

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

*Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj*

*Faculté des Sciences et de la technologie*

*Département d'Electromécanique*

# *Mémoire*

*Présenté pour obtenir*

**LE DIPLOME DE MASTER**

**FILIERE : Electromécanique**

**Spécialité : Automatique & Informatique Industrielle**

Par

➤ **Ouali Abdellatif**

*Intitulé*

## *Etat de l'Art sur les Convertisseurs Dynamiques & Statiques utilisés dans la production éolienne*

*Soutenu le :*

*Devant le Jury composé de :*

<i>Nom &amp; Prénom</i>	<i>Grade</i>	<i>Qualité</i>	<i>Etablissement</i>
<i>Mr. Chouder Adel</i>	<i>MCB</i>	<i>Président</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mr. Merabet Elkheir</i>	<i>Pr</i>	<i>Encadreur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mr. Zebiri Fouad</i>	<i>MCB</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>
<i>Mr. Reffas Abderrahim</i>	<i>MCA</i>	<i>Examineur</i>	<i>Univ-BBA</i>

*Année Universitaire 2021/2022*

## Remerciements

Nos remerciements pour notre DIEU le tout puissant le très Miséricordieux, de nous avoir donné la force pour la réalisation de ce Modeste travail.

Merci à notre aimable famille de nous avoir soutenue tous ce temps.

Merci pour nos professeurs, surtout pour notre cher professeur Elkheir Merabet pour son encadrement, sa patience et son aide jusqu'à l'achèvement de ce travail.

Nous remercions vivement toutes les personnes qu'elles ont contribué de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

---

## **Dédicace**

*à mes parents,  
à mon frère et  
ma petite sœur,  
à toute ma famille,  
à mes amis,  
je dédie ce mémoire.*

***Ouali Abdellatif***

---

# Table des matières

Table des matières	i
Table des Figures	iii
Symboles & Abréviations	v
Introduction Générale	1
1 Energie renouvelable & Energie eolienne	
1.1 Introduction	3
1.2 Les différentes sources d'Énergies Renouvelables	4
1.2.1 L'énergie solaire photovoltaïque	4
1.2.2 Le solaire thermique à basse température	5
1.2.3 Le solaire thermique à haute température	6
1.2.4 La Biomasse	6
1.2.5 L'énergie Hydraulique-Hydroélectricité	7
1.3 L'énergie éolienne	8
1.3.1 Historique de l'énergie éolienne	8
1.3.2 L'aérogénérateur	11
1.3.3 Types d'aérogénérateurs	11
1.3.3.1 Aérogénérateurs à axe vertical	11
1.3.3.2 Aérogénérateurs à axe horizontal	13
1.3.4 Les différentes composants d'éolienne	15
1.3.4.1 Les différentes parties de l'éolienne	16
1.3.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne	17
1.3.6 Les différentes installations des éoliennes	18
1.3.6.1 L'éolienne offshore	18
1.3.6.2 L'éolienne onshore	19
1.4 Conclusion	21
2 Les Convertisseurs Dynamiques	
2.1 Introduction	22
2.2 Conversion de l'énergie cinétique à l'énergie mécanique	22
2.2.1 Loi de BETZ	22
2.2.2 Puissance récupérable par l'éolienne	25
2.2.3 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	26
2.3 Les Multiplicateur de vitesse utilisé dans les Aérogénérateurs	27
2.4 La Conversion électromécanique	29
2.4.1 Système utilisant la machine Asynchrone	29
2.4.1.1 Définition la machine Asynchrone	29
2.4.1.2 Génératrice Asynchrone à cage d'écureuil	30



2.4.1.3	Génératrice Asynchrone à rotor bobiné .....	32
2.4.1.4	Génératrice Asynchrone à double alimentation (MADA) .....	33
2.4.2	Système utilisant la machine Synchrone .....	34
2.4.2.1	Définition la machine Synchrone .....	34
2.4.2.2	Génératrice Synchrone à rotor bobiné ou à aimants .....	35
2.4.2.3	Génératrice Synchrone à aimants permanents discoïde .....	35
2.4.2.4	Génératrice Synchrone vernier à aimants .....	37
2.4.3	Avantages & Inconvénients de chacune des génératrices .....	38
2.5	Conclusion .....	41
3	Les Convertisseurs Statiques	
3.1	Introduction .....	42
3.2	Les Convertisseurs Statiques .....	42
3.2.1	Le Convertisseur Alternatif/Continue (Redresseur) .....	43
3.2.2	Le Convertisseur Continue/Alternatif (Onduleur) .....	46
3.2.3	Contrôle du courant par M.L.I .....	48
3.2.4	M.L.I à échantillonnage naturel .....	49
3.3	Configuration avec le Réseau .....	50
3.3.1	A vitesse Fixe .....	50
3.3.2	A vitesse Variable .....	50
3.3.3	Systèmes utilisant la machine Synchrone .....	51
3.3.4	Systèmes utilisant la machine Asynchrone .....	52
3.3.4.1	Machine Asynchrone à cage d'écureuil .....	52
3.3.4.2	Machine Asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance .....	53
3.3.4.3	Machine Asynchrone à double alimentation type « Rotor bobiné » .....	54
3.3.4.3.1	Structure de Kramer .....	54
3.3.4.3.2	Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur .....	55
3.3.4.3.3	Structure de Scherbius avec convertisseurs M.L.I .....	56
3.4	Conclusion .....	58
	Conclusion Générale	59
	Bibliographie	61

## Table des Figures

1.1	Description d'une cellule photovoltaïque .....	5
1.2	Chauffe-eau Solaire .....	6
1.3	Evolution des dispositifs éoliennes de l'Antiquité à nos jours .....	9
1.4	Correspondance taille-puissance des éoliennes .....	11
1.5	Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus) .....	12
1.6	Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius) .....	13
1.7	Eoliennes à axe horizontal .....	14
1.8	Types d'éoliennes à axe horizontal .....	14
1.9	Composition d'une éolienne .....	16
1.10	Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW.....	16
1.11	Principe de la conversion d'énergie .....	18
1.12	Parc éolien offshore .....	19
1.13	Parc éolien onshore .....	20
2.1	Tube de courant autour d'une éolienne .....	23
2.2	Coefficient de puissance .....	24
2.3	Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée .....	25
2.4	Caractéristique puissance/vitesse d'une éolienne .....	26
2.5	multiplicateurs à couple conique .....	27
2.6	Multiplicateur à engrenages cylindriques à trois étages .....	27
2.7	multiplicateurs à satellite .....	28
2.8	train plan (a), et train sphérique (b) .....	28
2.9	Structure d'un rotor en cage d'écureuil .....	30
2.10	Schématisation d'une machine asynchrone à cage à écureuil .....	32
2.11	machine asynchrone à rotor bobiné .....	33
2.12	Machine Asynchrone à double alimentation (MADA) .....	34

2.13	Machines à flux radial (a), à flux axial (b) .....	35
2.14	Machine à flux axial .....	36
2.15	Machine synchrone à aimant permanent .....	36
2.16	Machine synchrone vernier à aimants .....	37
3.1	Schéma de principe de la conversion Alternatif – Continue (AC/DC) .....	43
3.2	Redresseur non commandé .....	44
3.3	Redresseur semi-commandé .....	44
3.4	Redresseur commandé .....	45
3.5	Topologies des différents types des convertisseurs AC-DC .....	45
3.6	Schéma de principe de la conversion continu – alternative (DC/AC) .....	46
3.7	Schéma synoptique d'un MLI .....	48
3.8	M.L.I à échantillonnage naturel .....	49
3.9	Eolienne à vitesse fixe .....	50
3.10	Eolienne à Vitesse Variable .....	51
3.11	Système éolien à base d'une machine synchrone et des convertisseurs Statiques .....	52
3.12	Machine asynchrone avec liaison directe au réseau .....	53
3.13	Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un redresseur-onduleur.....	53
3.14	Machine asynchrone à rotor bobiné .....	54
3.15	Structure de KRAMER pour la MADA .....	55
3.16	Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur .....	56
3.17	Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI .....	57

## Symboles & Abréviations

$v_1$	La vitesse du vent en amont
$v_2$	La vitesse du vent en aval
$\rho$	La densité de l'air
S	La surface des pales
$P_m$	La puissance
m	La masse
$C_p$	Coefficient de puissance
$\lambda$	La vitesse relative
$\lambda_{opt}$	La vitesse spécifique
$P_n$	La puissance nominale
$V_n$	Le vent nominale
$V_d$	La vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie
$V_m$	La vitesse maximale du vent

## Introduction Générale

Face à une demande croissante d'énergie et à l'épuisement à plus ou moins long terme des énergies fossiles, différentes solutions de substitution ont été envisagées. Suite aux crises pétrolières, certains pays ont mené une politique orientée vers le nucléaire alors que d'autres ont massivement utilisé les énergies renouvelables avec l'adoption de l'éolien.

Les gisements des ressources énergétiques traditionnelles, d'origines principalement fossiles, ne peuvent être exploités que pour quelques décennies, ce qui laisse présager d'une situation de pénurie énergétique au niveau mondial de façon imminente.

D'autre part, les déchets des centrales nucléaires posent d'autres problèmes en termes de pollution des déchets radioactifs, du démantèlement prochain des vieilles centrales et du risque industriel.

Pour subvenir aux besoins en énergie de la société actuelle, il est nécessaire de trouver des solutions adaptées et de les diversifier. Actuellement, il y a principalement deux façons possibles d'agir. La première est de diminuer la consommation des récepteurs d'énergie et augmenter la productivité des centrales énergétiques en améliorant respectivement leur efficacité. Une deuxième méthode consiste à trouver et développer de nouvelles sources d'énergie. Des recherches sont en cours dans le domaine de la fusion des noyaux atomiques qui, éventuellement, pourraient être une solution énergétique du futur, mais l'avenir de cette filière et encore moins son avènement ne sont assurés.

Les types de modèles utilisés dans le domaine des énergies nombreux, parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : les énergie renouvelables sont d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique, ..).

Il existe alors différentes sortes d'énergie renouvelable dont on s'intéressera dans ce mémoire plus particulièrement à l'énergie éolienne, nous allons décrire les différents types d'énergie renouvelable. Notamment, on étudie les éoliennes plus précisément la partie des convertisseurs dynamiques & statiques.

Le présent travail sera réparti en trois chapitres, le premier chapitre sera consacré à la présentation des diverses définitions concernant les types de l'énergie renouvelables, notamment l'énergie éolienne qui sera bien détaillé dans la deuxième partie de chapitre1.

Avec un bref historique de l'énergie éolienne ainsi que les deux installations d'éolienne (onshore-offshore).

Le deuxième chapitre sera consacré aux différents types des convertisseurs dynamiques d'éolienne, en citant les avantages et les inconvénients de chaque type.

Dans le dernier chapitre, sera destiné à étaler les convertisseurs statiques et leur type, Ainsi que la configuration des deux convertisseurs (dynamiques & statiques) avec le réseau électrique.

Notre modeste travail sera couronné par une conclusion générale.

# Energie Renouvelable & Energie Eolienne

## 1.1 Introduction

Ces dernières années, l'intérêt dans l'utilisation des énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux.

Une énergie renouvelable est une énergie qui se renouvelle pour être considérée comme inépuisable à l'échelle de l'homme.

Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers ou constants provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la Lune (marée) et la Terre (énergie géothermique) [Red09].

Parmi ces sources ; l'énergie éolienne qui représente un potentiel assez important non pas pour remplacer les énergies existantes mais pour palier à l'accroissement de la demande de plus en plus galopante.

Le fonctionnement de l'énergie éolienne se fait en deux étapes :

-La première étape sert à la conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique sous forme d'une rotation via une turbine éolienne.

-La deuxième étape est la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique via une génératrice électrique, cette dernière peut être connectée au réseau électrique qui fonctionne d'une manière autonome.

## 1.2 Les différentes sources d'Énergies Renouvelables

Les énergies renouvelables permettent de produire soit de la chaleur seule, eau chaude pour le chauffage ou la production d'eau chaude sanitaire (géothermie, bois, énergie solaire, biogaz utilisé en chaudière), soit de l'électricité seul (éolien, biogaz utilisé dans des moteurs, solaire photovoltaïque, hydroélectricité...) soit en cogénération (biogaz dans des moteurs avec récupération de chaleur sur le circuit de refroidissement, turbines à vapeur à partir de bois, biogaz, géothermie.....).

### 1.2.1 L'énergie solaire photovoltaïque

Les cellules solaires, également appelées cellules photovoltaïques (PV), convertissent la lumière solaire directement en électricité. PV tire son nom du processus de conversion de la lumière (photons) à l'électricité (tension), qui est appelé l'effet photovoltaïque.

Ce dernier a été découvert en 1954, lorsque les chercheurs de Bell Téléphone découvrent que le silicium (un élément trouvé dans le sable) à crée une charge électrique lorsqu'il est exposé à la lumière du soleil, de sulfure de cadmium et de tellure de cadmium.

Il y a en effet de plaques fines (couche inférieure et couche supérieure) pour un contact étroit.

La couche supérieure est constituée de silicium et d'autres éléments possédant plus d'électrons qu'une couche de silicium pure, la couche inférieure est constituée de silicium et d'autre élément possédant moins d'électrons qu'une couche de silicium pure. Les panneaux sont montés à un angle fixe faisant face au sud, où ils peuvent être montés sur un dispositif. [Ngu14], [Mes14].



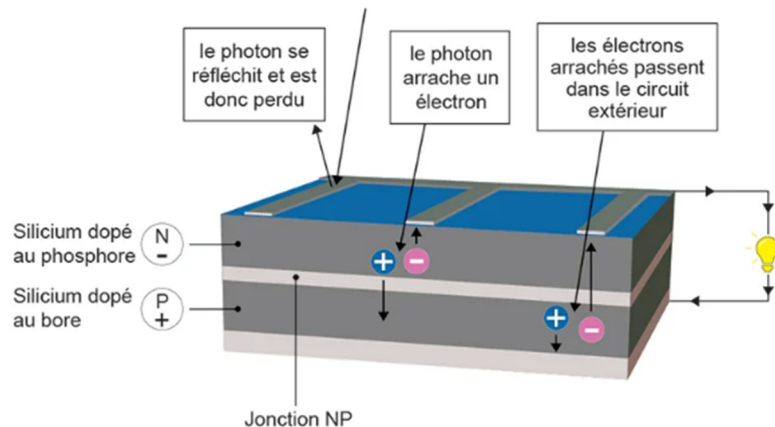


FIGURE 1.1 – Description d'une cellule photovoltaïque.

## 1.2.2 Le solaire thermique à basse température

A partir de 1910 pour les premiers chauffe-eaux solaires sont apparus en Californie, comme beaucoup de filières d'énergie renouvelables, le solaire thermique a connu une phase de croissance importante entre 1973 et 1985 en réaction au choc pétrolier. Mais ce développement rapide, avec des technologies ou des installateurs déficients, a entraîné de nombreuses contre-performances.

Depuis la fin des années 90, quelques pays ont relancés des programmes de soutien au développement du solaire thermique : l'Autriche, l'Allemagne, la Chine et plus récemment l'Espagne.

Les rayons du soleil, piégés par des capteurs thermiques vitrés, transmettent leur énergie à des absorbeurs métalliques-lesquels réchauffent un réseau de tuyaux de cuivre ou circule un fluide caloporteur. Cet échangeur chauffe à son tour l'eau stockée dans un cumulus.

Un chauffe-eau solaire produit de l'eau chaude sanitaire ou du chauffage généralement diffusé par un plancher solaire direct.

Tous les dispositifs qui agissent comme capteurs solaires thermiques sont de plus en plus intégrés dans les projets d'architecture bioclimatique (maisons solaires, serre, murs capteurs, murs trombe....) [Luo14].

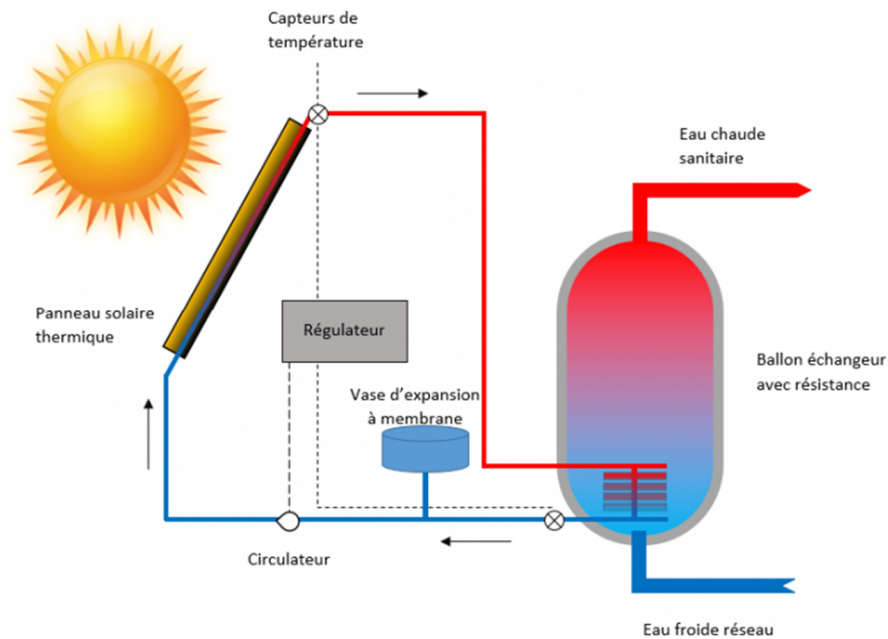


FIGURE 1.2—Chauffe-eau Solaire

### 1.2.3 Le solaire thermique à haute température

La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optiques (jeu de miroirs) permet d'obtenir des températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle.

Cette technologie est néanmoins très peu utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent.

### 1.2.4 La Biomasse

L'énergie biomasse est la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'Homme depuis la découverte du feu à la préhistoire. Cette énergie permet de produire de l'électricité grâce à la chaleur dégagée par la combustion de ces matières (bois, végétaux, déchets agricoles, ordures ménagères organiques) ou du biogaz issu de la fermentation de ces matières, dans des centrales biomasse.

