

## I.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes [05]. Les caractéristiques mécaniques de l'éolienne et l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique sont très importantes. De nombreux dispositifs existent associés à des machines synchrones et asynchrones. L'objectif des commandes appliquées à ces derniers est de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité.

## I.2 Définition de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible à base d'un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure. I.1) [06].

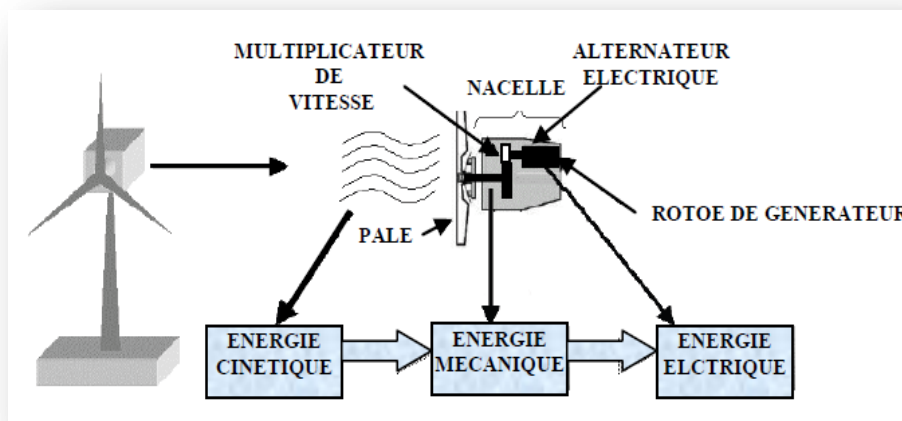


Figure.I.1 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Le SCE (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la (Figure. I.2) [07].

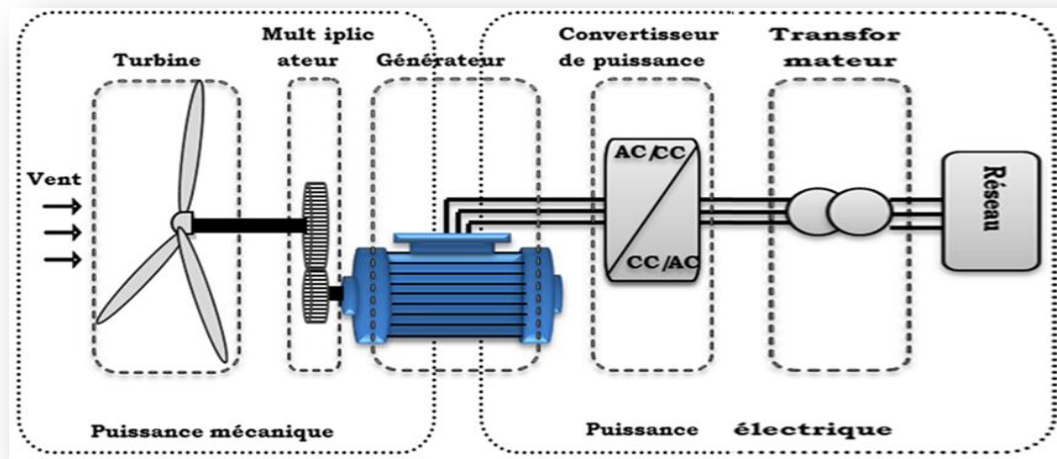


Figure.I.2 : Principaux organes du système de conversion éolien.

### I.3 Historique

- Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environs 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle), le pompage d'eau et le forage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable, [08].
- Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le Danois Poul La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité [09].
- Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle [05].
- C'est principalement la crise pétrolière de 1974 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée. Plusieurs pays ont commencé l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144 machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985[05].
- Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui a permis un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au

marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW [05].

- Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles à savoir les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés) [10].

## **I.4 Perspectives d'offre d'énergie**

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis à vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. En effet, la consommation mondiale d'énergie ne cesse de croître (Figure I-3 données 2000 selon [7] et [9])

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La Figure (I.4) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre [10], [11] qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs [11].

