharge qu'elle est capable de supporter. On dit "estimer" car il s'agit d'une donnée basée sur un niveau de décharge et sur des conditions atmosphériques données.

La durée de vie d'une batterie solaire ou éolienne dépend d'abord de la technologie utilisée : plomb ouvert, AGM, GEL.

Ensuite les batteries solaires ou éoliennes vieillissent en raison des charges et décharges : le nombre de cycles dépend principalement de la profondeur habituelle de décharge.

Pour vous donner un ordre d'idée, pour des décharges de l'ordre de 40%, on peut estimer les durées de vie suivantes pour les différents types de batteries à décharge lente :- Batterie solaire au plomb ouvert : 400 à 500 cycles  
- Batterie solaire AGM : 600 à 700 cycles  
- Batterie solaire GEL : 800 à 900 cycles

Le cycle démarre quand la batterie est pleine. La batterie est déchargée puis la batterie est rechargée, Ce cycle se termine quand la batterie est à nouveau pleine.

### **3.5.Conclusion**

Le présent chapitre est consacré à la présentation d'un aperçu sur les différents modes de stockage, notamment, le stockage électrochimique et ses constituants, les différentes grandeurs caractéristiques d'une batterie, tel que l'état de charge. Nous avons par la suite présenté une brève comparaison entre les systèmes de stockage et décrit de façon détaillé le fonctionnement du système de stockage choisi.

- Les accumulateurs au plomb sont les systèmes commercialement disponibles, offrant les plus fortes capacités;15 000 Ah

# **Chapitre 4**

## **Partie de Réalisation**

**4.1.Introduction**

Dans ce chapitre on présente les composants qui ont servi à améliorer la conception de la turbine éolienne, et présenter les étapes de réalisations du projet et certain composants supplémentaires,

**4.2.Choix des matériaux**

- 3 pales à l'aluminium pour fabriquer la turbine.
  
- Les poulies de l'aluminium pour réaliser le multiplicateur
  
- L'arbre d'acier.
  
- La génératrice a aimant permanent.
  
- Les roulements.
  
- Système de rotation pour détecter le vent.
  
- Les paliers à roulement.
  
- La courroie : nous l'avons choisie par ce qu'elle est silencieuse, elle a une vitesse élevée et un grand entraxe.

**4.3.Réalisation des pales**

La taille des pales varie d'une éolienne à l'autre. Elles mesurent généralement entre 2 et 10 mètres de diamètre.

Les pales ne peuvent convertir au mieux que la moitié du vent puissance totale en puissance mécanique. En pratique seulement environ 25 -35% est un chiffre plus typique pour les maisons des pales de rotor. Voici une règle simple:

Puissance de pale =  $0,15 \times \text{Diamètre}^2 \times \text{Vitesse du vent}^3$

=  $0,15 \times (2,4 \text{ mètres})^2 \times (10 \text{ mètres / seconde})^3$

=  $0,15 \times 6 \times 1000 = 900 \text{ watts environ}$

(Rotor de 2,4 m de diamètre à 10 mètres/s)

Le diamètre est très important. Si vous doublez le diamètre, vous obtiendrez quatre fois plus beaucoup de puissance. C'est parce que la turbine est capable de capter plus de vent.

La vitesse du vent est encore plus importante. Si vous pouvez obtenir le double de la vitesse du vent, vous obtenez huit fois plus de puissance.

### **4.3.1. La vitesse des pales**

Les pales de rotor sont conçues pour la vitesse, par rapport à le vent. Cette relation est connue sous le nom de «rapport de vitesse de pointe» (tsr). Le rapport de vitesse de la pointe est la vitesse à laquelle les pales se déplacent divisé par la vitesse du vent à ce moment-là. Dans certains cas, les extrémités des pales bougent plus vite que le vent par un rapport de jusqu'à 10 fois. Mais cela prend à plus de 200 mi / h, ce qui entraîne un fonctionnement bruyant et érosion rapide des bords des aubes. Elle recommander un bas rapport de vitesse de pointe, environ 7.

#### **Exemple :**

Nous construisons un rotor de diamètre 2.4 mètres. Nous voulons savoir quel RPM il fonctionnera au mieux dans un vent de 3 m / s au début de la production pouvoir utile.