La biomasse est une réserve d'énergie considérable née de l'action du soleil grâce à la photosynthèse. Elle existe sous forme de carbone organique. Sa valorisation se fait par des procédés spécifiques selon le type de constituant.

La biomasse n'est considérée comme une source d'énergie renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation. Par exemple, l'utilisation du bois ne doit pas conduire à une diminution du nombre d'arbres. Il y a trois types d'énergie biomasse

- **Bio énergie** : c'est la plus ancienne source d'énergie utilisée par l'Homme. Et bien que Peu utilisée en Europe aujourd'hui, elle reste la première source d'énergie pour plusieurs milliards de personnes dans le monde (cuisine et chauffage).
- **Le biogaz** : est produit à partir de déchets biodégradables. Il ressemble au gaz naturel, mais n'est pas une énergie fossile
- **Les biocarburants** : sont fabriqués à partir de produits de l'agriculture (blé, colza, maïs, etc.). Ils peuvent être utilisés en remplacement de l'essence, du fioul ou du Gasoil, ou mélangés en petites quantités dans ces carburants [Zhe15].

### 1.2.5 L'énergie Hydraulique-Hydroélectricité

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et « stockable ».

Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique.

Certains pays (dont la France) sont déjà « saturés » en sites hydroélectriques exploitables et ne peuvent pratiquement plus progresser dans ce domaine. Les sites de petite puissance (inférieures à 10kW) sont des solutions très prisées dans les applications aux petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ces sites de production sont un grand avantage.

En Europe en 1999, on comptait environ 10000 MW de puissance hydraulique installée. A l'horizon 2100, cette puissance devrait passer à plus de 13000 MW. Il y a aussi l'énergie éolienne, et nous l'expliquerons en détail dans la deuxième partie de ce chapitre.

## **1.3 L'énergie éolienne**

### **1.3.1 Historique de l'énergie éolienne**

Le mot "Éolienne" tire son origine du mot grec "Éole" (en grec ancien Αἰολός:Aïolis), et qui représente, dans la Grèce antique, le nom du dieu des vents.

L'énergie éolienne est l'une des premières formes d'énergie qui a été exploitée en premier par l'homme. Ses premières utilisations connues remontent vers les années 2000 avant J.C. On note les premières traces de ces machines au Moyen Orient au temps de Hammourabi empire babélien, et en Chine et aussi en Inde vers les années 400 avant J.C. Le moulin à vent est l'ancêtre de l'éolienne. Il est apparu au Moyen-âge et en Europe. Il est du type à axe vertical dans les premiers temps, puis, il est muni de voiles qui s'orientent vers le sens du vent pour mieux capter l'énergie [Mir05].

Au douzième siècle, le premier moulin à pales profilées est apparu. Bien que très simple, il s'agit de la première tentative de recherche aérodynamique des pales. Il est utilisé principalement pour le pompage de l'eau ou pour moudre les grains.

A la renaissance, les chercheurs célèbres tels que Léonard de Vinci s'intéressent au moulin à vent, ce qui conduit à de nombreuses innovations qui se succèdent sur cette machine. Des lors, les moulins se multiplient de plus en plus en Europe puis après ils se répandent un peu partout dans le monde.

La révolution industrielle offre un nouveau départ aux moulins par l'apparition de nouveaux matériaux. En effet, l'utilisation du métal permet de modifier les formes des tours et augmente considérablement le rendement des machines que l'on nomme désormais «éoliennes». Ce n'est qu'à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle, lorsque l'électricité pris son essor, que l'aérogénérateur électrique fit ses premiers pas. Au Danemark, Pouls La Cour fut, sans doute, le pionnier, il a associé une turbine éolienne à une dynamo en 1891. En France [Arg82], contrairement à ce que la situation actuelle pourrait laisser penser, les recherches allèrent bon train dans les années 1920 (éolienne bipale de 20 m de diamètre, compagnie CEM) puis dans les années 1950-60 (tripale de 30 m et génératrice synchrone de 800 kW à Nogent le Roi, bipale de 35 m et génératrice asynchrone de 1 MW à Saint Rémy des Landes). En 1941, une éolienne bipale de 1250 kW (machine synchrone) était expérimentée aux USA dans le Vermont. En 1978, les Danois, aujourd'hui leaders dans les domaines, réalisèrent une machine tripale de 54 m pour une puissance de 2 MW [Mul12].

Les nombreuses réalisations expérimentales (notamment en Californie) et leurs avatars permirent de perfectionner les turbines, les systèmes de freinage d'urgence, les pylônes et les divers dispositifs de contrôles et d'obtenir des aérogénérateurs viables et compétitifs à la fin du XX<sup>ème</sup> siècle. Diverses solutions de turbines furent explorées, notamment celles à axe vertical de type Darrieus, mais ne subsistent aujourd'hui pratiquement plus que des machines à axe horizontal à 2 ou 3 pales [Mul02].

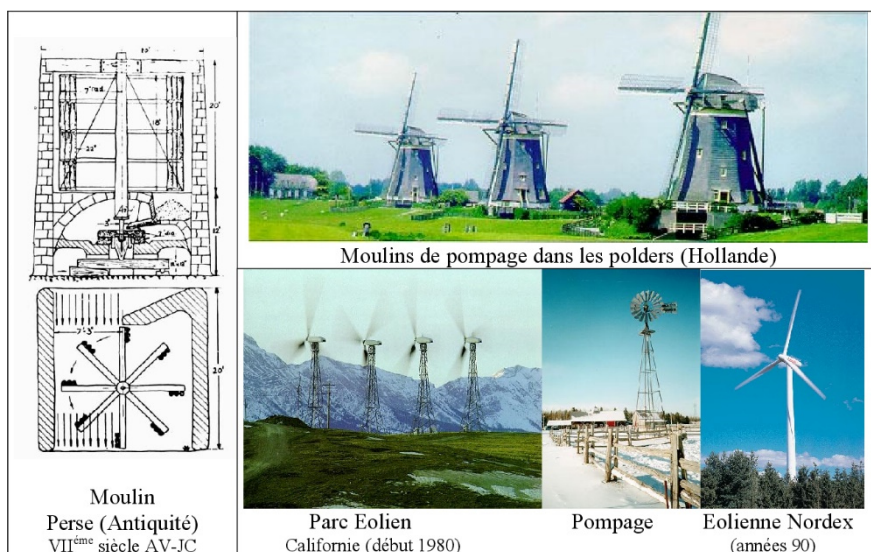


FIGURE 1.3 –Evolution des dispositifs éoliennes de l'Antiquité à nos jours

Puis on a assisté à une longue éclipse dans ce domaine. Le regain d'intérêt, notamment pour les aérogénérateurs et le retour à ce domaine d'énergie, coïncide principalement avec la crise pétrolière qui relança les études et les expériences, cette fois à plus grande échelle l'expérience californienne a été la première à grande échelle (le « Wind-rush ») au début des années 80, notamment avec des turbines de moyenne puissance (55 kW) et grâce à une incitation fiscale très volontariste. On passa ainsi de 144 machines (pour un total de 7MW) en 1981, à 4687 machines (386 MW) en 1985 [Mul12].

Mais c'est vers la fin des années 1980 que le marché des systèmes raccordés au réseau a réellement décollé en Europe, dans le reste des USA et également en Asie et en Afrique du Nord. En Europe, les leaders furent les Danois, principalement à cause de leurs faibles ressources énergétiques classiques, aujourd'hui, ils conservent une très large avance au niveau mondial (plus de la moitié des systèmes éoliens vendus) [Abd07].

Depuis les années 1990 le progrès de la technologie des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 1 MW. Ces installations se sont démocratisées et libre de s'en procurer. En effet on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs pays. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement sont différents.

### 1.3.2 L'aérogénérateur

Un aérogénérateur, plus couramment 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.

Selon leur puissance nominale, les éoliennes sont divisées en trois catégories [Mul08]:

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

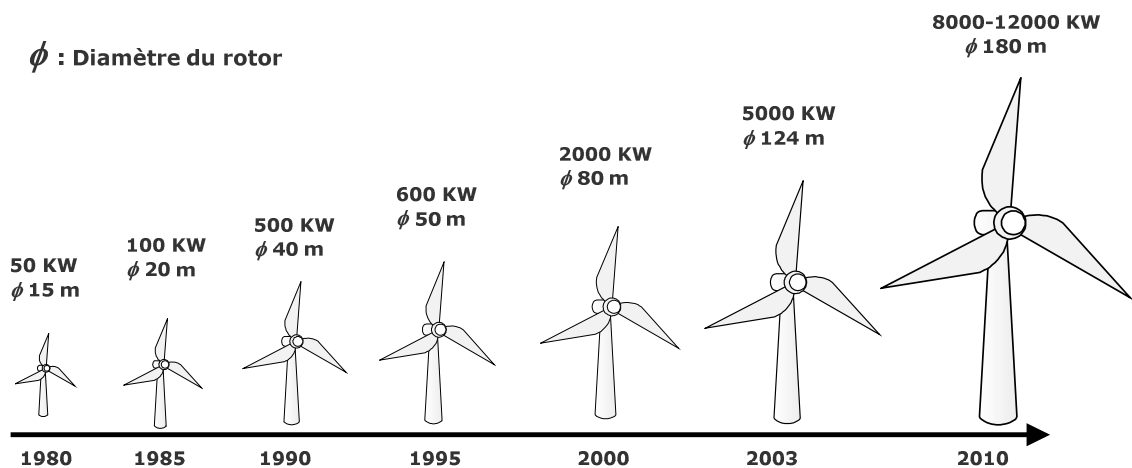


FIGURE 1.4—Correspondance taille-puissance des éoliennes

### 1.3.3 Types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées. En effet, les turbines éoliennes sont classées selon la disposition géométrique de leur arbre sur lequel est montée l'hélice, en deux types : les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal [Mul04] [Pal05] [Rob06] .

#### 1.3.3.1 Aérogénérateurs à axe vertical

Les aérogénérateurs à axe vertical ont été les premières structures utilisées pour la production de l'énergie électrique. Plusieurs prototypes ont vu le jour mais rares sont ceux qui ont atteint le stade de l'industrialisation.

Ils sont classés selon leur caractéristique aérodynamique en deux familles ; les aérogénérateurs conçus sur la base de la portance (Aérogénérateurs à rotor de Darrieus : conçu par l'ingénieur français George Darrieus) et ceux basés sur la traînée (Aérogénérateurs à rotor de Savonius : inventé par le finlandais Siguard Savonius en 1924).

### a) Aérogénérateurs à rotor de Darrieus

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variables selon l'orientation de ce profil .

La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif.

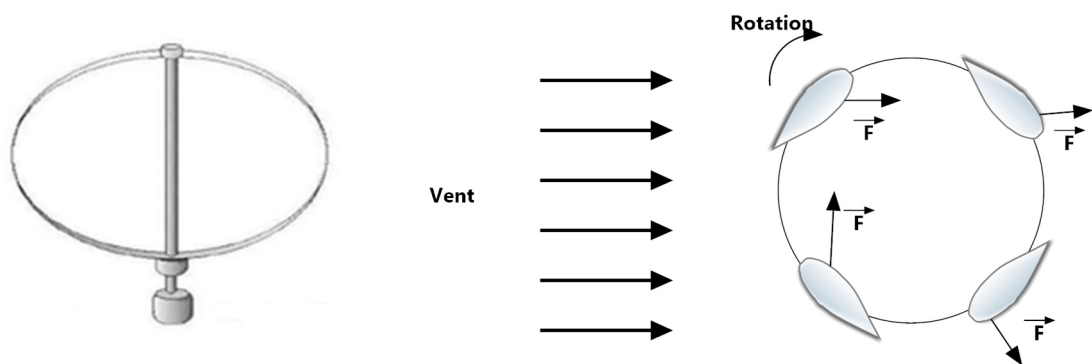


FIGURE 1.5 – Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus)

### b) Aérogénérateurs à rotor de Savonius

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure.



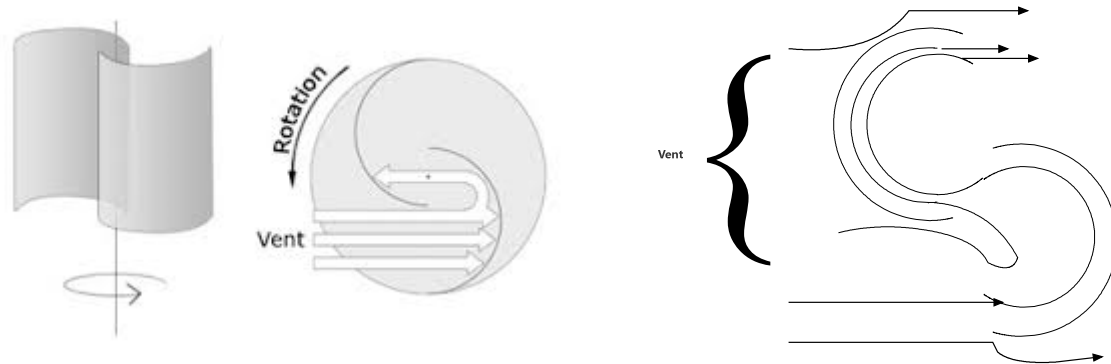


FIGURE 1.6 – Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius)

Les principaux avantages des éoliennes à axe vertical sont les suivants :

- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien.
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quelque soit sa direction.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance.
- Occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- Faible vitesse du vent à proximité du sol.

### 1.3.3.2 Aérogénérateurs à axe horizontal

Les turbines à axe horizontal sont les plus utilisées actuellement comparées à celles à axe vertical puisqu'elles présentent un coût moins important, en plus elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques [Poi03].

Elles sont constituées de plusieurs pales pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre des pales varie entre 1 et 3, le rotor tripal est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [Mir05].

Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent.



FIGURE 1.7 – Eoliennes à axe horizontal

Il existe deux types de configuration d'éolienne à axe horizontal :

- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible et auto orientable. L'effet de masque est plus important dans ce type de configuration.
- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif spécifique. La disposition turbine en amont est la plus utilisée pour les grandes puissances du fait que la stabilité est meilleure, et les efforts de manœuvre sont moins importants [Fer09].

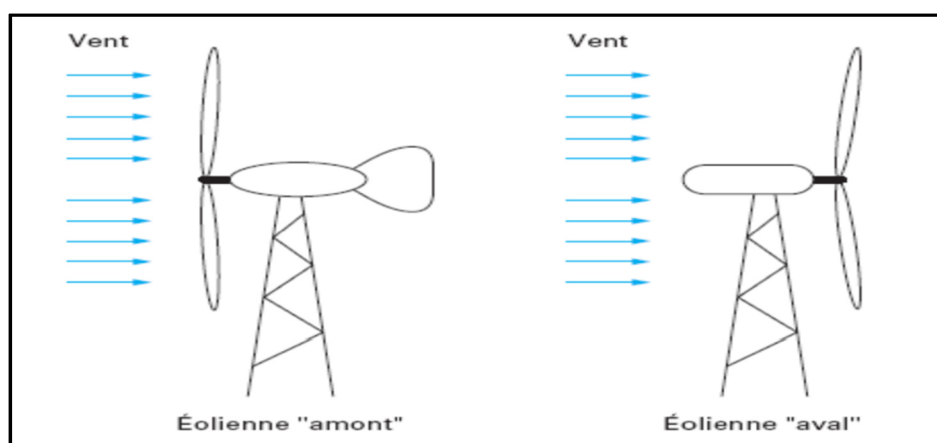


FIGURE 1.8 – Types d'éoliennes à axe horizontal

Les principaux avantages des éoliennes à axe horizontal sont les suivants :

- 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.
- un bon rendement aérodynamique.

Cependant elles ont comme inconvénients les points suivants:

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

### 1.3.4 Les différentes composants d'éolienne

Les éoliennes sont constituées le plus généralement d'une hélice, d'une nacelle et d'une tour

\***L'hélice** est composée de pales qui transforment l'énergie présente dans le vent en un mouvement rotatif qu'elles transmettent à l'alternateur couplé à l'hélice ; pour cela, les pales se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage, provoquant la rotation par un effet de vis ou de tire-bouchon. La théorie (théorème de Betz) montre que, pour récolter une puissance de rotation maximum, l'hélice doit réduire de trois fois la vitesse du vent, et non pas l'arrêter. L'énergie récoltée dépend du cube de la vitesse et de la surface balayée par l'hélice, donc du carré de son diamètre. La densité intervient également : de l'air humide ou froid et une haute pression atmosphérique (basse altitude) seront des facteurs favorables.

\***La nacelle** abrite l'alternateur ainsi que d'autres systèmes comme la boîte de vitesse et les commandes des pales.

\***La tour** quant à elle, doit soutenir le poids de l'appareil et résister aux vibrations pendant toute sa durée de vie. Elle est généralement construite en acier, creuse et renferme une échelle qui permet l'accès à la nacelle pour d'éventuels entretiens. Toutefois il existe aussi certaines tours construites sous forme de pylônes en treillis.