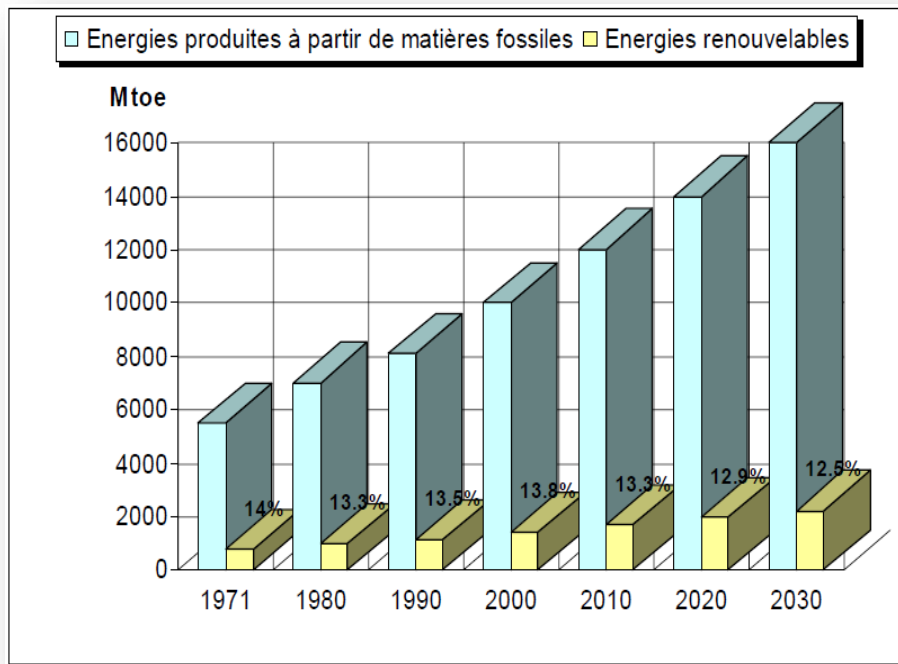


Figure I-3 : Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions.

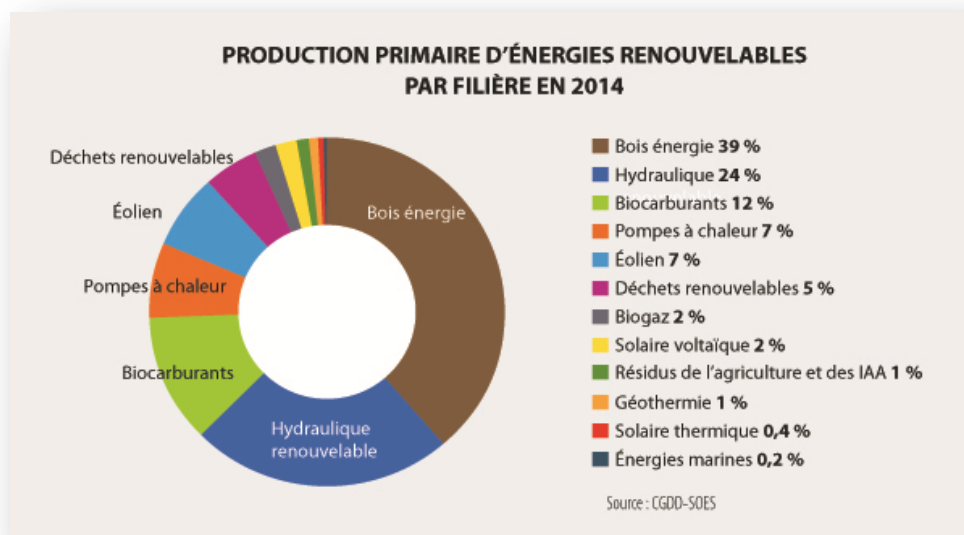


Figure.I.4 : Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde en 2014.

L'autre argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en énergies. Dans le courant de 21ème siècle, le paysage énergétique va radicalement changer car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître [12]. De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour «tenter»

de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique, photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres [9]. Dans le contexte économique actuel, les installations à énergie renouvelable peuvent encore aujourd'hui avoir un coût important (exemple des panneaux solaires photovoltaïques) et sont donc plutôt réservées à des pays développés où elles peuvent dans d'autres cas être assez peu onéreuses (exemple de la combustion de la biomasse) et peuvent être utilisées dans les pays en voie de développement [11].