$\text{RPM} = \text{vitesse du vent} \times \text{tsr} \times 60 / \text{circonférence}$

=  $3 \times 7 \times 60 / (2,4 \times 3,14) = 167 \text{ tours / minute}$

Basé sur ce qui précède, nous avons apporté trois pales d'aluminium qui ont pris d'un ventilateur domestique (figure IV) de Longueur 6300mm, Pour une meilleure performance de l'éolienne nous avons choisir Une hélice tri-pales semble. Couple nettement plus élevé au démarrage et vitesse de rotation proche des bi-pales. Le couple est plus élevé, avantage non négligeable lors de vents relativement faibles.



**Figure 4 1 Les pales d'éolienne**

#### **4.4.Le support**

Les supports hélice sur axe moteur seront fabriqués idéalement en acier (figure IV.2) Ce type de support sera utilisé notamment pour adapter l'axe multiplicateur vers les supports fixes des pales variables. On va fixer les 3 pales sur le supporte et après on le fixée solidement sur un axe fou, sans retenues, nous vérifions son traçage (pales de même longueur) et surtout la conformité des angles qui doivent être absolument de 120 degrés de pale à pale (figure IV.2)

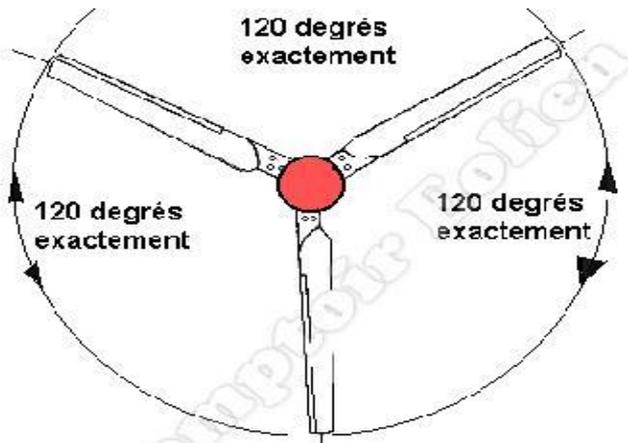


Figure 4 2 Le support des pales

#### 4.5.Le multiplicateur de vitesse

Il a fallu chercher plusieurs systèmes de transmission qui à partir d'une de rotation d'environ 10 tours par minute puisse faire tourner l'axe du générateur à 1000 tours/min. Deux solutions réalisant la même fonction :

- La poulie
- L'engrenage

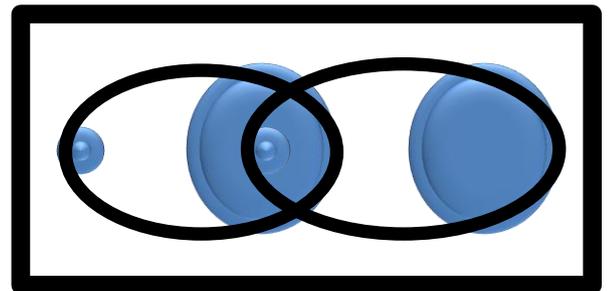


Figure 4 3 Le multiplicateur de vitesse

Pour faire Notre multiplicateur de vites (Figure IV.3) Nous avons apporté trois poulies 1<sup>er</sup> de 1500 mm et le 2<sup>e</sup>me de 5000 mm donc on faire la troisième qui Composé de 2 poulies le 1<sup>er</sup> de 5000mm et le 2<sup>em</sup>me de 1500mm entre le 1<sup>er</sup> et le 2<sup>em</sup>me pour assurer le processus de multiplication a 9 fois Cela dépend de Le rapport de multiplication :

$$r = \frac{\text{roues menantes}}{\text{roues menées}} = \frac{15}{5} = 3 \text{tr} \text{ et pour les } 2^{\text{me}} \text{ poulies } \left(\frac{15}{5} = 3 \text{tr}\right) 3 = 9 \text{tr}$$

#### 4.6. Les paliers à roulement

Nous les utilisons pour fixe l'axe des poulies a la cage de multiplicateur comme il est indiqué sur le (figure IV.4)



Figure 4 4 Les paliers à roulement

#### 4.7. La génératrice (à aimant permanent)

L'alternateur est l'un des éléments essentiels de notre éolienne car c'est lui qui va transformer l'énergie mécanique de l'éolienne en énergie électrique. Il est composé d'un stator (bobinage) et d'un rotor (magnétique). La caractéristique d'auto excitation du lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé.