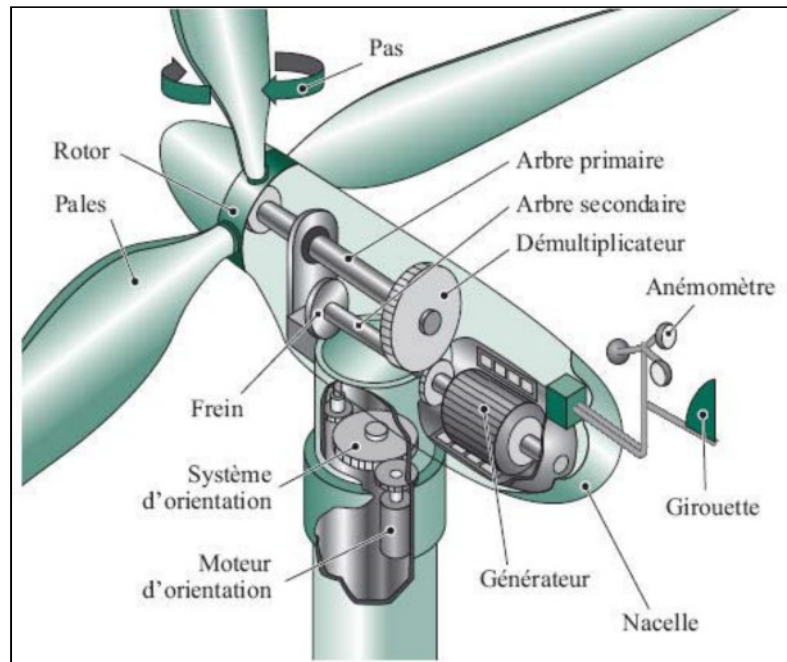


FIGURE 1.9 – Composition d'une éolienne

### 1.3.4.1 Les différentes parties de l'éolienne

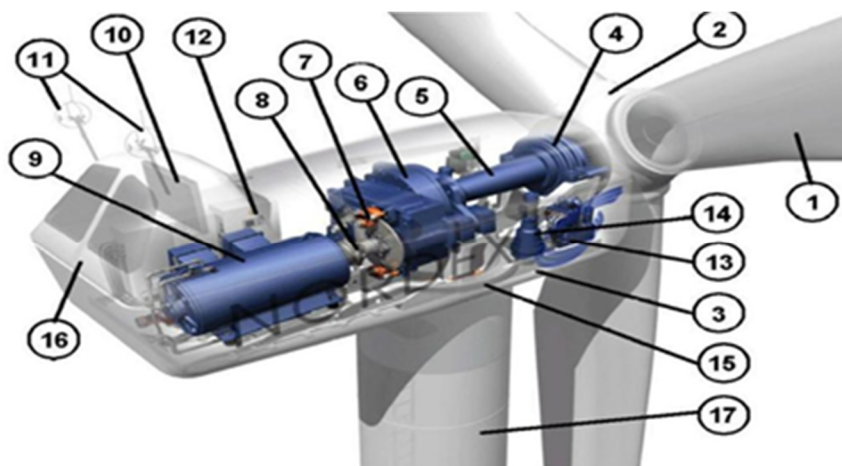


FIGURE 1.10 – Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW

Elle est constituée d'une tour (17), supporte la nacelle (3) et le moyeu de la turbine (2) sur lequel sont fixées les pâles (1). Il est important qu'il soit haut du fait de l'augmentation de la vitesse du vent avec la hauteur et aussi du diamètre des pâles.

La nacelle (3) partiellement accueille la génératrice (9) et son système de refroidissement (10), le multiplicateur de vitesse (6) et différents équipements électroniques de contrôle (12) qui permettent de commander les différents mécanismes d'orientation (13), (14), (15) ainsi que le fonctionnement global de l'éolienne. Le multiplicateur de vitesse comporte un arbre lent (5) muni d'un palier à billes, et un arbre à grande vitesse. Il est équipé d'un frein mécanique à disque (7) et un accouplement flexible (8) avec le générateur (9). Le tout est protégé par un capot en acier (16).

Un anémomètre et une girouette (11) situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle du système éolien.

### **1.3.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne**

Dans une centrale éolienne c'est le mouvement du vent qui fournit l'énergie pour la production de l'électricité, la turbine éolienne comporte généralement 3 pâles qui tourne avec une vitesse variable, comprise généralement pour les grandes machines entre 12 et 18 tr/mn.

Cette dernière est entonnée par l'énergie du vent et par conséquence entraine le rotor.

La nacelle implique tous les composants nécessaires pour la production de l'électricité. Pour augmenter l'efficacité de l'éolienne, la nacelle s'oriente pour être toujours face au Vent, si le vent est trop faible les pâles pivote de manière à captée le maximum du vent, si le vent est trop fort il se met au drapeau par mesure de sécurité, et l'éolienne s'arrête. Dans la nacelle le mouvement de rotation est transmis à l'arbre lent, la vitesse de rotation de l'arbre lent est augmentée par un multiplicateur de vitesse de l'éolienne. L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par un générateur.

Les systèmes éoliens de grande échelle sont connectés au réseau électrique d'une tension d'environ 690 volts.

L'éolienne permet de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique [Kel11].

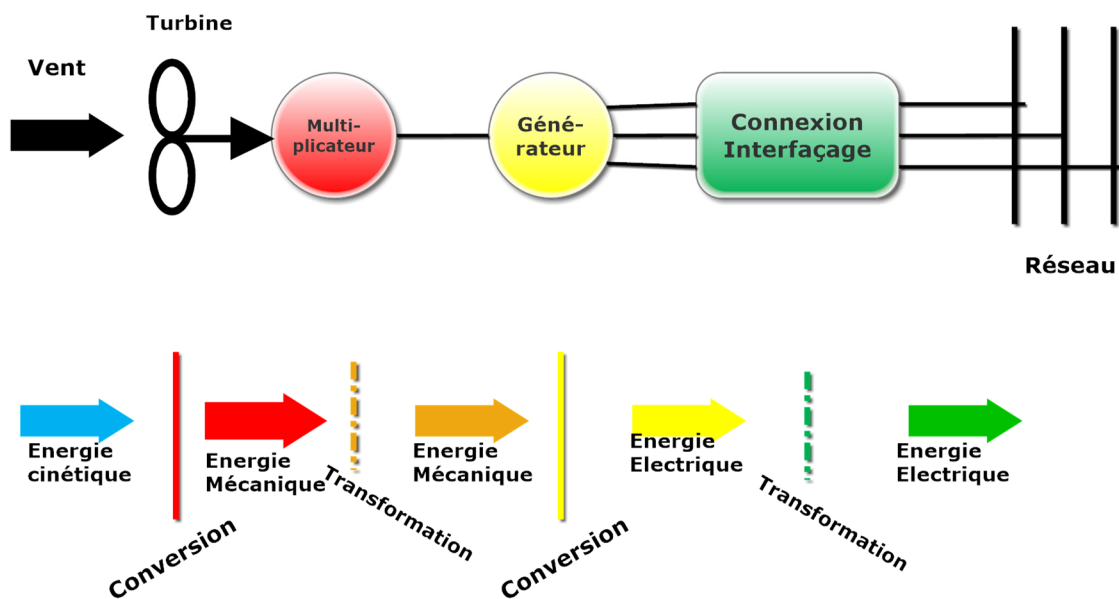


FIGURE 1.11 – Principe de la conversion d'énergie

## 1.3.6 Les différentes installations des éoliennes

### 1.3.6.1 L'éolienne offshore

Le « offshore » consiste à implanter les aérogénérateurs en mer, à proximité des côtes, Ainsi l'impact sur le paysage est modéré et il n'y a plus de nuisance sonore.

Cependant, l'installation d'éoliennes en mer est beaucoup plus coûteuse qu'à terre, les mats doivent être étudiés pour résister à la force des vagues et du courant, la protection contre la corrosion doit être renforcée.

L'implantation en mer nécessite des engins spécialisés, le raccordement électrique implique des câbles sous-marins coûteux et fragiles, et la moindre opération de maintenance peut nécessiter de gros moyens.

En revanche, les éoliennes « offshore » bénéficient d'un vent plus fort et plus régulier, leur puissance nominale est donc plus importante ainsi que leurs rendements.

L'énergie éolienne offshore présente plusieurs avantages, parmi ces avantages on cite :

1. L'énorme potentiel inhérent à la surface couverte par les océans et les mers.
2. Elle est abondante, son impact environnemental est minimal.
3. Les vitesses de vent sont généralement plus élevées en mer que sur terre.
4. La turbulence étant plus faible en mer.



FIGURE 1.12 – Parc éolien offshore

### 1.3.6.2 L'éolienne onshore

Une éolienne terrestre ou onshore, est par définition installée sur la terre ferme les deux modes d'exploitation de l'énergie éolienne terrestre :

1. Utilisation industrielle dans le cadre d'un parc éolien, un ensemble d'aérogénérateur est regroupé sur un même site qui est relié au réseau électrique.
2. Utilisation domestique dans le cadre du « petit éolien », des éoliennes terrestres de plus petite envergure peuvent également répondre aux besoins de particuliers.



Il existe d'autres concepts d'éoliennes terrestres, classés selon leur axe soit horizontale ou vertical, les éoliennes terrestres sont moins coûteuses à installer et plus faciles à entretenir que les éoliennes offshore, qui doivent répondre à des défis techniques plus importants liés aux conditions du milieu marin. Le rendement potentiel est toutefois moins important sur terre qu'au large.

Les plus grands parcs éoliens terrestres installés dans le monde sont principalement situés aux États-Unis.



FIGURE 1.13 – Parc éolien onshore



## **1.4 Conclusion**

L'énergie renouvelable représente l'énergie de l'avenir, d'après les multiples recherches énergétiques qu'elle a mené à la découverte de l'énergie solaire, photovoltaïque, thermique, hydraulique, et l'énergie éolienne.

Cette dernière que nous avons expliqué dans ce chapitre surtout sur le côté historique, les différents types d'éoliennes existantes, et leur composant avec un simple aperçu concernant le principe de son fonctionnement.

Le maillon perdu dans cette chaîne est : comment convertir l'énergie cinétique à l'énergie électrique ?

Cette question sera traitée au prochain chapitre.

## Les Convertisseurs Dynamique

### 2.1 Introduction

Une éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [Poi03].

Dans ce chapitre, on présentera les différents composants de la chaîne de conversion éolienne.

### 2.2 Conversion de l'énergie cinétique à l'énergie mécanique

#### 2.2.1 Loi de BETZ

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la Figure 2-1 sur lequel on a représenté la vitesse du vent ( $v_1$ ) en amont de l'aérogénérateur et la vitesse ( $v_2$ ) en aval.

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne ( $v_1$ ) et la vitesse du vent après passage

à travers le rotor ( $v_2$ ) soit :  $\frac{v_1+v_2}{2}$ , la masse d'air en mouvement de densité ( $\rho$ )

traversant la surface ( $S$ ) des pales en Une seconde est :

$$m = \frac{\rho S(v_1 + v_2)}{2} \quad (2.1)$$

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

$$P_m = \frac{m(v_1^2 - v_2^2)}{2} \quad (2.2)$$

Soit en remplaçant ( $m$ ) par son expression dans (2.1) :

$$P_m = \frac{\rho S(v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)}{4} \quad (2.3)$$

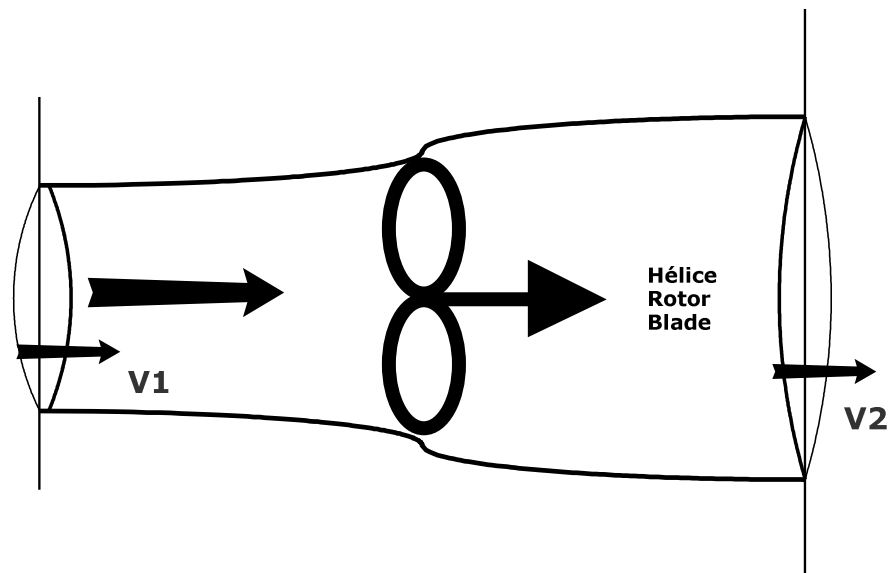


FIGURE 2.1 – Tube de courant autour d'une éolienne

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface ( $S$ ) sans diminution de vitesse, soit à la vitesse ( $v_1$ ), la puissance ( $P_{mt}$ ) correspondante serait alors :

$$P_{mt} = \frac{\rho S v_1^3}{2} \quad (2.4)$$

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

$$\frac{P_m}{P_{mt}} = \frac{(1 + (\frac{v_1}{v_2})) (1 - (\frac{v_1}{v_2})^2)}{2} \quad (2.5)$$

Si on représente la caractéristique correspondante à l'équation ci-dessus, on s'aperçoit que le ration ( $P_m / P_{mt}$ ) appelé aussi coefficient de puissance ( $C_p$ ) présente un maxima de  $16/27$  soit  $0.59$  ; c'est cette limite théorique appelée limite de **BETZ** qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative ( $\lambda$ ) représentant le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales de l'éolienne et la vitesse du vent.

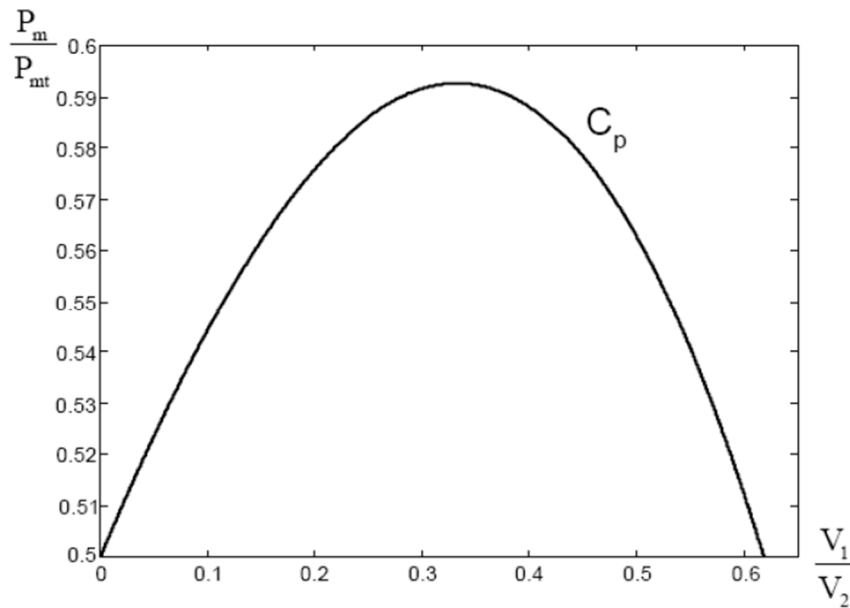


FIGURE 2.2 – Coefficient de puissance

## 2.2.2 Puissance récupérable par l'éolienne

La Figure 2-3 montre l'évolution du coefficient de puissance ( $C_p$ ) pour des turbines réelles à axe horizontal pour différents types d'éoliennes. On remarque que chaque type d'éoliennes correspond à une vitesse spécifique ( $\lambda_{opt}$ ) qui maximise le rendement Aérodynamique.

Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe, Plus la caractéristique  $C_p(\lambda)$  sera en cloche, plus il sera bénéfique d'adapter la vitesse de rotation à la vitesse du vent, afin de rester dans la zone optimale [Ger02].

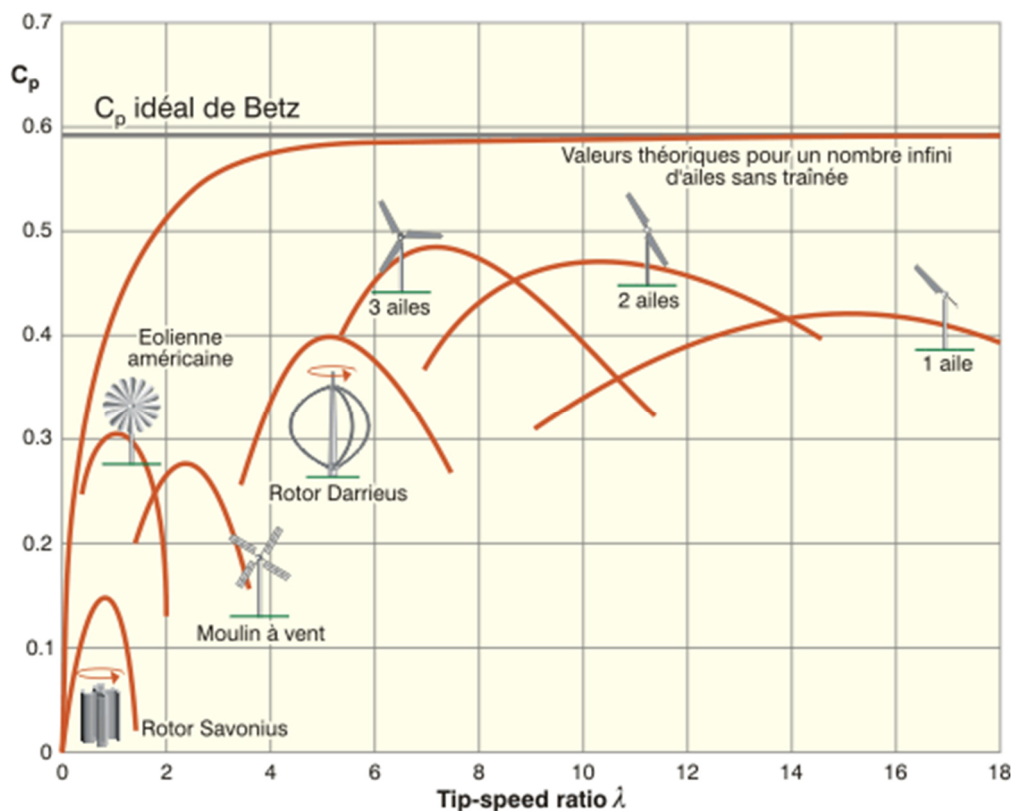


FIGURE 2.3 – Coefficient aérodynamique de puissance en fonction de la vitesse de rotation normalisée

### 2.2.3 Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Une turbine éolienne est dimensionnée pour développer une puissance nominale ( $P_n$ ) à partir d'une vitesse de vent nominale ( $V_n$ ). Pour des vitesses de vents supérieures à ( $V_n$ ), la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques, de sorte que la puissance récupérée ne dépasse pas la puissance nominale pour laquelle elle a été conçue.

Il y a d'autres grandeurs dimensionnantes : ( $V_d$ ) la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie et ( $V_m$ ) la vitesse maximale du vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement [Poi03].