## I.5 Génération d'énergie renouvelable

Une des contraintes qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est le fait que la source ou la matière première n'est pas transportable. Un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés, les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées. Par la suite ; il est nécessaire de la transformer sous la forme électrique qui est accessible via les lignes électriques. Le problème rencontré avec les sources renouvelables est la disponibilité énergétique et le stockage de masse, actuellement principalement assuré par l'hydraulique.

Parmi les énergies renouvelables, on distingue trois grandes familles

- l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien),
- L'énergie électrique (panneaux photovoltaïques),
- L'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...)

En sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre [11]. Etant donné que l'énergie mécanique est difficile à transporter, elle n'est utilisable que par pompage direct. Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique [9].

A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient du non régularité des ressources .A l'opposé, les fluctuations de la demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La solution à retenir est certainement la diversification et le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne [9].

## I.6 Production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres. Une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement [13], [11]. Cette énergie a connu depuis environ 30 ans un essor sans précédent qui est dû notamment aux premiers chocs pétroliers [7], [13].

A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. En Europe, principalement sous l'impulsion Allemande, Scandinave et Espagnole, on comptait en 2000 environ 17 GW de puissance installée. Ce chiffre a presque doublé en 2003, soit environ 39 GW pour 40 GW de puissance éolienne installée dans le monde. En prévision, pour l'année 2010, on peut espérer une puissance éolienne installée en Europe de l'ordre 318 GW [14].

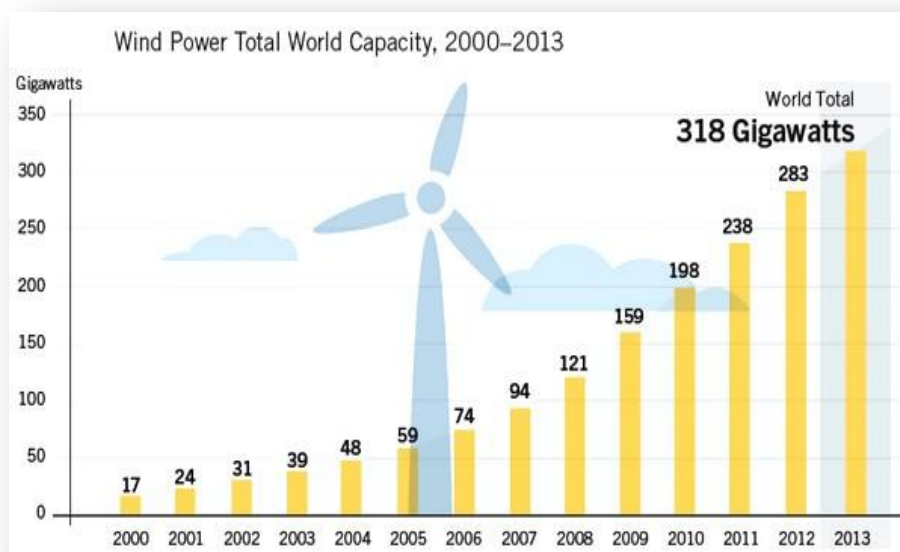


Figure.I.5 : Production de l'énergie éolienne dans le monde en2013.

## I.7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée à leurs avantages. Cette source d'énergie a également des inconvénients qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement [05].

### I.7.1 Avantages

- Renouvelable non dégradée, contrairement aux énergies fossiles,
- géographiquement diffusée,
- Propre et n'a aucun impact sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du  $\text{CO}_2$ ,
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit aucuns déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.

### I.7.2 Inconvénients

- la nature stochastique du vent influé sur la qualité de la puissance électrique produite,
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie,
- Le bruit existe toujours au niveau des multiplicateurs,
- Elle est toutefois aléatoire dans le temps,
- son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions [16].

## I.8 Types des turbines éoliennes

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se diffèrent essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. Selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal [17].