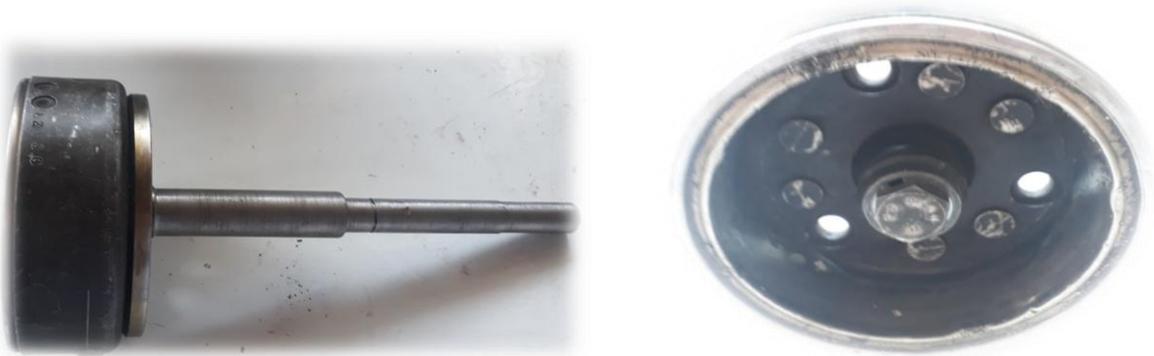
Dans notre maquette nous avons utilisé :

- un bobinage (stator) (figure 4.5)



Figure 4 5 bobinage (stator))

- Volant magnétique (rotor) (figure 4.6) d'un motocycle



**Figure 4 6 Volant magnétique (rotor)**

On les fabriqué et les positionné dans une cage fige (4.7).



**Figure 4 7 La génératrice (à aiment permanent)**

#### **4.8.Le Régulateur**

Le régulateur de charge/décharge est associé à un générateur éolien, il a pour rôle, de contrôler la charge de la batterie et de limiter sa décharge. Sa fonction est primordiale car elle a un impact direct sur la durée de vie de la batterie (Figure 4.8).

Les régulateurs de charge sont indispensables pour assurer : une durée de vie plus longue à la batterie, de bonnes performances de la batterie, une protection du système de production (génératrice éolienne) en évitant les décharges.

Le contrôleur de charge intervient aussi quand les batteries sont pleines. Ce dispositif électronique :

- permet de contrôler et piloter le processus de charge,



**Figure 4 8 Le Régulateur**

- est situé entre le système de production d'électricité et la batterie,
- Protège les batteries de surcharges.

### 4.9. Les batteries

L'électricité doit être consommée au moment même de sa génération. Notre travail consiste un système de stockage, et on a opté pour une batterie au plomb et cela pour les avantages qui contient.

### 4.10. Conclusion

Ce chapitre nous a permis dans un premier temps de dimensionner l'éolienne et de trouver les éléments susceptibles de parvenir à sa réalisation. Le dimensionnement de l'éolienne n'a pas été chose facile, vu que nous ne disposons pas de laboratoire adéquat pour pouvoir mener une étude approfondie dans la réalisation de l'éolienne, ce qui nous oblige à fixer bon nombre d'hypothèse pour faciliter le dimensionnement.

# Conclusion général

---

## Conclusion général

Le travail décrit dans ce mémoire avait pour principal objectif l'étude et réalisation d'une turbine éolienne de type tripal.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis les réductions des couts, la filière éolienne occupe actuellement une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays. Cette source d'énergie a l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants ni gaz à effet de serre et qu'il ne génère pas de déchets.

Dans le contexte d'énergie éolienne un état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne est présenté dans le deuxième chapitre. La production de l'énergie éolienne est de plus en plus importante et alors de nouvelles constructions apparaissent. Cette évolution dynamique est surtout visible dans le domaine du grand éolien grâce au développement de nouvelles technologies telles que les matériaux de construction, l'électronique de puissance et les techniques de commande. Le pouvoir politique est aussi dans une grande partie moteur de développement durable.

Le premier chapitre une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans l'Algérie et le monde.

Dans le deuxième chapitre nous a permis de Soumettre un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés.

Dans le troisième chapitre, on a présenté quelques généralités sur les systèmes de stockage d'énergie électrique, et en particulier les batteries et leur principe de fonctionnement, les caractéristiques, ainsi que les différents modèles de batteries existant dans la littérature en particulier modèle de batterie au plomb.