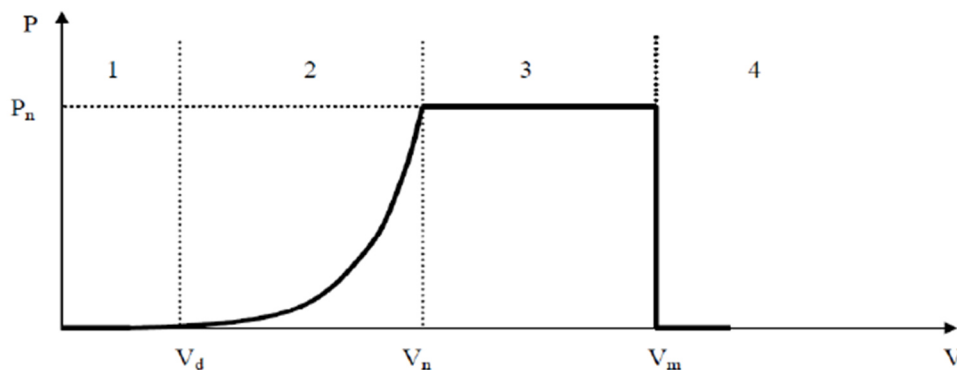


FIGURE 2.4 –Caractéristique puissance/vitesse d'une éolienne

Les vitesses  $V_d$ ,  $V_n$  et  $V_m$  définissent quatre zones sur le diagramme de la puissance utile en fonction de la vitesse du vent :

- La zone 1, où  $P = 0$  (l'éolienne est à l'arrêt).
- La zone 2, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre est proportionnelle à la vitesse du vent.
- La zone 3, la puissance est maintenue constante ( $P = P_n$ ) quel que soit la vitesse du vent.
- La zone 4, dans laquelle le système de sûreté du fonctionnement arrête le transfert de l'énergie [Ger02] [Bel10] [Mir05].

### 2.3 Les Multiplicateur de vitesse utilisé dans les Aérogénérateurs

La transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse dont le rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle du convertisseur électromécanique. Parmi les différents types de multiplicateurs de vitesse qui existent, les trois types les plus utilisés dans les aérogénérateurs sont [Mig06] :

\***Multiplicateur à couple conique** : où l'arbre de sortie est perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

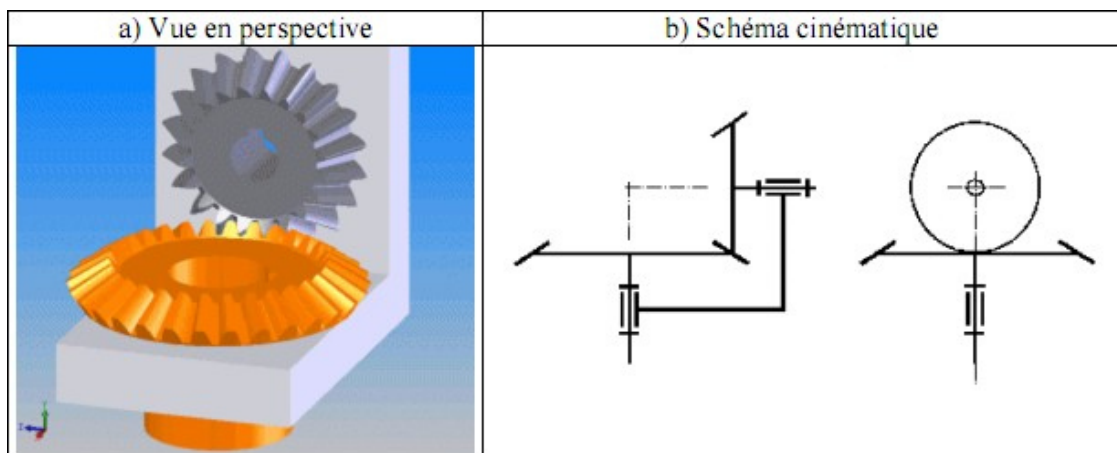


FIGURE 2.5 – multiplicateur à couple conique

\* **Multiplicateur à engrenages** : constitué d'un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques. La fonction d'un engrenage est de transmettre un mouvement de rotation entre deux arbres proches.

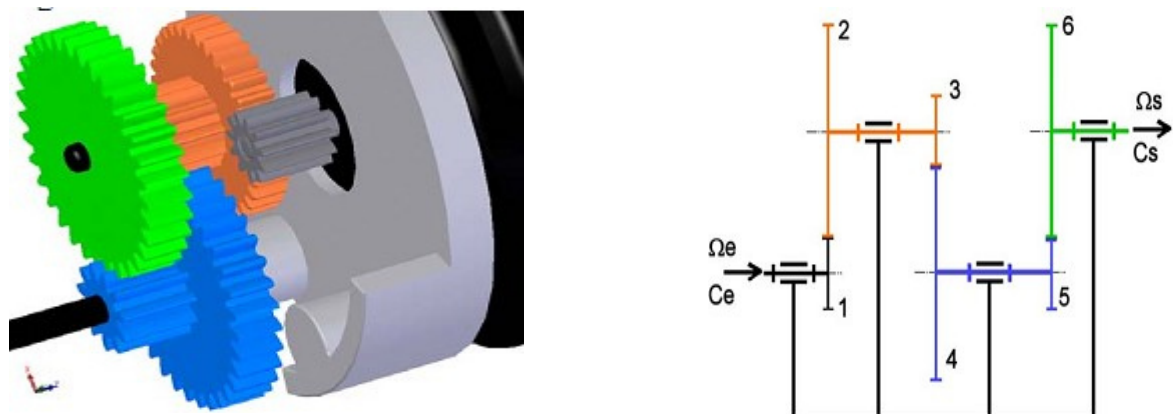


FIGURE 2.6 – Multiplicateur à engrenages cylindriques à trois étages

\***Multiplicateur à satellite** : L'utilisation des trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées pour un encombrement réduit. Sous le nom de train épicycloïdal ou engrenage planétaire, on désigne un système de transmission de puissance entre deux ou plusieurs arbres dont certains tournent non seulement autour de leur propre axe, mais aussi avec leur axe autour d'un autre axe. Les engrenages peuvent être cylindriques ou coniques.

Ceux dont l'axe coïncide avec un axe fixe dans l'espace s'appellent « planètes » et ceux qui tournent avec leur axe autour d'un autre s'appellent « satellites ». Ces derniers sont généralement maintenus par un châssis mobile nommé « porte satellite ».

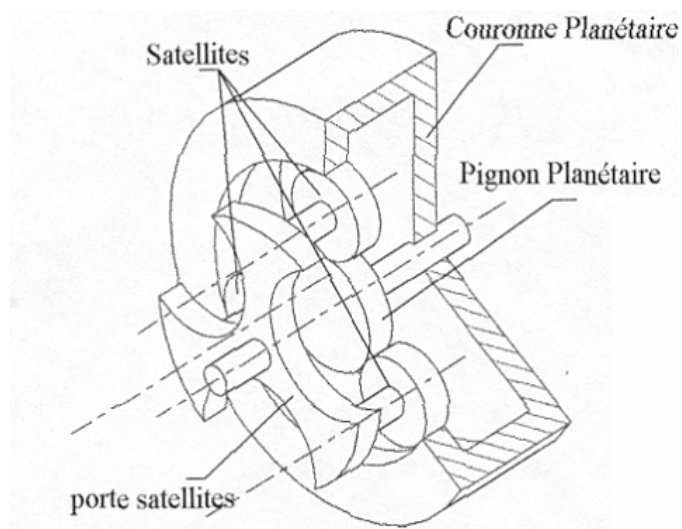


FIGURE 2.7– multiplicateur à satellite

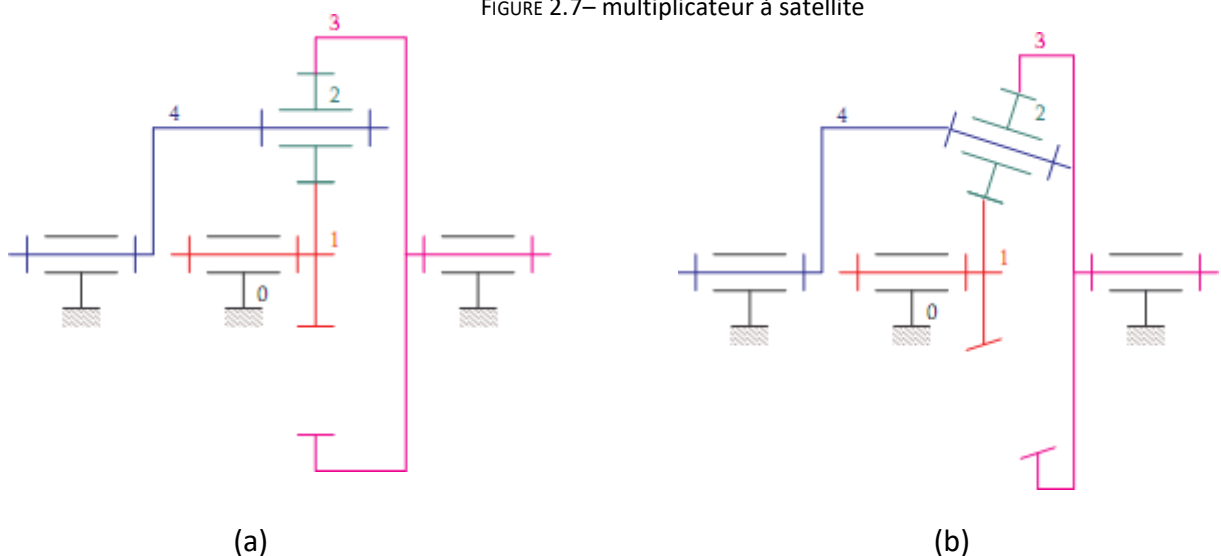


FIGURE 2.8– train plan (a), et train sphérique (b)



## 2.4 La Conversion électromécanique

Un convertisseur électromécanique n'est qu'une bobine de fils qui tourne à l'intérieur d'un champ magnétique. Par conséquent, il produit de l'électricité par l'effet de l'induction magnétique.

En règle générale pour les éoliennes de forte puissance, il s'agit d'une génératrice synchrone ou asynchrone, Mais pour un aérogénérateur servant à la charge de batteries par exemple, on peut utiliser une génératrice à courant continu [Lud04].

### 2.4.1 Système utilisant la machine Asynchrone

#### 2.4.1.1 Définition la machine Asynchrone

La machine asynchrone, connue également sous le terme " anglo-saxon " de machine à induction, est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui la traversent.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On les retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), de l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elles étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais, toujours grâce à l'électronique de puissance, sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes.

Pour fonctionner en courant monophasé, ces machines nécessitent un système de démarrage. Pour les applications de puissance, au-delà de quelques kilowatts, les moteurs asynchrones sont uniquement alimentés par des systèmes de courants triphasés.

Nous expliquerons certains des générateurs asynchrones utilisés dans l'éolienne.

### 2.4.1.2 Génératrice Asynchrone à cage d'écureuil

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil est souvent utilisée pour produire de l'électricité à l'aide des éoliennes dans des sites isolés. Son emploi est réservé aux générateurs de puissance moyenne dont l'arbre d'entraînement tourne à des vitesses fortement variables [Lud04].

➤ Présentation

La machine se compose de deux pièces principales :

- **Le stator** : Il est constitué d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches permettant d'y loger les bobinages. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques de tôle afin de limiter les courants de Foucault.
- **Le rotor** : Ce type de rotor a été inventé par Michail Ossipowitsch Doliwo- Dobrowolski au début des années 1890. Ce rotor est constitué de tôles ferromagnétiques et de barres conductrices régulièrement réparties à la périphérie du rotor. Les barres sont reliées entre elles par deux anneaux de court-circuit (voir figure ci-dessous). Les tôles ferromagnétiques servent à guider les lignes de champ tandis que les barres accueillent les courants induits.

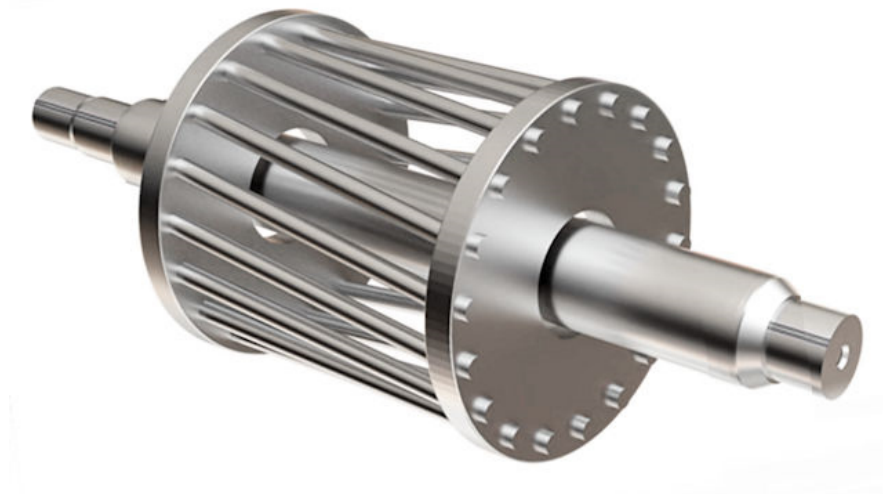


Figure 2.9– Structure d'un rotor en cage d'écureuil

➤ Principes généraux

Les courants statoriques créent un champ magnétique tournant dans le stator. La fréquence de rotation de ce champ est imposée par la fréquence des courants statoriques, c'est-à-dire que sa vitesse de rotation est proportionnelle à la fréquence d'alimentation électrique. La vitesse de ce champ tournant est appelée "vitesse de synchronisme".

L'enroulement au rotor est donc soumis à des variations de flux (du champ magnétique). Une force électromotrice induite apparaît qui crée des courants rotoriques. Ces courants sont responsables de l'apparition d'un couple qui tend à mettre le rotor en mouvement afin de s'opposer à la variation de flux : loi de Lenz. Le rotor se met donc à tourner pour tenter de suivre le champ statorique.

La machine est dite asynchrone car elle est dans l'impossibilité d'atteindre la même vitesse que le champ statorique sans la présence d'un entraînement extérieur. En effet, dans ce cas, vu dans le référentiel du rotor, il n'y aurait pas de variation de champ magnétique ; les courants s'annuleraient, de même que le couple qu'ils produisent, et la machine ne serait plus entraînée. La différence de vitesse entre le rotor et le champ statorique est appelée "vitesse de glissement".

Lorsque le rotor est entraîné au-delà de la vitesse de synchronisme (fonctionnement hypersynchrone), la machine fonctionne en générateur alternatif. Mais son stator doit être forcément relié au réseau car lui seul peut créer le champ magnétique nécessaire pour faire apparaître les rotoriques.

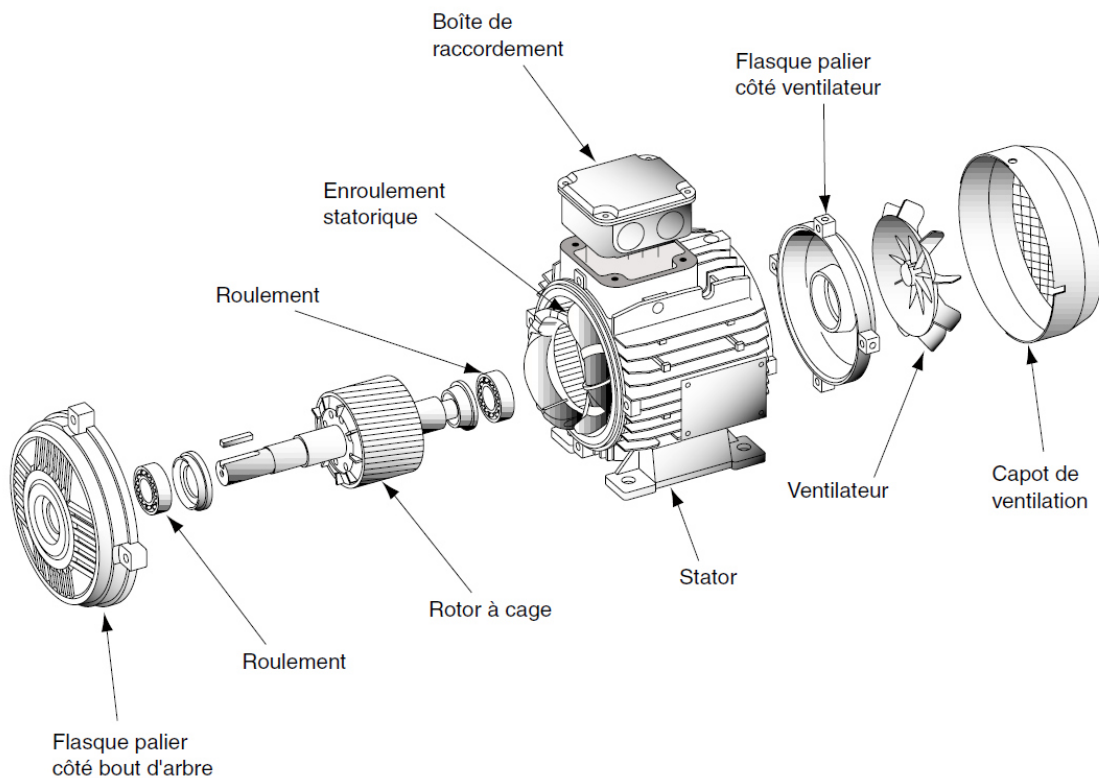


Figure 2.10– Schématisation d'une machine asynchrone à cage à écureuil

### 2.4.1.3 Génératrice Asynchrone à rotor bobiné

La machine asynchrone à rotor bobiné a le même fonctionnement que la machine asynchrone à cage, le rotor de cette dernière est constitué de trois bobinages couplés en étoile, reliés à l'extérieur via un collecteur simplifié à trois bagues, et court-circuité en fonctionnement normal. On peut modifier les propriétés électromécaniques en agissant sur le rotor par ces connexions [Har03].