**Tableau.I.1** : les deux principaux type éoliennes (à axe vertical et à axe horizontal).

<b>Echelle</b>	<b>Diamètre de l'hélice</b>	<b>Puissance délivrée</b>
<b>Petite</b>	Moins de 12 m	Moins de 40KW
<b>Moyenne</b>	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
<b>Grande</b>	46 m et plus	1 MW et plus

### I.8.1 Eolienne à axe vertical

Ils ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Savonius et le rotor de Darrieux [17].



Figure. I.6 : technologie éolienne à axe vertical.

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue. Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit [18] [17].

#### Avantages

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

#### Inconvénients

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



### I.8.2. Eoliennes à axe horizontal

Ce sont les éoliennes actuellement les plus répandues sans doute à cause de leurs avantages remarquables, elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales face ou sous le vent [19] [17].

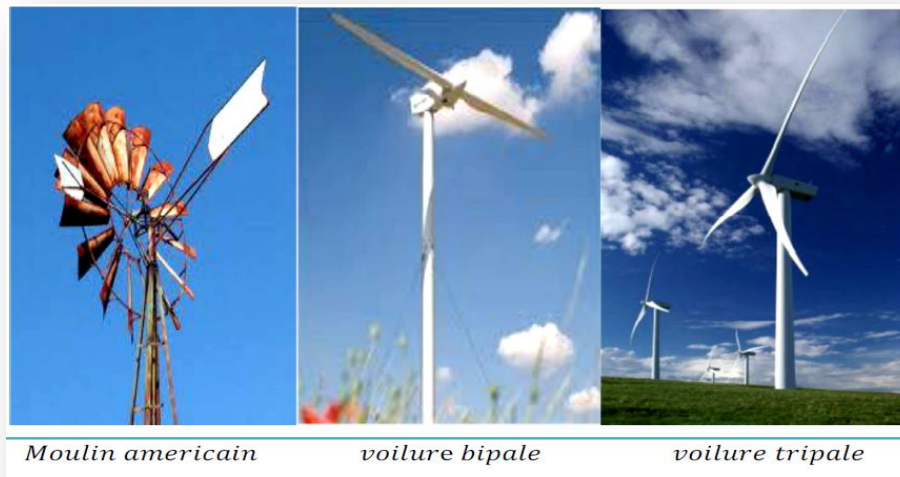


Figure.I.7 : technologie éolienne à axe horizontale.

#### Avantages

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

#### Inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.
- Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical sont encore utilisées pour la production d'électricité dans les zones isolées.
- Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple [17].

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch) [17].

## I.9 Les éléments constitutifs d'une éolienne moderne

La (Figure. I.8) représente une chaîne électromécanique à multiplicateur de vitesse d'une éolienne moderne tripale à axe horizontal de type Nordex N60 (1.3MW) [20].

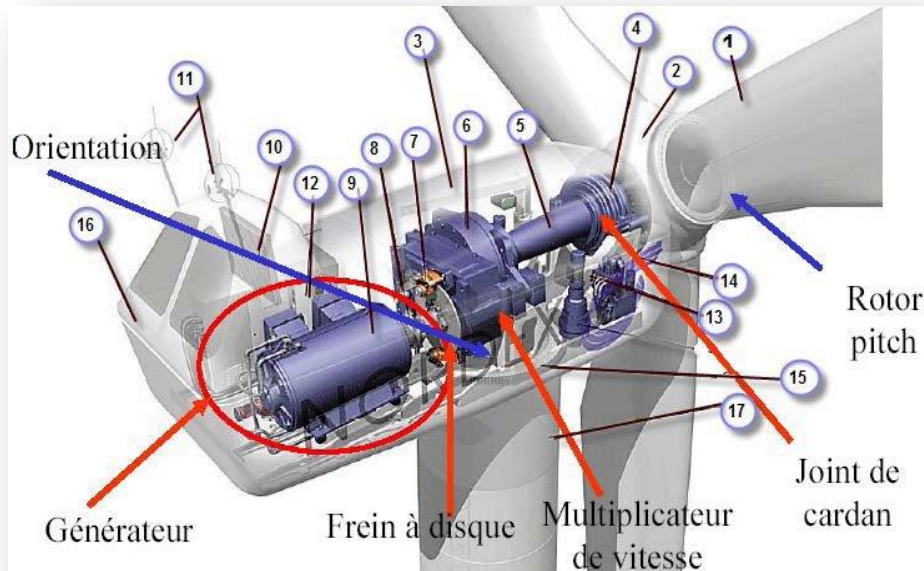


Figure.I.8 : Différentes parties de l'éolienne-NORDEX N60-1.3MW.