## **Conclusion général**

---

Dans le quatrième et dernier chapitre nous a permis de réaliser éolienne et Les différentes modifications apporté au projet ont été effectué dans le but d'améliorées performances aérodynamiques de l'éolienne et d'augmenter son rendement optimal

## Bibliographe

---

### Référence

- [1] HATEM.S ; KACHEBI.Y ; « Etude énergétique et réalisation d'une turbine éolienne à axe vertical de petite puissance » ; mémoire de fin d'étude ; A/MIRA de Bejaïa ; 2013
- [2] DJEMATI Djemaa ; « étude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l'éolienne » ; mémoire de magistère en physique ; université de BATNA ; 2011.
- [3] Frédéric POITIERS ; « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » ; thèse de doctorat ; université de Nantes ; 2003.
- [4] 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.
- [5] TOUAL BELKACEM « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation, Application à un Système Eolien à Vitesse Variable» mémoire de magister Université de Batna, 2010.
- [6] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C. NICHITA «état de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002.
- [7] M. JOURIEH «développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien» Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.
- [8] BOUMAH RAT M. et J. Gourdin « Méthodes Numériques Appliquées ». Office des Publications Universitaires (OPU), Algérie, 1983
- [9] association mondiale de l'éolien: GWEC .
- [10] Portail des Energies Renouvelables en Algérie (portail.cder.dz)
- [11] WWEA « Rapport Mondial sur l'Energie Eolienne 2008 », Fév. 2009, Allemagne.
- [12] TIR ZOHEIR «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade» mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Sétif, 2010.
- [13] WWEA «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» April 2011.

## Bibliographe

---

[14] <https://windeurope.org>

[15] HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.

[16] M. LOPEZ «contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée» Thèse de Doctorat de l'Université de Paris-sud11.

[17] TOUAL BELKACEM « Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice.

[18] Frédéric POITIERS ; « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne » ; thèse de doctorat ; université de Nantes ; 2003.

[19] 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.

[20] ARMAND BOYETTE «contrôle commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec un système de stockage pour la production éolienne» thèse de doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy, 2006.

[21] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, B. DAKYO, C. NICHITA «état de l'art dans les aérogénérateurs électriques» paru mai en 2002.

[22] B. MULTON, G. ROBIN, O. GERGAUD, H. BEN AHMED «Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne » JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003.

[23] M. BOUDIA Sidi Mohammed, "Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie", Mémoire de Doctorat de Université de Tlemcen Abou-Bakr Blekaïd dans 2011.

[24] BOUHEDDA Ali ; « contribution à l'étude de systèmes de commande d'une éolienne » ; mémoire de magistère en électrotechnique ; univ Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou ; 2011.

## Bibliographe

---

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

[26] Abdelli Radia « commande linéaires et non linéaire d'une génératrice asynchrone dans un système d'énergie renouvelable », thèse de doctorat de l'université A/Mira de Béjaïa, algérie.2014

[27] Boukhezzar, B. (2006). "Sur les Stratégies de Commande pour l' Optimisation et la Régulation de Puissance des Eoliennes à Vitesse Variable" , PhD Thesis, Université de Paris XI, France

[28] Belhadj Mohammed, « Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome ». Centre Universitaire De Bechar, Mémoire De Magister.

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

[30] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado,USA, June 6 à12, 2004.

[31] E. Golding, The generation of electricity by wind power, Haldsted Press, New York, 1976.

[32] R. Ramakumar, Albrecht Naeter, « Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas », IEEE – PES general meeting Denver, Colorado, USA, June 6 à12, 2004.

[33] Technique de l'ingénieur D 3 960.

[34] Technique de l'ingénieur BM 4 640.

[35] A.S. Neris, N.A. Vovos, G.B. Giannakopoulos, « A variable speed wind energy conversion scheme for connection to weak AC systems », IEEE transactions on energy conversion, vol. 14, N° 1, march 1999, pp. 122-127.

## Bibliographe

---

[36] B. Raison, A. Morales, M. Crappe, « L'énergie électrique éolienne, partie I : présentation générale et approche probabilistique », revue internationale de génie électrique, vol. 5/3-4 – 2002, pp. 405-484.

[37] 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.

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

[39] C. Haritza, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable ». Doctorat, E.N.S.A.M Paris, décembre 2003.

[40] Abdelli Radia « commande linéaires et nos linéaire d'une génératrice asynchrone dans un système d'énergie renouvelable », thèse de doctorat de l'université A/Mira de béjaia, algerie.20