La machine asynchrone à rotor bobiné est une machine réversible peut fonctionner comme :

- Moteur en mode hyposynchrone : ou la vitesse de la rotation de rotor ( $\Omega_r$ ) est inférieur à la vitesse du champ tournant (vitesse de synchronisme) ( $\Omega_s$ ).
- Génératrice en mode hypersynchrone : ou la vitesse de la rotation de rotor ( $\Omega_r$ ) est supérieur à la vitesse de synchronisme ( $\Omega_s$ ).

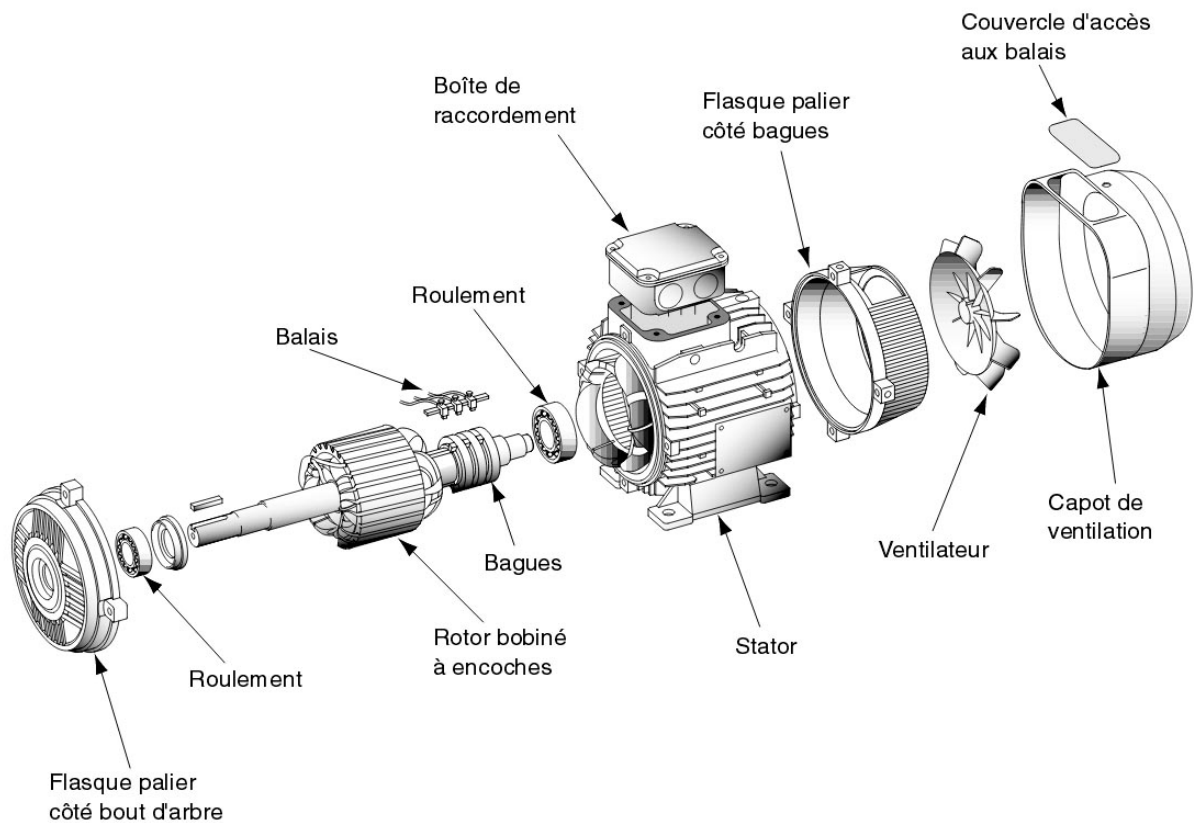


Figure 2.11– machine asynchrone à rotor bobiné

#### 2.4.1.4 Génératrice Asynchrone à double alimentation (MADA)

Ces machines sont un peu plus complexes que les machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun la nécessité d'un multiplicateur de vitesse.

La machine asynchrone à double alimentation présente un atout considérable. Son principe est issu de celui de la cascade hyposynchrone : le stator (ou le rotor) est connecté à tension et fréquence fixes au réseau alors que le rotor (ou le stator) est relié au réseau à travers un convertisseur de fréquence. Si la variation de vitesse requise reste réduite autour de la vitesse de synchronisme, le dimensionnement du convertisseur de fréquence (électronique de puissance) peut être réduit [Har03].

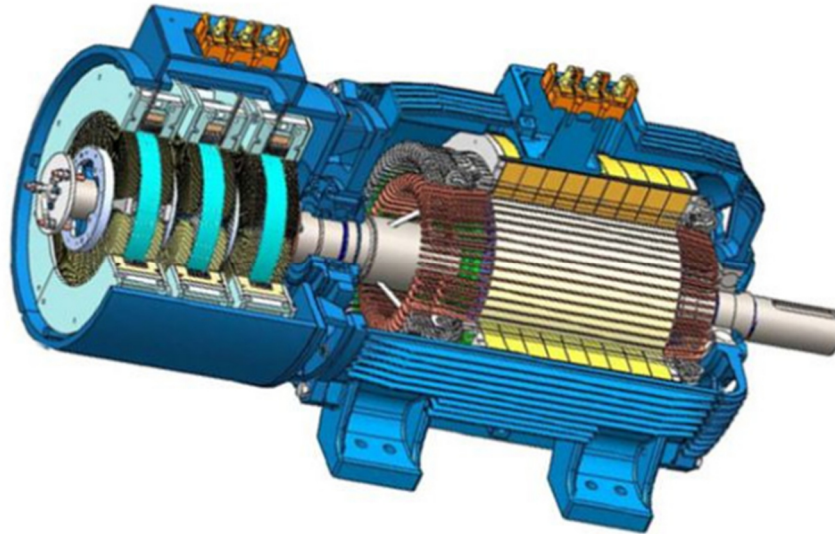


Figure 2.12– Machine Asynchrone à double alimentation (MADA)

## 2.4.2 Système utilisant la machine Synchrone

### 2.4.2.1 Définition la machine Synchrone

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant.

Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts, en passant par les moteurs pas à pas.

Néanmoins, la structure de toutes ces machines est relativement proche. Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales.

Les stators, notamment en forte puissance, sont identiques à ceux d'une machine asynchrone.

Nous expliquerons certains des générateurs synchrones utilisés dans l'éolienne.

### 2.4.2.2 Génératrice Synchrone à rotor bobiné ou à aimants

Les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants, elles peuvent être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes.

Aujourd'hui, la plupart des machines synchrones utilisées dans l'éolien sont des machines synchrones à aimants permanent, sont à grand nombre de pôles, elles présentent un meilleur rendement et un meilleur couple massique, permettent de développer des couples mécaniques considérables. Ce type de machines a un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défaut (suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bagues et balais). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est intéressant dans les applications éoliennes [Har03].

### 2.4.2.3 Génératrice Synchrone à aimants permanents discoïde

Le concept de cette machine se distingue par la direction axiale de son champ magnétique par opposition au champ radial des machines cylindriques traditionnelles [Har03].

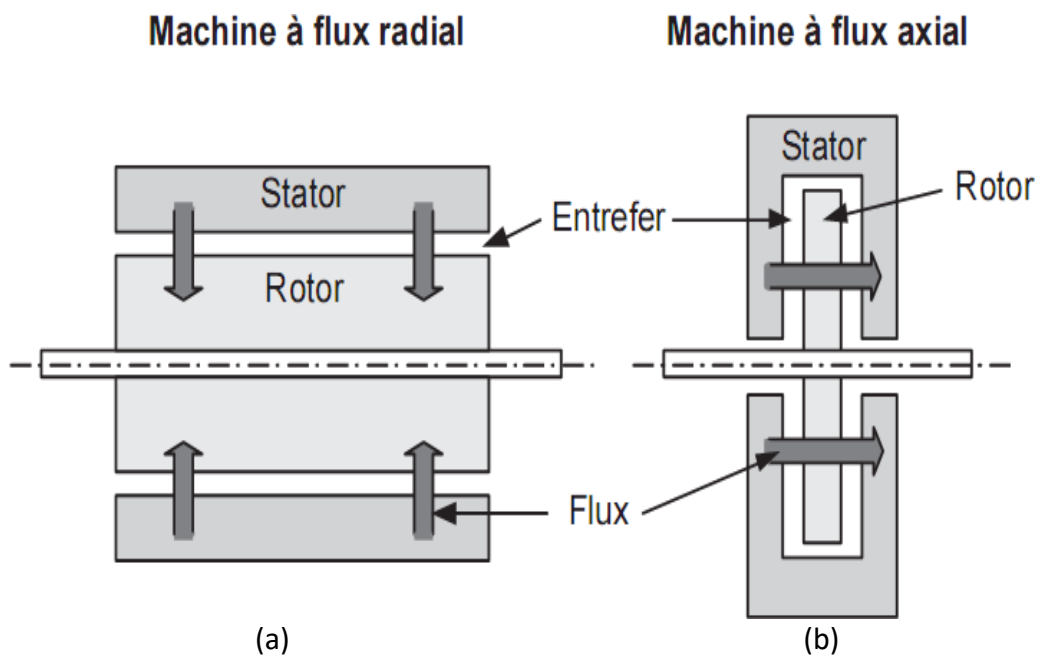


Figure 2.13– Machines à flux radial (a), à flux axial (b).



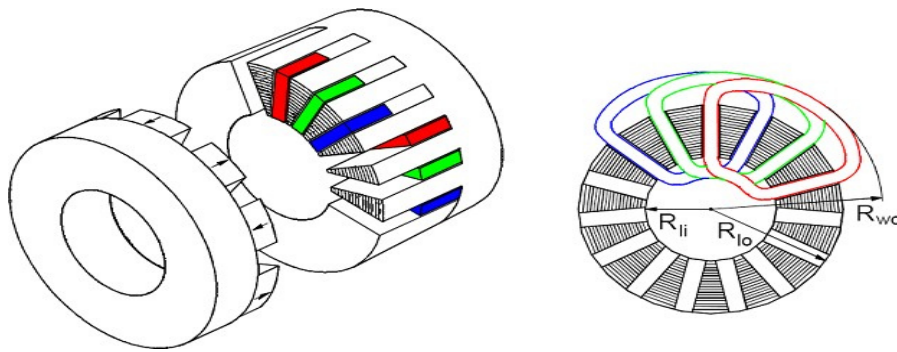


Figure 2.14– Machine à flux axial

Pour les applications à petites vitesses, la structure de la machine axiale reste compacte alors que la machine radiale tend vers une structure creuse, ceci conduit à un meilleur couple volumique. Cette topologie a la possibilité d'assembler plusieurs machines sur un même axe afin d'accroître le couple. L'éolienne Jeumont J48 de 750 KW met en œuvre ce type de machine pour la vitesse variable à entraînement direct avec un grand nombre de pôles.

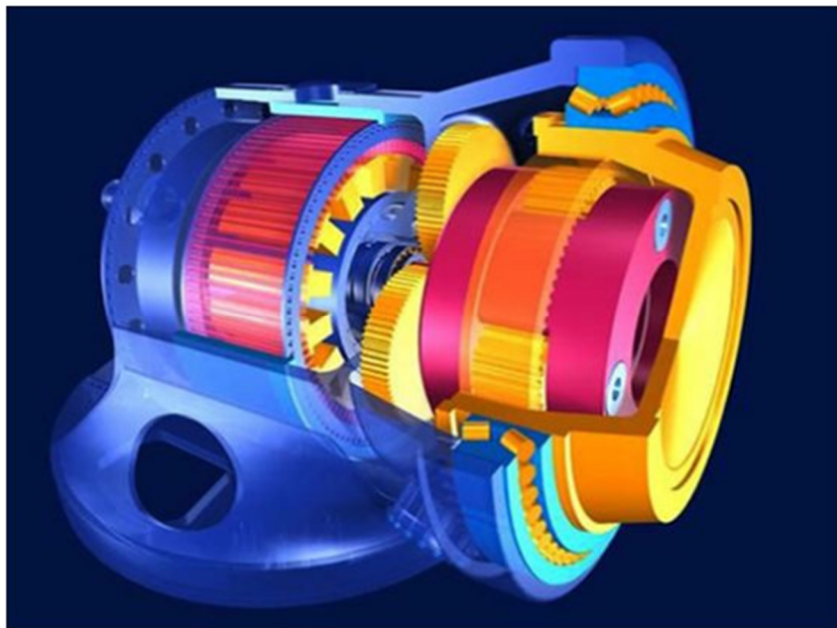


Figure 2.15– Machine synchrone à aimant permanent



### 2.4.2.4 Génératrice Synchron vernier à aimants

Ce type de machines est alimenté par des courants sinusoïdaux. Son fonctionnement est similaire à celui des machines à rotor lisse et des machines à reluctance variable. Il présente l'avantage d'une grande simplicité de construction mécanique et une bonne robustesse. L'inducteur est constitué de petits aimants alternés à la périphérie du rotor, qui interagissent sous l'effet du champ d'induit avec des petites dents statorique, les pôles et les aimants sont totalement découpés dans la structure vernier.

La figure suivante nous montre la mise en œuvre des aimants surfaciques qui exploite l'effet vernier pour une alimentation sinusoïdale.

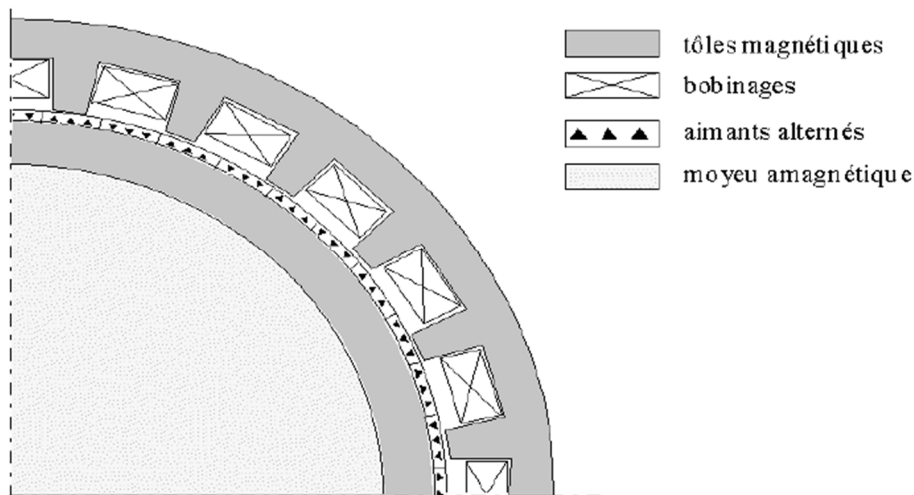


Figure 2.16– Machine synchrone vernier à aimants

La condition de fonctionnement est donnée par la formule suivante :

$$|N_s - N_r| = P \quad (2.6)$$

Ou :

$N_s$  : est le Nombre de dents au stator.

$N_r$  : est le Nombre de dents au rotor.

$P$  : est le Nombre de paires de pôles.

La vitesse de rotation est liée à la pulsation d'alimentation est donnée par l'équation :

$$\Omega = \frac{\omega}{N_r} \quad (2.7)$$

On notera que cette formule est la même que pour la machine à réluctance variable pure.

### 2.4.3 Avantages & Inconvénients de chacune des génératrices

Les avantages et les inconvénients des différentes génératrices utilisées dans les systèmes éoliens sont regroupés dans le tableau suivant :

Génératrices	Avantages	Inconvénients
Génératrices asynchrones		
Génératrice à cage d'écureuil et à rotor bobiné, fonctionnement à vitesse fixe	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Machines standard.</li> <li>• Robuste.</li> <li>• Faible coût.</li> <li>• Aucun interfaçage électronique.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puissance extraite non optimisée.</li> <li>• Vitesse fixe d'où le rendement aérodynamique diminue.</li> <li>• Maintenance boîte de vitesse.</li> <li>• Magnétisation de la machine non gérée.</li> <li>• Pas de gestion de l'énergie réactive par le générateur.</li> </ul>
Génératrice à cage d'écureuil et à rotor bobiné, fonctionnement à vitesse variable	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonctionnement à vitesse variable 30% autour de la vitesse de synchronisme.</li> <li>• Robuste.</li> <li>• Électronique de puissance faiblement dimensionnée.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Puissance extraite non optimisée.</li> <li>• Pas de gestion de l'énergie réactive.</li> <li>• Pertes supplémentaires.</li> <li>• Maintenance boîte de vitesse.</li> </ul>
A double alimentation	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Fonctionnement à vitesse variable.</li> <li>• Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens.</li> <li>• Électronique de puissance dimensionnée à 30% de <math>P_n</math>.</li> <li>• Connexion de la machine plus facile à gérer.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Maintenance boîte de vitesse.</li> <li>• Prix de l'électronique de puissance relatif.</li> <li>• Contrôle commande complexe.</li> <li>• Oscillation mécanique (mais amorties par un contrôle adéquat).</li> </ul>

Génératrices synchrones		
A rotor bobiné ou à aimants	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleur rendement</li> <li>• Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.</li> <li>• Puissance extraite optimisée pour les vents faible et moyens.</li> <li>• Connexion de la machine plus facile à gérer.</li> <li>• Absence de boîte de vitesse.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix de l'électronique de puissance et de la machine.</li> <li>• Grand diamètre de la machine.</li> <li>• Électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de <math>P_n</math>.</li> </ul>
Génératrice synchrone à aimants permanents discoïde et vernier à aimants	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Meilleur rendement</li> <li>• Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.</li> <li>• Puissance extraite optimisée pour les vents faible et moyens.</li> <li>• Construction simple.</li> <li>• Robuste.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Prix de l'électronique de puissance et de la machine.</li> <li>• Grand diamètre de la machine.</li> <li>• Électronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de <math>P_n</math>.</li> </ul>

Tableau 2.1-les Avantages et Inconvénients de chacune des génératrices

## **2.5 Conclusion**

Nous avons présenté la définition de la conversion de l'énergie cinétique vers l'énergie électrique par l'intermédiaire des convertisseurs dynamiques.

Ainsi que les convertisseurs dynamiques qui sont nécessaire pour la conversion de l'énergie cinétique à l'énergie électrique.

Tout en appuyant sur le principe de l'aérodynamique (loi de BETZ, Coefficient de puissance), on créant la provocation du mouvement des pales des éoliennes qui elle aussi contribue à la conversion de l'énergie électrique par les convertisseurs dynamiques.