Tableau.I.2 : les principales parties de l'éolienne.

1 pales	7 frein à disque	13 centrale hydraulique
2 Moyeu de rotor	8 accouplement	14 mécanisme d'orientation des pales
3 nacelle	9 génératrices	15 paliers du système
4 cardan	10 radiateurs de refroidissement	16 capots
5 transmission	11 centrales de mesure du vent	17 mat
6 multiplicateur de vitesse	12 contrôle	

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

**Le mât**, généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité.

**La nacelle** regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique: arbres lent et rapide, roulements, multiplicateur. Le frein à disque, différent du frein aérodynamique, permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur est généralement une machine synchrone ou asynchrone. Les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle sont nécessaires pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent.

**Le rotor** est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3. Le rotor tripale est de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit. [21].

## I.10 Zones de fonctionnement de l'éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible.

Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau [9].

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, qui permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent [9]:

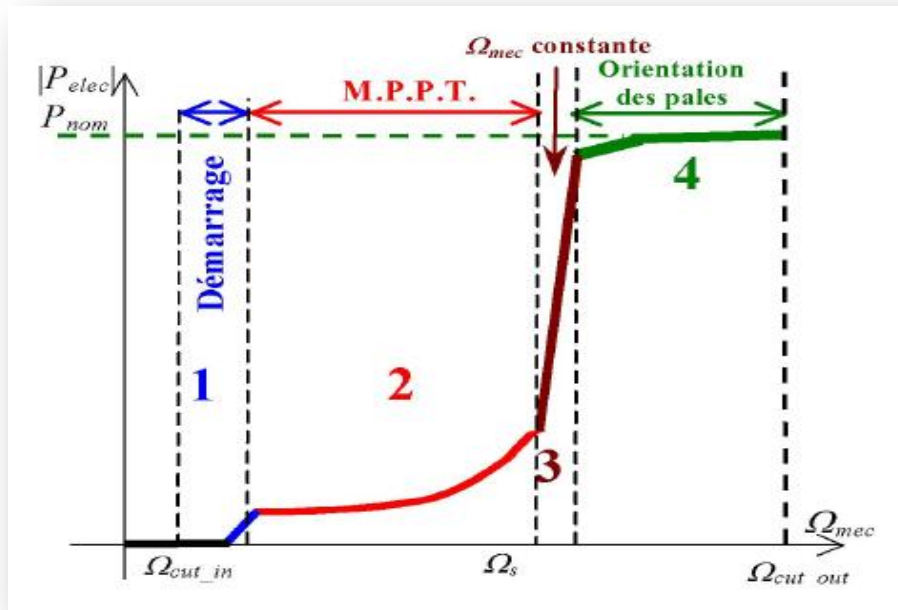


Figure. I.9 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

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

**Zone II (Zone de MPPT) :** L'extraction maximum de la puissance pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

**Zone III :** La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine, ou l'éolienne fonctionne à vitesse fixe. Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge [9].

**Zone IV :** arrivant à la puissance nominale, un système d'orientation des pales limite la puissance générée (pitch control).

## I.11 Systèmes de régulation de vitesse

Les éoliennes sont en générale construites de manière à atteindre leurs performances à une certaine vitesse de vent  $V_n$ . En cas de vitesse de vent supérieur à  $V_n$ , il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne. Toutes les éoliennes sont donc conçues avec un système de régulation de la puissance. Il y'a deux manières différentes de contrôler en toute sécurité la puissance extraite à sa valeur nominale [24].