Cette étape n'est pas la dernière pour la coordination des éoliennes avec le réseau électrique, car il nous manque l'étape de convertisseur statique qui sera l'objet de prochain chapitre.

## Les Convertisseurs Statiques

### 3.1 Introduction

Il existe de nombreuses sortes de convertisseurs, que l'on classe généralement selon les énergies mises en jeu en entrée et en sortie à savoir la conversion : alternatif –continu, continu - alternatif, continu –continu, alternatif -alternatif.

A partir d'un réseau présentant une tension et une fréquence fixes, il est possible, moyennant l'utilisation d'un variateur de fréquence, de piloter un moteur électrique à tension et fréquence variables. Avec un variateur adapté, le système peut être réversible ; en partant d'une tension et fréquence variable, il est possible de restituer de l'énergie sur un réseau à tension et fréquence fixes. Le rotor de l'éolienne soumis à des variations de vitesse du vent, génère au niveau de la machine auquel il est accouplé, une tension et une fréquence variables.

Le convertisseur statique assurant cette réversibilité constitue alors un onduleur de tension.

La tension continue alimentant ce convertisseur étant délivrée par un redresseur ; partie effectuant la conversion alternatif - continu suivie d'un filtre.

### 3.2 Les Convertisseurs Statiques

Dans un système électrique à énergie renouvelable des convertisseurs sont utilisés pour charger des batteries de stockage et pour transformer le CC en CA et vice-versa. Deux types de convertisseurs sont souvent rencontrés dans les SEH : les redresseurs et les onduleurs.

Les redresseurs réalisent la conversion CA/CC. Dans les systèmes à énergies Renouvelable, ils sont souvent utilisés pour charger des batteries à partir d'une source à CA. Ce sont des appareils relativement simples, pas chers et à bon rendement.

Les onduleurs réalisent la conversion CC/CA. Ils peuvent fonctionner en autonome pour alimenter des charges à CA ou en parallèle avec des sources à CA. Les onduleurs sont autonomes lorsqu'ils imposent leur propre fréquence à la charge. L'onduleur non autonome exige la présence d'une source à CA pour fonctionner. Il y a aussi des onduleurs qui peuvent assurer les deux régimes de fonctionnement : autonome ou en parallèle avec un autre générateur. Ceux-ci sont les plus flexibles, mais sont aussi les plus chers. Parfois, les fonctions de redresseur et d'onduleur sont réalisées par un seul appareil.

### 3.2.1 Le Convertisseur Alternatif/Continue (Redresseur)

Un redresseur est un convertisseur statique qui permet d'alimenter une charge continue à partir d'une source alternative. Cette alimentation est généralement, un générateur de tension.

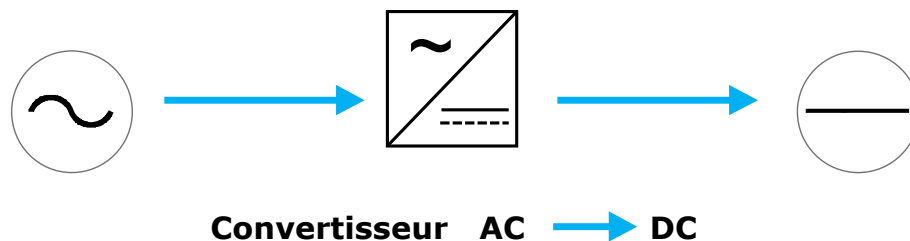


Figure 3.1– Schéma de principe de la conversion Alternatif – Continue (AC/DC)

On classe les divers redresseurs en trois catégories :

- ❖ **Les redresseurs non commandé** : ils sont à base de diodes, sont seulement utilisé lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée.

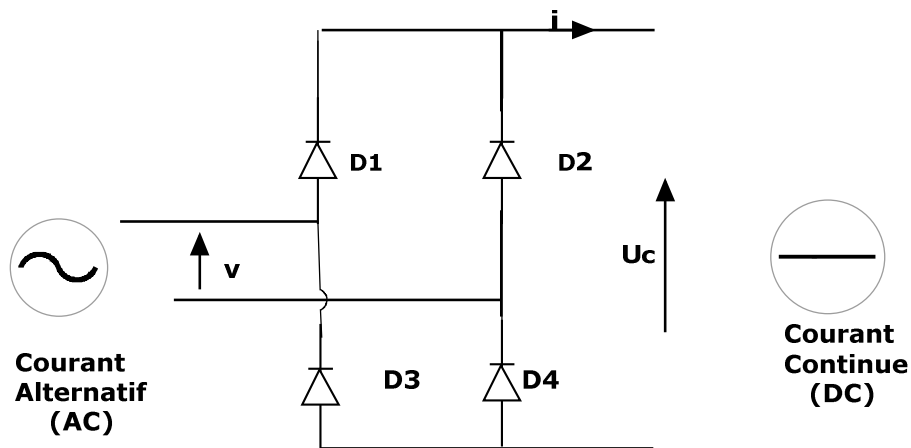


Figure 3.2– Redresseur non commandé

❖ **Les redresseurs semi commandés** : ils comportent des thyristors et des diodes qui empêchent la tension aux bornes de la charge de s'inverser, mais permettent de régler la tension moyenne. Les redresseurs non commandés et les redresseurs semi commandés sont appelés les convertisseurs unidirectionnels car la puissance peut circuler que de l'alimentation alternative vers la charge continue.

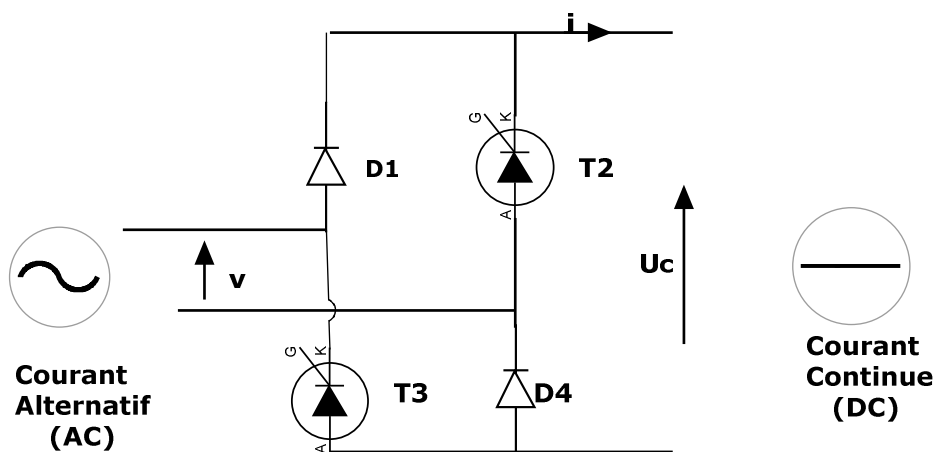


Figure 3.3– Redresseur semi-commandé



❖ **Redresseur commandé** : ne comporte que des thyristors, ils sont appelés les convertisseurs bidirectionnels car la puissance peut circuler dans les deux sens.

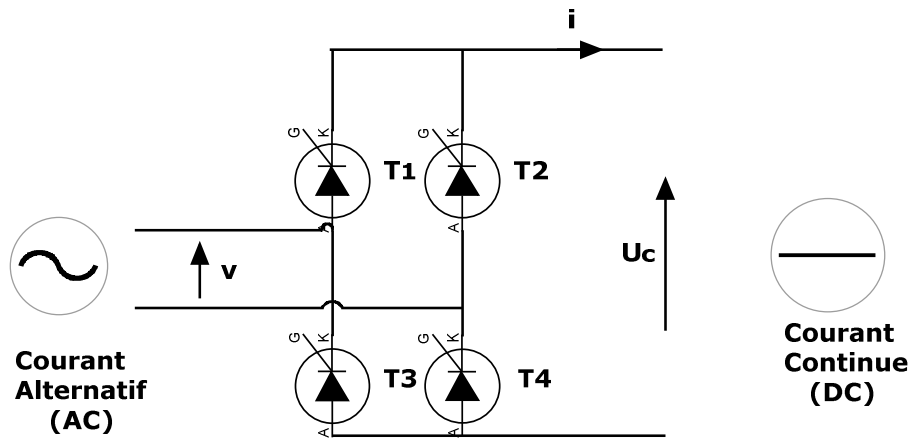


Figure 3.4– Redresseur commandé

La conversion électrique AC-DC est de plus en plus utilisée dans une grande diversité d'applications comme : les appareils domestiques, les ballasts électroniques, chargeurs de batterie, variateurs de vitesse des moteurs à courant continu, la conversion d'énergie

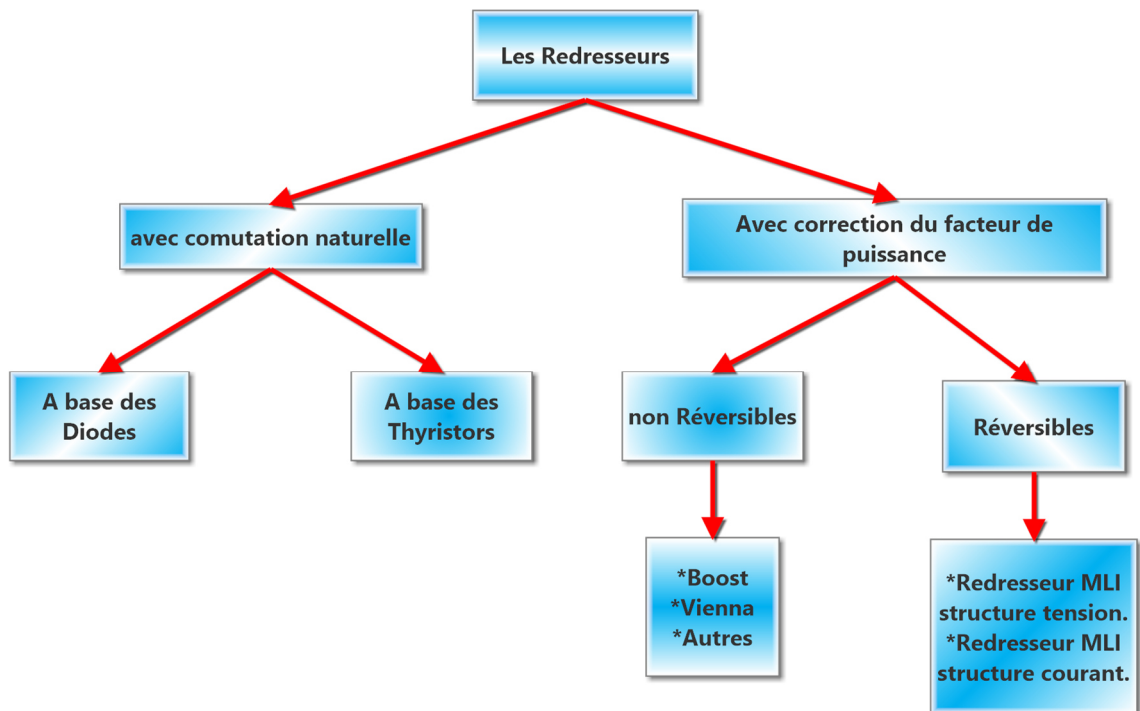


Figure 3.5– Topologies des différents types des convertisseurs AC-DC

Comme il est montré à la figure 3.5, les convertisseurs AC-DC peuvent être classés entre topologies fonctionnant avec une basse fréquence de commutation (avec commutation naturelle) et d'autres topologies qui fonctionnent avec une fréquence de commutation élevée (commandé). Les convertisseurs à commutation naturelle les plus simples utilisent des diodes pour transformer l'énergie électrique de forme AC en forme DC.

L'utilisation des thyristors permet le contrôle du flux d'énergie. L'inconvénient principal de ces convertisseurs est la génération des courants harmoniques et de puissance réactive [Moh07], donc les courants prélevés sur le réseau électrique par les ponts redresseurs à commutation naturelle (à diodes ou à thyristors) sont très loin d'être sinusoïdaux.

Les harmoniques générés ont un effet négatif sur le fonctionnement des systèmes électriques, et par conséquent, une prévenance croissante est accordée à leurs origines et aux méthodes de leur traitement. En particulier, plusieurs normes ont introduit des limites importantes et rigoureuses sur les harmoniques qui peuvent être injectés dans les systèmes électriques d'alimentation [Std14].

La conception de nouveaux convertisseurs moins polluants s'avère donc une nécessité. Cette catégorie de convertisseurs, qui génère moins d'effets nocifs sur le réseau, est devenue aujourd'hui plus attractive et répandue [Bou10].

### 3.2.2 Le Convertisseur Continu/Alternatif (Onduleur)

L'onduleur est un convertisseur statique permettant la conversion de l'énergie électrique sous sa forme continue (DC) vers la forme alternative (AC). Grâce à des composants semi-conducteurs commandés, il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace.

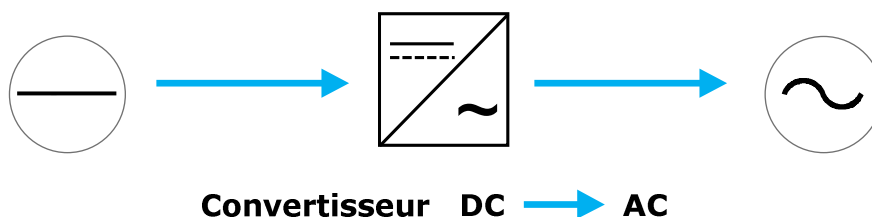


Figure 3.6– Schéma de principe de la conversion continu – alternative (DC/AC)

Selon la fréquence de la forme d'onde de sortie, il existe deux types d'onduleurs, à savoir: autonome et non autonome.

❖ **Onduleur Autonome** : Un onduleur est dit autonome, s'il impose sa fréquence propre à lui à sa tension de sortie. Autrement dit, on a accès au réglage de la fréquence par des signaux de commande issu d'une source auxiliaire. On distingue deux types d'onduleurs autonomes selon la grandeur du signal de commande : les onduleurs de tension et les onduleurs de courant [Ség95] [Wil99].

❖ **Onduleur non Autonome** : C'est un redresseur tous thyristor en commutation naturelle assisté par le réseau auquel il est connecté, il permet un fonctionnement en onduleur et le retour de l'énergie à la source continue [Ség95] [Wil99].

Ce fonctionnement est fréquent lors de freinage par récupération de l'énergie dans les entraînements à moteurs électriques.

Dans ce cas, la fréquence de la tension de sortie est imposée par le réseau. Toutefois il existe un autre type d'onduleur dit à résonance.

❖ **Onduleur à résonance** : Ces onduleurs permettent d'imposer le courant ou la tension et la fréquence. Alors, pour le cas particulier où la charge est constituée d'un circuit oscillant peu amorti, on peut commander les interrupteurs à une fréquence très proche de la fréquence de résonance de la charge. Si la charge varie, la fréquence de commande varie. Ce qui signifie que la fréquence de l'onduleur dépende la charge, il n'est plus autonome. On distingue deux modèles à résonance [Wil99] [D77] [Fio92].

- **Onduleur à résonance série** : Celui-ci débite sur un circuit RLC résonant série peu amorti. Dans ce cas, on dispose d'une inductance placée en série dans la charge, pour s'opposer aux discontinuités du courant, donc l'onduleur doit être alimenté par une source de tension.
- **Onduleur à résonance parallèle** : Ce dernier débite sur un circuit RLC résonant parallèle peu amorti. Pour cela, on dispose d'une capacité branchée entre les bornes de la sortie, pour s'opposer à la brusque variation de la tension, donc l'onduleur doit être alimenté par une source de courant continu.

### 3.2.3 Contrôle du courant par M.L.I

La méthode de contrôle des courants par modulation de largeur d'impulsion (M.L.I) à partir d'une source de tension continue, consiste à imposer aux bornes de la machine des créneaux de tension de manière que le fondamental de la tension soit le plus proche de la référence de la tension sinusoïdale.

La M.L.I. est obtenue par la comparaison de deux signaux :

- Un signal triangulaire de haute fréquence ( $F_p$ ) appelé "porteuse".
- Un signal de référence appelé "modulatrice", de fréquence  $F_m \ll F_p$ .

Les intersections de ces deux signaux déterminent les instants de commutation des interrupteurs de l'onduleur.

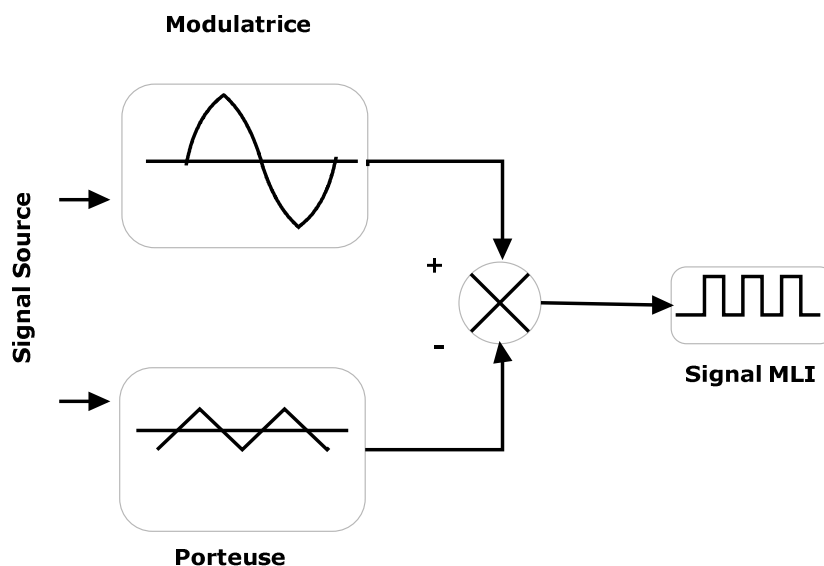


Figure 3.7– Schéma synoptique d'un MLI

Ces deux signaux sont définis comme étant :

**L'onde porteuse** : qui est signal à haute fréquence (en général, une onde triangulaire).

**L'onde modulatrice** : qui est un signal image de l'onde de sortie recherchée. (En général une onde sinusoïdale).

Deux principaux paramètres caractérisant la MLI, sont.