### I. 11.1 Système de décrochage aérodynamique (Stall - control)

Consiste à concevoir la géométrie de la pale de façon à mettre à profit, en cas de vitesses de vent trop élevées, le décrochage aérodynamique en provoquant une turbulence sur la partie de la pale qui n'est pas face au vent (figure I.11), ce qui empêche la portance d'agir sur le rotor. Ce système est utilisé généralement dans les éoliennes à vitesse fixe de petites puissances [24].

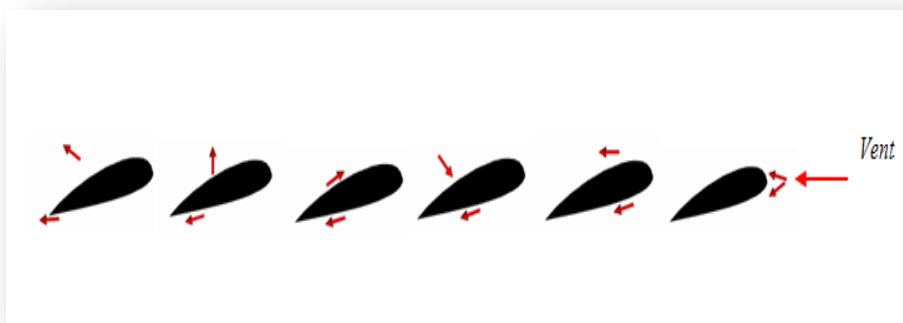


Figure. I.11: Système de décrochage aérodynamique.

Le système de régulation par décrochage aérodynamique a l'avantage d'éviter l'installation de pièces mobiles dans le rotor. L'inconvénient est qu'une telle régulation pose de grands défis à la conception aérodynamique des pales afin d'éviter l'apparition de vibrations par décrochage [24].

### I.11.2 Système d'orientation des pales (pitch control)

Nous avons vu dans l'expression du couple moteur que la résultante des forces appliquées à chaque pale dépendait de l'angle (calage + incidence).

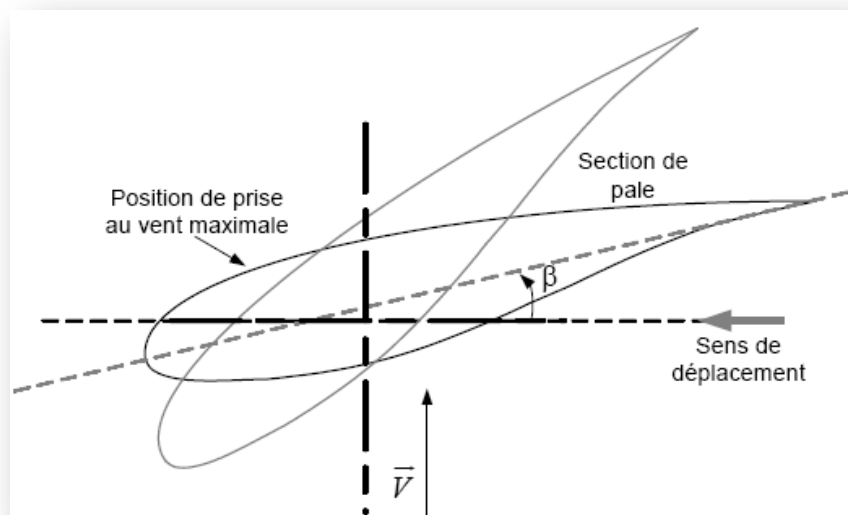
La régulation consiste à conserver la force  $F_{ax}$  constante, donc une fréquence de rotation constante de l'hélice pour toute une gamme de vitesse de vent comprise entre la vitesse dite vitesse nominale  $V_n$  et la vitesse maximale admissible par la machine.

Cette régulation est obtenue en faisant varier l'angle de calage, et par suite l'angle

d'incidence en pivotant les pales face aux fortes vitesses de vent par un dispositif de commande appelé « Pitch control » (Figure I.12). Ceci ajuste la portance des pales à la vitesse du vent et limite ainsi la puissance générée en modifiant le coefficient de puissance à des valeurs relativement faibles. A la vitesse maximale du vent, les pales atteignent leurs positions extrêmes et se disposent « en drapeau ». Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité.

Le système de régulation de la puissance par orientation des pales possède les avantages suivants [25]:

- 1- L'énergie produite est plus importante dans la plage de fonctionnement correspond aux grandes vitesses de vent par rapport au premier système.
- 2- Il offre un contrôle actif de puissance dans une large variation de la vitesse du vent.
- 3- Il facilite le freinage de l'éolienne.
- 4- Il réduit les efforts mécaniques pour un fonctionnement à puissance nominale.



**Figure. I.12:** Variation de l'angle de calage d'une pale.

Il existe divers types de systèmes de régulation de l'angle de calage de pales. Le pas peut être variable tout le long de la pale, ou uniquement sur le bout des pales. L'angle de calage est commandé soit par des masses en rotation utilisant la force centrifuge, soit par un système hydraulique ou des moteurs électriques. Le système hydraulique est le plus utilisé dans les aérogénérateurs de petites et moyennes puissances, alors que le système électrique est utilisé uniquement pour les grandes éoliennes [13], [15].

## I.12 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

Les deux types de machines utilisées dans les systèmes éoliens sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes [19], [17].

### I.12.1 Générateur synchrone

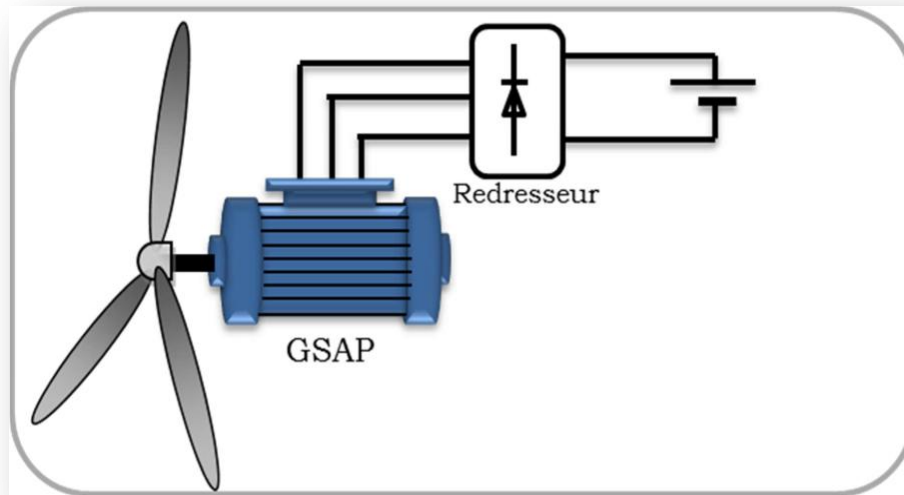
L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par un bobinage d'excitation conventionnel.

#### ▪ Générateur synchrone à aimants permanents (GSAP)

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction des machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs [17]. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables [26], [27]. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) ou génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur [19], [26], [28].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation [19], [18]. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles. La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

L'inconvénient majeur de l'utilisation de la GSAP est le coût des aimants utilisés. Toutefois certains d'entre eux sont réalisés à l'aide de terres rares et sont par conséquent très coûteux, bien que leur utilisation de plus en plus fréquente tende à faire baisser leur prix. De plus, les variations importantes de couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien risquent d'entraîner une démagnétisation des aimants lorsqu'ils sont constitués de matériaux classiques. Ceci contribue largement à la diminution de leur durée de vie [13], [29].