L'indice de modulation  $M_L$  : qui est défini comme étant le rapport de l'amplitude de l'onde modulatrice à celle de l'onde porteuse :

$$\mathbf{M}_L = \frac{V_m}{V_p} \quad (3.1)$$

Le rapport de modulation  $M_r$ : qui est défini comme étant le rapport de la fréquence de l'onde porteuse à celle de l'onde modulatrice :

$$\mathbf{M}_r = \frac{F_p}{F_m} \quad (3.2)$$

### 3.2.4 M.L.I à échantillonnage naturel

L'échantillonnage naturel, est un processus de sélection naturelle des points échantillonnés, c'est la technique la plus utilisée et la plus simple, consiste à comparer le signal triangulaire (porteuse) avec un signal sinusoïdal (Modulatrice). L'intersection de ces deux signaux définit les instants de commutation des interrupteurs.

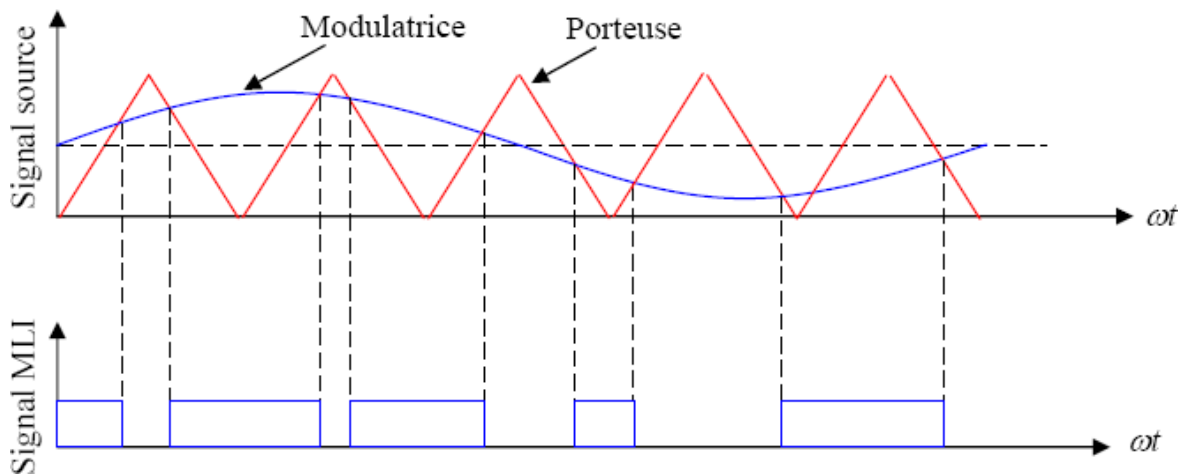


Figure 3.8–M.L.I à échantillonnage naturel

## 3.3 Configuration avec le Réseau

### 3.3.1 A vitesse Fixe

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières qui ont été développées. Dans cette technologie, la génératrice asynchrone est directement couplée au réseau, donc sa vitesse est imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice utilisée [Bou07].

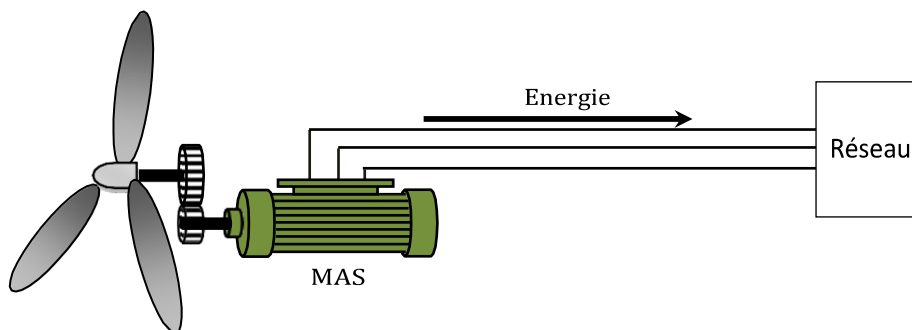


Figure 3.9– Eolienne à vitesse fixe

### 3.3.2 A vitesse Variable

Pour garantir un captage maximal de l'énergie incidente et d'améliorer le rendement et la qualité de la conversion de l'énergie, il faut ajuster en permanence la vitesse de l'éolienne à la vitesse du vent. L'optimisation de la puissance dans la charge ou le réseau récepteur peut s'effectuer par des commandes sur la turbine, sur la partie électrotechnique (générateur électrique lui-même et/ou paramètres de commande du convertisseur d'électronique de puissance).

Le fonctionnement à vitesse variable demande la définition d'une stratégie de commande globale de la turbine. Il faut donc indiquer les variations de la vitesse de rotation, couple ou puissance souhaitées en fonction des variations de la vitesse du vent [Bou07].

Le fonctionnement à vitesse variable est caractérisé par :[Tou09]

- Augmentation du rendement énergétique.
- Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance.
- Réduction des efforts subis par le train de puissance.
- Génération d'une puissance d'une meilleure qualité.

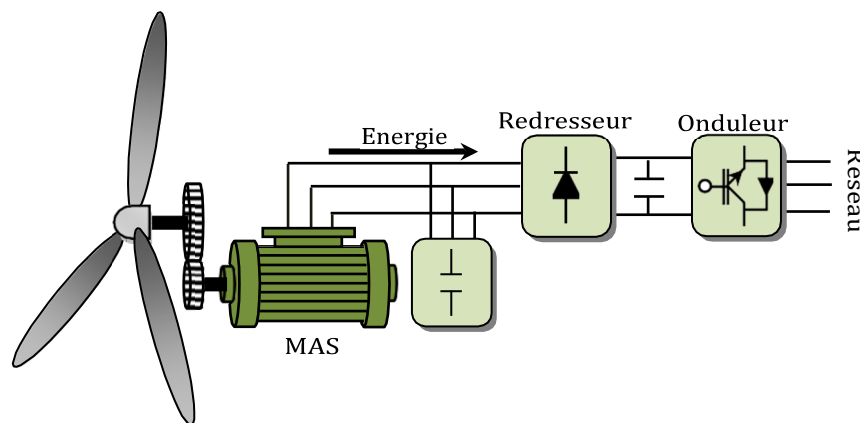


Figure 3.10– Eolienne à Vitesse Variable

### 3.3.3 Systèmes utilisant la machine Synchrones

Ces systèmes sont utilisés dans la plupart des procédés traditionnels de production de l'électricité, notamment dans ceux de très grande puissance (centrales thermique, hydraulique ou nucléaires). Les générateurs synchrones utilisés dans le domaine éolien, ceux de 500 kW à 2 MW sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille. De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la puissance électrique produite. C'est pourquoi, les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.

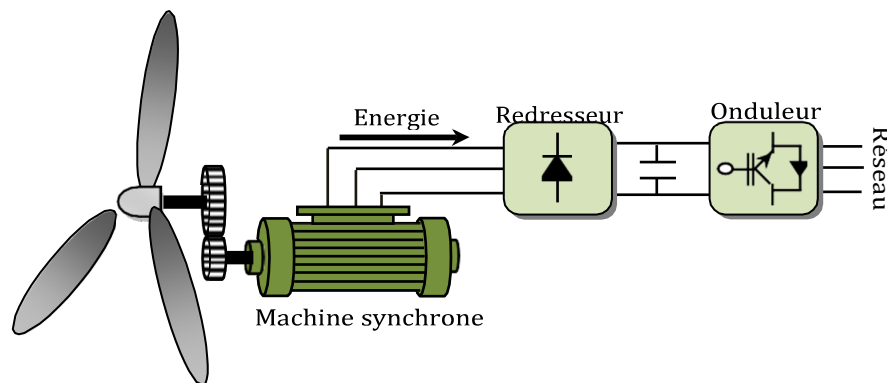


Figure 3.11– Système éolien à base d’une machine synchrone et des convertisseurs Statiques

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplées. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l’éolienne et amortir les fluctuations du couple. Certaines variantes des machines synchrones peuvent fonctionner à faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l’aéro-turbine. Elles permettent ainsi de se passer du multiplicateur de vitesse qui demande un travail auxiliaire de maintenance.

### 3.3.4 Systèmes utilisant la machine Asynchrone

#### 3.3.4.1 Machine Asynchrone à cage d’écureuil

La connexion directe au réseau de ce type de machines est plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. La simplicité de la configuration de ce système permet de limiter la maintenance de la machine. Son principal inconvénient est d’une part l’impossibilité de fonctionnement à vitesse variable, ce qui réduit la puissance pouvant être puisée du vent et d’autre part les problèmes d’accrochage/décrochage au réseau [Bel10].

L’insertion en parallèle des condensateurs avec les enroulements statoriques, permet de magnétiser la machine durant sa production de l’énergie.



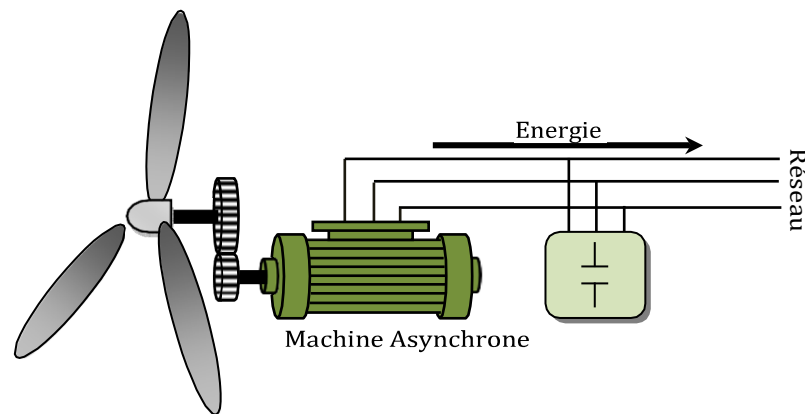


Figure 3.12– Machine asynchrone avec liaison directe au réseau

### 3.3.4.2 Machine Asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Cette configuration autorise un fonctionnement de l'éolienne à une vitesse variable du vent. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire.

La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau.

Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée [Bel 10].

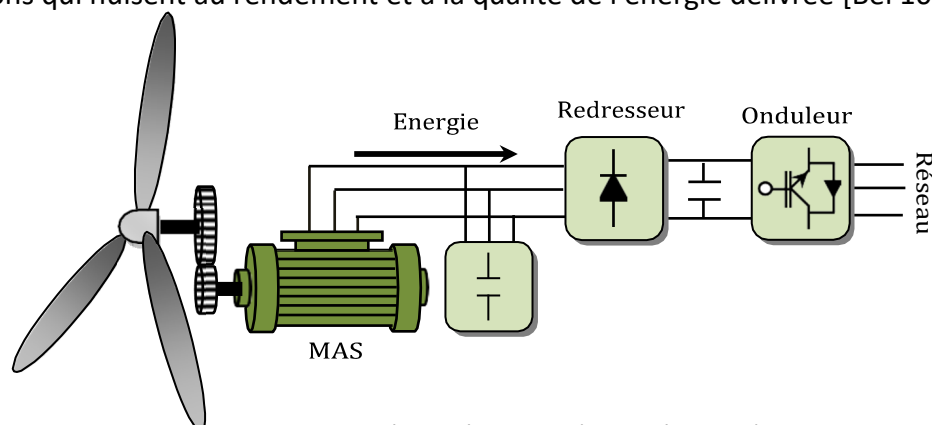


Figure 3.13– Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'un redresseur-onduleur

### 3.3.4.3 Machine Asynchrone à double alimentation type « Rotor bobiné »

Ce type d'aérogénérateur s'est développé récemment car la double alimentation de machine asynchrone permet une meilleure exploitation du potentiel de l'éolienne [Boy06].

Le stator est directement relié au réseau et les grandeurs rotoriques sont commandées par un convertisseur statique.

La MADA à rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants utilisent ce type de machines [Tir09].

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage.

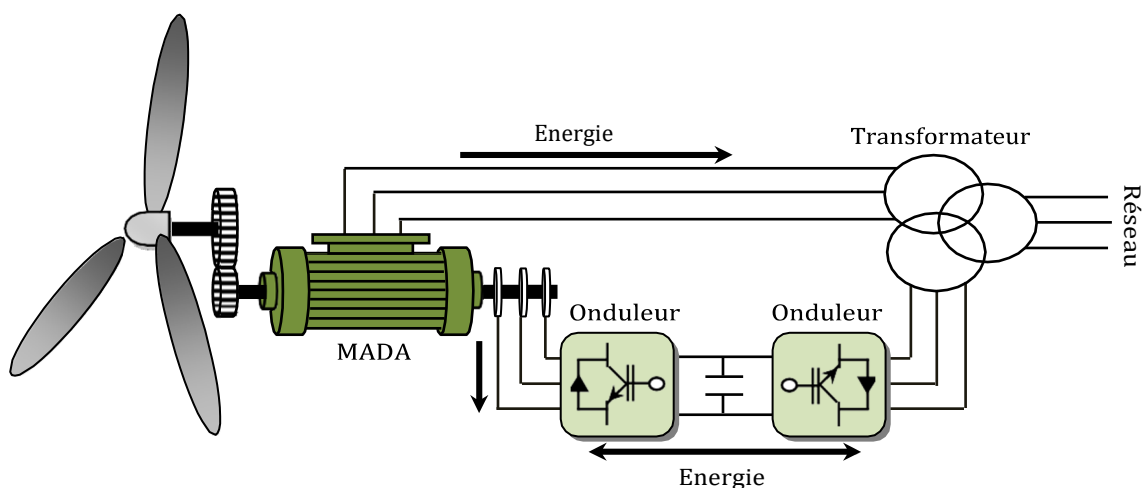


Figure 3.14—Machine asynchrone à rotor bobiné

#### 3.3.4.3.1 Structure de Kramer

Cette structure est appelée structure à base de pont à diode et pont à thyristors. Les tensions entre bagues sont redressées par un pont à diodes. Un onduleur à thyristors applique à ce redresseur une tension qui varie par action sur l'angle d'amorçage des thyristors.

Ce dispositif permet de faire varier la plage de conduction des diodes, de rendre variable la puissance extraite du circuit rotorique et donc le glissement de la génératrice asynchrone

le principal avantage est que l'onduleur est assez classique, et moins coûteux, puisqu'il s'agit d'un onduleur non autonome dont les commutations sont assurées par le réseau [Dje09].

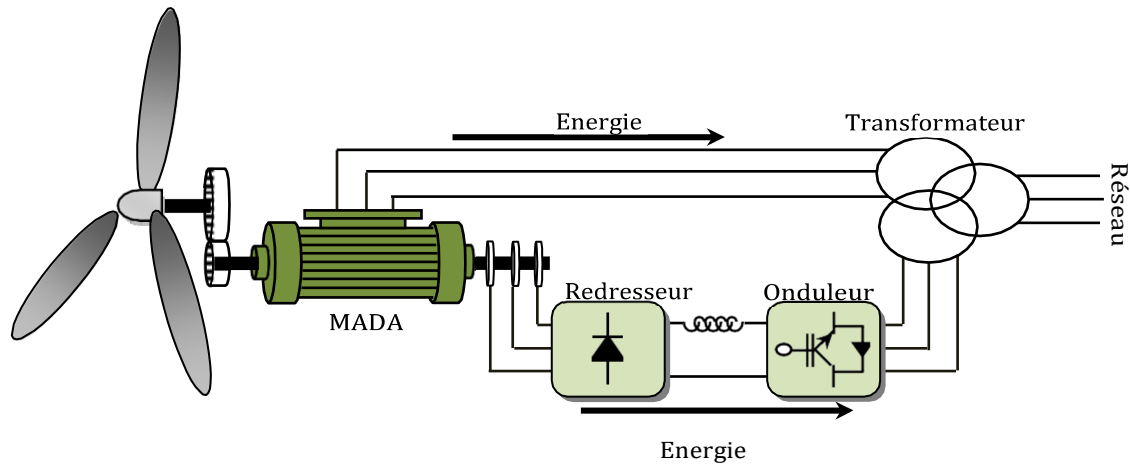


Figure 3.15–Structure de KRAMER pour la MADA

### 3.3.4.3.2 Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

L'association redresseur-onduleur peut être remplacée par un cycloconvertisseur afin d'autoriser un flux d'énergie bidirectionnel entre le rotor et le réseau, l'ensemble est alors appelé : structure de SCHERBIUS [Tir09].

Ce montage est aussi connu sous la dénomination "topologie statique de SCHERBIUS". Formellement, le principe de SCHERBIUS est basé sur l'utilisation de la machine tournante au lieu des convertisseurs de puissance.

Dans cette configuration, le principe de SCHERBIUS est reproduit à l'aide d'un cycloconvertisseur. Son utilisation génère par conséquent des perturbations harmoniques importantes qui nuisent au facteur de puissance du dispositif. Les progrès de l'électronique de puissance ont conduit au remplacement du cycloconvertisseur par une structure à deux convertisseurs à IGBT (Transistors Bipolaires à Gâchette Isolée) commandés en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) [Tir09].

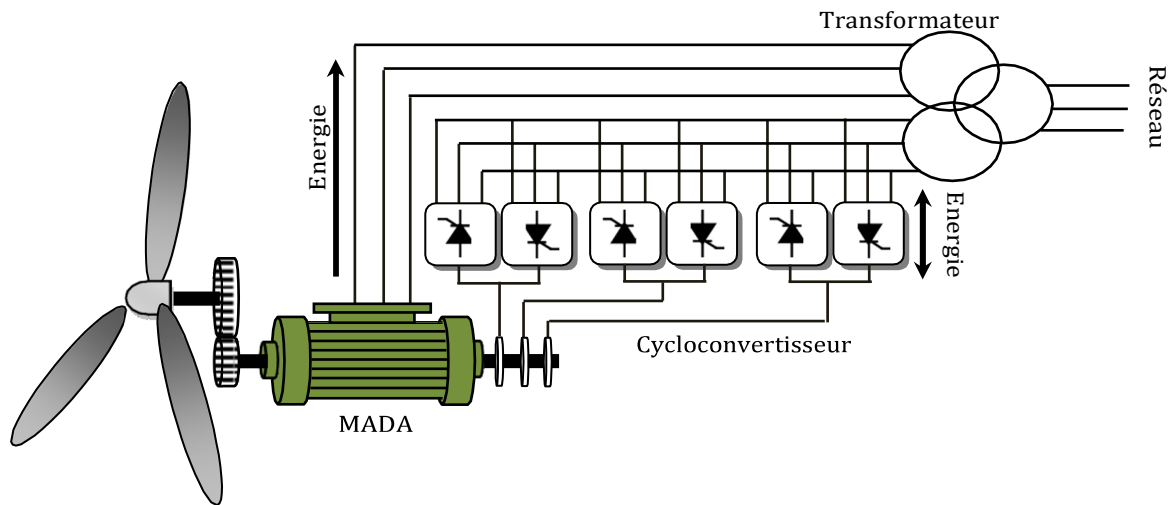


Figure 3.16– Structure de SCHERBIUS avec cycloconvertisseur

### 3.3.4.3.3 Structure de Scherbius avec convertisseurs M.L.I

Une autre structure intéressante utilise deux ponts triphasés d'IGBT (Transistors Bipolaires à Gâchette Isolée) commandables à l'ouverture et à la fermeture et leur fréquence de commutation est plus élevée que celle des GTO (Gate Turn Off).