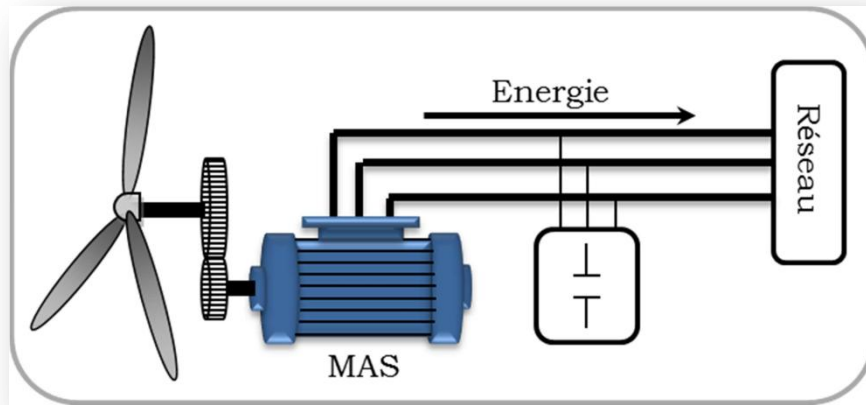
**Figure. I.13:** systèmes éoliens basés sur la GSAP avec convertisseurs MLI.

Dans la configuration de la GSAP de la (figure I.13), la génératrice est connectée à un redresseur triphasé [19]. La liaison au réseau est assurée par un onduleur MLI qui assure la régulation de la tension du bus continu aussi bien qu'il contrôle le facteur de puissance.

### **I.12.2 Machines Asynchrones (MAS)**

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée. Il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse.





**Figure. I.14:** Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau.

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. Son inconvénient majeur est la consommation d'un courant réactif de magnétisation au stator [09].

### I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, un état de l'art des systèmes éoliens a été présenté. La théorie des aérogénérateurs et leur principe de fonctionnement ainsi que les différents types ont été abordés en détail.

Nous avons abordé aussi les différentes architectures couramment utilisées dans les systèmes éoliens, ainsi que les différentes méthodes de commande et de contrôle employées pour améliorer leur efficacité énergétique. Dans cette gamme de puissance, un intérêt particulier est porté sur une structure éolienne qui présente de grands avantages aux niveaux, du coût, de la sûreté de fonctionnement et de fiabilité.

Dans le chapitre suivant, nous allons proposer la modélisation du vent et nous aborderons en détail la modélisation de la turbine éolienne tripale à axe horizontal, la GSAP et leur commande vectorielle et les convertisseurs de puissance associée (l'onduleur triphasé, redresseur).

<b><i>1.1 Introduction</i></b> .....	<b>3</b>
<b><i>1.2 Définition de l'énergie éolienne</i></b> .....	<b>3</b>
<b><i>1.3 Historique</i></b> .....	<b>4</b>
<b><i>1.4 Perspectives d'offre d'énergie</i></b> .....	<b>5</b>
<b><i>1.5 Génération d'énergie renouvelable</i></b> .....	<b>7</b>
<b><i>1.6 Production éolienne</i></b> .....	<b>8</b>
<b><i>1.7 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne</i></b> .....	<b>9</b>
<b><i>1.7.1 Avantage</i></b> .....	<b>9</b>
<b><i>1.7.2 Inconvénients</i></b> .....	<b>9</b>
<b><i>1.8 Types des turbines éoliennes</i></b> .....	<b>9</b>
<b><i>1.8.1 Eolienne à axe vertical</i></b> .....	<b>10</b>
<b><i>1.8.2. Eoliennes à axe horizontal</i></b> .....	<b>11</b>
<b><i>1.9 Les éléments constitutifs d'une éolienne moderne</i></b> .....	<b>12</b>
<b><i>1.10 Principe de fonctionnement d'une éolienne</i></b> .....	<b>13</b>
<b><i>1.10.1 Zones de fonctionnement de l'éolienne</i></b> .....	Erreur ! Signet non défini.
<b><i>1.11 Systèmes de régulation de vitesse</i></b> .....	<b>15</b>
<b><i>1.11.1 Système de décrochage aérodynamique (Stall - control)</i></b> .....	<b>15</b>
<b><i>1.11.2 Système d'orientation des pales (pitch control)</i></b> .....	<b>15</b>
<b><i>1.12 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne</i></b> .....	<b>17</b>
<b><i>1.12.1 Générateur synchrone</i></b> .....	<b>17</b>
<b><i>1.12.2 Machines Asynchrones (MAS)</i></b> .....	<b>18</b>
<b><i>1.13 Conclusion</i></b> .....	<b>19</b>