L'utilisation de ce type de convertisseur permet d'obtenir des allures de signaux de sortie en modulation de largeur d'impulsions, dont la modularité permet de limiter les perturbations en modifiant le spectre fréquentiel du signal [Tir09].

Ce choix permet un contrôle du flux et de la vitesse de rotation de la génératrice asynchrone du côté de la machine et un contrôle des puissances active et réactive transitées du côté réseau. Cette configuration hérite des mêmes caractéristiques que la structure précédente. La puissance rotorique est bidirectionnelle. La bidirectionnalité du convertisseur rotorique autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone et le contrôle du facteur de puissance côté réseau. Il est à noter cependant que le fonctionnement en MLI (Modulation de Largeur d'Impulsions) de l'onduleur du côté réseau permet un prélèvement des courants de meilleure qualité [Tir09].

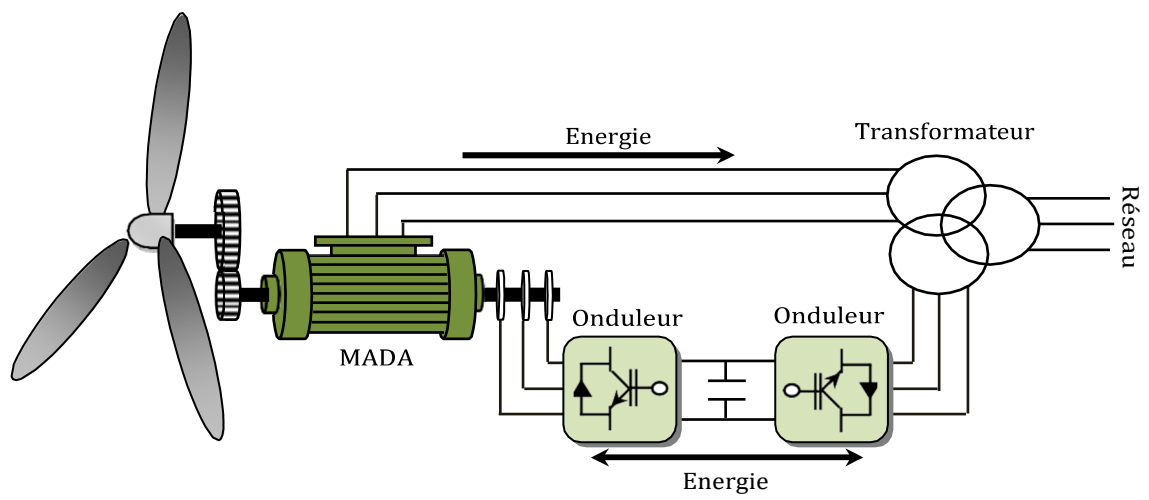


Figure 3.17– Structure de SCHERBIUS avec convertisseur MLI.

### **3.4 Conclusion**

Nous avons cité dans ce chapitre les différents convertisseurs statiques (redresseur & onduleur) avec les différents schémas avec le principe de fonctionnement de chaque type des convertisseurs.

Ainsi que la configuration avec le réseau des convertisseurs dynamiques & statiques, avec les schémas de présentation de chaque type.

## Conclusion Générale

La maîtrise de l'énergie est de nos jours un défi politique et économique qui engendre des conflits. Mais comment maîtriser la demande énergétique ? Une alternative est déjà de réduire nos consommations d'énergie primaire (gaz, pétrole, charbon...) en utilisant des énergies primaires renouvelables plus abondantes et moins coûteuses lors de leur transformation ou de leur conversion. Parmi ces énergies, l'énergie éolienne, qui est appelée à jouer un rôle plus important dans la production d'énergie renouvelable, sans rejet toxique ni émission de CO<sub>2</sub>.

Dans ce travail, Nous avons présenté un état de l'art des systèmes de conversion de l'énergie éolienne (dynamiques & statiques), ainsi qu'une recherche bibliographique sur le domaine des énergies renouvelables nous a permis de connaître les différentes formes d'énergies existantes dans le monde, en particulier l'énergie éolienne, à laquelle nous accordons plus d'importance, car elle était l'objet de ce travail.

Nous avons défini les types de l'énergie renouvelable (l'énergie solaire photovoltaïque, le solaire thermique à basse température, le solaire thermique à haute température, la biomasse, l'énergie Hydraulique-Hydroélectricité) et bien sûr l'énergie éolienne.

Nous avons donné un bref historique de l'énergie éolienne et les causes de son émergence, les différents types des éoliennes avec les schémas concernant les différents composants des éoliennes, en terminant avec le principe de fonctionnement d'éolienne avec les deux installations éoliennes (onshore-offshore).

Le second chapitre parlé des convertisseurs dynamiques des éoliennes, avec description du principe de l'aérodynamique (loi de BETZ, Coefficient de puissance), les multiplicateurs utiliser dans l'aérogénérateur. Avec la définition des conversions électromécaniques utiliser dans l'éolienne.

Il y a deux types : Génératrice Asynchrone (à cage d'écureuil, à rotor bobiné et à double alimentation (MADA)), Et génératrice synchrone (à rotor bobiné ou à aimants, à aimants permanents discoïde, Vernier à aimants).

Nous avons essayé de définir chaque générateur avec des graphiques et schémas explicatifs, en citant les avantages et les inconvénients de chaque générateur à la fin de ce chapitre.

Nous attirons votre attention que la configuration de chaque générateur a été laissée au dernier chapitre.

Dans le troisième chapitre, nous avons présenté les convertisseurs statiques (redresseur & onduleur), avec la définition des types des redresseurs (commandé, semi-commandé et non commandé) avec schéma de chaque type.

Le deuxième type des convertisseurs : onduleur (Autonome, non Autonome et à résonance), avec le principe de fonctionnement de chacun, avec le Contrôle du courant par M.L.I.

A la fin du troisième chapitre nous avons présenté la configuration des deux Convertisseurs (dynamiques & statiques) avec le réseau électrique.

D'après notre modeste travail nous avons abouti à ce qui suit :

Le coût d'utilisation de l'énergie éolienne est très élevés, car l'entretien périodique de cette technologie est très coûteux, ainsi que son invalidité dans tous les domaines, notant que la quantité d'énergie produite à partir de celle-ci est faible par rapport aux sources actuellement utilisées (uranium, pétrole, gaz,,,) On ne peut donc pas s'y fier complètement sous prétexte que la technologie qui y est utilisée n'a pas atteint une maturité suffisante.

En perspectives de ce travail, on pourra envisager plusieurs études plus accentuées sur ce domaine, à savoir :

- L'amélioration des technologies utilisées dans les générateurs.
- L'utilisation de méthodes meilleures et nouvelles dans les convertisseur statiques comme les convertisseurs matriciels .



## Bibliographie

- [Abd07] A. Abdelli, « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse, 2007.
- [Arg82] A. ARGAND, « L'énergie électrique d'origine éolienne », RGE 1/82, pp.43-50, janv. 82.
- [Bel10] S. Belakehal, "Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables". Thèse de doctorat, Université de Constantine, Algérie, 2010.
- [Bou07] O. Bouhali, "Contribution des convertisseurs multiniveaux au raccordement de la production d'origine éolienne sur un réseau électrique". Thèse de doctorat, Ecole nationale polytechnique, Lille, France, 2007.
- [Bou10] Bouafia Abdelouahab, "Techniques de Commande Prédictive et Floue pour Les Systèmes d'Electronique De Puissance : Application Aux Redresseurs à MLI" Thèse de doctorat, Université FERHAT ABBAS - SETIF, 2010.
- [Boy06] A. Boyette, "Contrôle. commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne". Thèse de doctorat, Université de Henri Poincaré, Nancy I, France, 2006.
- [D77] « Onduleur de tension: mise en œuvre et Structures-principes-applications », Techniques d'ingénieur, Traité de génie électrique D.3176-3177.
- [Dje09] Y. Djeriri, "Commande vectorielle d'une MADA intégrée à un système éolien". Mémoire de magister, Université de Sidi Bel. Abbés, Algérie, 2009.
- [Fer09] K. Ferkous « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Mémoire de Magistère de l'Université Mentouri, Constantine, Algérie, 2009.
- [Fio92] J. N. Fiorina « Onduleurs et harmoniques », Cahiers techniques N°159, Schneider électrique, 1992.
- [Ger02] O. Gergaud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » Thèse de doctorat de l'ENS de Cachan, France, 2002.
- [Har03] Haritza CAMBLONG, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variables », Thèse Doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, France, 2003.
- [Kel11] Kelkoul Bahia « Etude et Commande d'une Turbine Eolienne Utilisant une Machine Asynchrone à Double Alimentation », Mémoire de Magister Université de Tlemcen Faculté de Technologie Département de Génie Electrique et Electronique 2011.

- [Lud04] Ludovic LECLERCQ, « Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes », Thèse Doctorat de l'université de Lille, 2004.
- [Luo14] LUO, Shaohua. Adaptive fuzzy dynamic surface control for the chaotic permanent magnet synchronous motor using Nussbaum gain. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, 2014, vol. 24, no 3, p. 033135. (tese)
- [Mes14] MESSADI, M., MELLIT, A., KEMIH, K., et al. CGPC Control of Chaos in a Permanent Magnet Synchronous Motor Using the Gradient Conjugate and the Genetic Algorithm. 2014.
- [Mig06] Miguel LOPEZ, « Contribution a l'optimisation d'un système de conversion éolien pour une unité de production isolée », Thèse Doctorat de l'université Paris-sud 11, 2006.
- [Mir05] A. MIRECKI, « Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance », Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse. 2005.
- [Moh07] N. Mohan and T. M. Undeland, *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons, 2007.
- [Mul04] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud, H. Ben Ahmed, « Aérogénérateurs électriques », *Techniques de l'ingénieur*, D3960, 2004.
- [Mul08] B. Multon, «Energie électrique : les enjeux». Ecole Normale Supérieure de Cachan,2008.
- [Mul12] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM, S. ASTIER, ET AL, « Etat de l'art des aérogénérateurs ». *L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables*, Ed. NOVELECT - ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, pp.97-154,2002.
- [Ngu14] NGUYEN, Tat-Bao-Thien, LIAO, Teh-Lu, et YAN, Jun-Juh. Adaptive sliding mode control of chaos in permanent magnet synchronous motor via fuzzy neural networks. *Mathematical Problems in Engineering*, 2014, vol. 2014.
- [Pal05] B. Paluch, « Introduction à l'énergie éolienne », *Revue REE*, no. 5, pp. 35-50, Mai 2005.
- [Poi03] F. Poitiers, "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne", Thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, 19-12-2003.
- [Red09] Redjem Radia: « Étude d'une Chaîne de Conversion d'Energie Eolienne »,Mémoire de Magister Université Mentouri de Constantine, Faculté des Sciences de L'ingénieur Département d'Electrotechnique, 2009.
- [Rob06] B. Robyns, A. Davigny, C. Saudemont, A. Ansel, V. Courtecuisse, B. François, S.Plumel, J.Deuse, "Impact de l'éolien sur le réseau de transport et la qualité de l'énergie ", *Revue J3Ea*, vol. 5, Hors Série 1, EDP Science, 2006.

- [Ség95] G. Séguier, R. Bausière, F. Labrique « Les convertisseurs de l'électronique de puissance la conversion alternative », Volume 4, Edition tec&doc, 1995.
- [Std14] "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electric Power Systems," I. Std. 519-2014, 2014.
- [Tir09] Z. TIR, "Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade". Mémoire de magister, Université de Sétif, Algérie, 2009.
- [Tou09] B. Toual, "Modélisation et commande floue optimisée d'une génératrice à double alimentation, application à un système éolien à vitesse variable". Mémoire de magister, Université de Batna, Algérie, 2009.
- [Wil99] T. Wildi « Electrotechnique », 3ème édition de Boeck université, 1999.
- [Zhe15] ZHENG, Henghuo, CHEN, Qiang, et TANG, Xiaoqing. Composite chattering-free sliding mode control of chaotic permanent magnet synchronous motors. In : Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2015 IEEE 10th Conference on. IEEE, 2015. p. 1588-1592

## Résumé

Grâce à notre modeste travail dans ce mémoire, nous avons pu mentionner un résumé de quelques types d'énergies renouvelables actuellement disponibles, et nous avons choisi les énergies éoliennes comme le centre de notre sujet.

Dans le premier chapitre, les différentes définitions des énergies renouvelables et leurs types ont été évoquées. Nous nous sommes également concentrés sur l'énergie éolienne en termes d'histoire de son émergence, ainsi que ses types, ainsi que le principe de son fonctionnement.

Dans le deuxième chapitre, le mécanisme aérodynamique qui déplace la turbine est mentionné, qui à son tour déplace le transformateur dynamique qui convertit l'énergie éolienne en énergie électrique.

Dans le dernier chapitre, nous avons discuté du mécanisme de l'électronique de puissance utilisée dans la production d'énergie électrique, en plus de mentionner la méthode de connexion des transformateurs dynamiques et statiques au réseau électrique.

## ملخص

تمكنا من خلال عملنا المتواضع بهاته المذكورة، من القيام بذكر ملخص عن بعض أنواع الطاقات المتجددة المتاحة حاليا، وخصصنا بالذكر، طاقات الرياح محور موضوعنا. حيث تم ذكر بالفصل الاول، مختلف التعاريف الخاصة بالطاقات المتجددة وأنواعها، كما ركزنا على طاقة الرياح من ناحية: تاريخ ظهورها وكذا أنواعها، إلى جانب مبدأ عملها. وبالفصل الثاني تم ذكر آلية عمل الإنسيابية الهوائية، التي تعمل على تحريك العنفة والتي بدورها، تقوم بتحريك المحول الديناميكي، الذي يحول طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية. وبالفصل الأخير، تطرقنا إلى آلية عمل الكترونييات الطاقة، التي يتم توظيفها في انتاج الطاقة الكهربائية إلى جانب ذكر طريقة ربط المحولين الديناميكي والساكن مع الشبكة الكهربائية.



Mohamed El Bashir El Ibrahimi University, Bordj  
Bou Arreridj, Algeria

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريريج  
Mohamed El-Bashir El-Ibrahimi University of Bordj Bou Arreridj



Mohamed El Bashir El Ibrahimi University, Bordj  
Bou Arreridj, Algeria

Faculty Science & Technologies .  
Department Electromécanique

كلية علوم وتكنولوجيا.  
قسم الإلكتروميكانيك

## تعهد الطالب بإنجاز مشروع الماستر (ملحق رقم 04)

السنة الجامعية: 2022/2021

أنا الممضي أدناه الطالب:

قسم مخصص للإدارة
الاسم واللقب: والي عبد اللطيف الشعبة/التخصص: آلية/ إعلام آلي صناعي عنوان المذكرة: Etat de l'Art sur les Convertisseurs Dynamiques & Statiques utilisés dans la production éolienne

أتعهد بما يلي:

1. القيام بالعمل الذي يكلفني به المشرف في إطار مشروع الماستر؛
2. الالتزام الصارم بتوجيهات المشرف، مع احترام الجدول الزمني لإنجاز المشروع؛
3. احترام القواعد الداخلية للمخبر أو مكان انجاز المشروع، مع التواجد به بانتظام؛
4. إبلاغ المشرف بأي صعوبات أو مشاكل تتعلق بتحقيق المشروع؛
5. إبلاغ رئيس القسم بالمشكلات الخطيرة أو المستعصية التي يمكن أن تعرض عملي للخطر.

امضاء الطالب

*Ali*

برج بوعريريج، في: 2022/06/26





Mohamed El Bashir El Ibrahimi University, Bordj  
Bou Arreridj, Algeria

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
People's Democratic Republic of Algeria  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - برج بوعريجة  
Mohamed El-Bashir El-Ibrahimi University of Bordj Bou Arreridj



Mohamed El Bashir El Ibrahimi University, Bordj  
Bou Arreridj, Algeria

Faculty Science & Technologies .  
Department Electromécanique

كلية علوم وتكنولوجيا.  
قسم الإلكترونيك

## تصريح شرفي خاص بالالتزام بقواعد النزاهة العلمية لإنجاز مشروع الماستر (ملحق رقم 05)

السنة الجامعية: 2022/2021

أنا الممضي أدناه، الطالب:

قسم مخصص للإدارة
الاسم واللقب: والي عبد اللطيف
الشعبة/التخصص: آلية/إعلام آلي صناعي

من طرف: دائرة برج بوعريجة

والصادرة بتاريخ: 2016/04/14

100546283 رقم: التعريف الوطنية رقم:

قسم: الإلكترونيك

المسجل بكلية: علوم وتكنولوجيا

والمكلف بإنجاز أعمال بحث مذكرة ماستر عنونها:

Etat de l'Art sur les Convertisseurs Dynamiques  
& Statiques utilisés dans la production éolienne

أصرح بشرفي أنني ألتزم بمراعاة المعايير العلمية والمنهجية ومعايير الأخلاقيات المهنية والنزاهة الأكاديمية المطلوبة في إنجاز البحث المذكور أعلاه.

امضاء الطالب

برج بوعريجة، في: 2022/06/26