

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département Génie Mécanique**

**Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement**

**Mémoire de Master en Génie Mécanique**

**Option : mécanique énergétique**

## **Les Systèmes de Contrôle et de Freinage des Eoliennes**

**Réalisé par :**

**Adel FELLOUS**

**Sous la direction de :**

**Pr. Arezki SMAILI**

**Mr. Madjid TATA**

**Présenté et soutenu publiquement le : 28/06/2016**

**Composition du Jury :**

<b>Président :</b>	<b>Saïd RECHAK</b>	<b>Professeur, ENP, Alger</b>
<b>Promoteur :</b>	<b>Arezki SMAILI</b>	<b>Professeur, ENP, Alger</b>
<b>Co-promoteur:</b>	<b>Madjid TATA</b>	<b>Attaché de Recherche, CDER, Alger</b>
<b>Examineur :</b>	<b>Mohamed BOUBAKEUR</b>	<b>Maître assistant A, ENP, Alger</b>

**ENP 2016**



**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**

**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**

**Ecole Nationale Polytechnique**



**Département Génie Mécanique**

**Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement**

**Mémoire de Master en Génie Mécanique**

**Option : mécanique énergétique**

## **Les Systèmes de Contrôle et de Freinage des Eoliennes**

**Réalisé par :**

**Adel FELLOUS**

**Sous la direction de :**

**Pr. Arezki SMAILI**

**Mr. Madjid TATA**

**Présenté et soutenu publiquement le : 28/06/2016**

**Composition du Jury :**

<b>Président :</b>	<b>Saïd RECHAK</b>	<b>Professeur, ENP, Alger</b>
<b>Promoteur :</b>	<b>Arezki SMAILI</b>	<b>Professeur, ENP, Alger</b>
<b>Co-promoteur:</b>	<b>Madjid TATA</b>	<b>Attaché de Recherche, CDER, Alger</b>
<b>Examineur :</b>	<b>Mohamed BOUBAKEUR</b>	<b>Maître assistant A, ENP, Alger</b>

**ENP 2016**

# *Remerciements*

*Je tien en tout premier lieu à remercier DIEU tout puissant d'avoir donné le courage, la volonté et la patience pour réaliser ce travail et d'achever mes études avec succès.*

*Je tien à exprimer ma reconnaissance à mon promoteur Monsieur A. SMAILLI, qui ma a donné l'occasion de travailler sur un sujet passionnant, pour ses conseils judicieux ainsi que pour l'intérêt qu'il a toujours porté à l'égard de mon travail.*

*Je tien à remercier mon Co-promoteur Monsieur M. TATA pour son aide, et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi que pour l'intérêt qu'il a toujours porté à l'égard de mon travail.*

*Je remercie également le président de jury Monsieur S. RECHAK et l'examineur Monsieur M. BOUBAKEUR d'avoir accepté d'examiner mon travail.*

*Je remercie enfin tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à ma formation et à la réalisation de ce travail.*

## ملخص

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو عرض التقنيات المختلفة المستخدمة لمراقبة وتنظيم القدرة الناتجة عن عنفة الرياح، وأيضا تقديم لأنظمة الحماية والكبح التي تحويها مختلف عنفات الرياح الصغيرة والكبيرة. بدءا بإعطاء نظرة عامة عن الطاقة التي تولدها الرياح، مرورا بمبدأ عمل هذه العنفات، لنصل في نهاية المطاف لشرح أنظمة الكبح وأنظمة التحكم الخاصة بطاقة الرياح بطريق مفصلة.

الكلمات الدالة: عنفة الرياح، السيطرة على الاستطاعة، نظام الكبح.

## Abstract

The main goal of this work is to introduce the different techniques used to control and regulate the power delivered by a wind turbine, and also introduce the protection and braking systems that exist in small and large wind turbines. Starting by giving generalities about wind energy, then, the operation principle of these wind turbines, to lead at the end to the presentation of the braking systems, and regulation systems for wind energy explained with details.

Keywords: Wind turbine, power control, braking system.

## Résumé

L'objectif principal du présent travail est de présenter les différentes techniques utilisées pour contrôler et réguler la puissance délivrée par une éolienne, et aussi présenter les systèmes de protection et de freinage qui existe au niveau des petites et grandes éoliennes. Commençant par donné des généralités sur l'énergie éolienne, en passant par le principe de fonctionnement de ces éoliennes, pour arriver enfin à la présentation des systèmes de freinage, et des systèmes de régulation de l'énergie éolienne d'une façon détaillées.

Mots clés : éolienne, contrôle de puissance, système de freinage.

# *Table des matières*

Liste des figures.....	6
Nomenclature.....	7
Introduction générale.....	8
Chapitre 1 : Généralité sur les éoliennes, et travaux antérieurs.....	10
1.1 Introduction.....	11
1.2 Définition d'une éolienne.....	11
1.3 Types d'éoliennes.....	12
1.3.1 Eolienne à axe vertical.....	13
1.3.2 Eoliennes à axe horizontal.....	13
1.4 Constitution d'une éolienne à axe horizontal.....	15
1.5 Principe de fonctionnement des éoliennes.....	16
1.6 La chaîne de transformation énergétique.....	17
1.7 Zones de fonctionnement de l'éolienne.....	18
1.8 Travaux antérieurs.....	20
Chapitre 2 : les système de contrôle et de freinages des éoliennes.....	23
2.1 Introduction.....	24
2.2 Contrôles de la conversion d'énergie.....	24
2.3 L'action du vent sur les pales de l'éolienne.....	25
2.4 Contrôle de la puissance de l'éolienne.....	29
2.4.1 Contrôles au niveau du rotor de l'éolienne.....	29
2.4.2 Contrôle au niveau de la transmission au réseau.....	34
2.4.2.1 Système de connexion des éoliennes.....	37
2.5 Les systèmes de freinage.....	38

2.5.1 Arrêt par frein à disque automatique.....	38
2.5.2 Régulation et freinage par basculement de l'éolienne.....	39
2.5.3 Régulation et freinage par gouvernail articulé.....	40
Conclusion générale.....	42
Bibliographie.....	43

## *Listes des figures*

<b>Figure 1.1</b> : Les étapes de fonctionnement d'une éolienne.....	11
<b>Figure 1.2</b> : Éolienne à axe vertical de type Savonius [1].....	12
<b>Figure 1.3</b> : Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus et à H [2].....	12
<b>Figure 1.4</b> : les éolienne à axe horizontal [4].....	13
<b>Figure 1.5</b> : (a) Les éoliennes OFF-SHORE (b) Les éoliennes ON-SHORE [5].....	14
<b>Figure 1.6</b> : Description d'une éolienne à axe horizontal [6].....	16
<b>Figure 1.8</b> : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [7].....	18
<b>Figure 1.9</b> : Limitation de puissance éolienne.....	19
<b>Figure 2.1</b> : Structure général de contrôle d'une éolienne [7].....	23
<b>Figure 2.2</b> : éléments caractérisons une pale.....	23
<b>Figure 2.3</b> : Direction du vent sur un tronçon de pale.....	24
<b>Figure 2.5</b> : Evolution des coefficients de portance $C_L$ et de traînée $C_D$ .....	26
<b>Figure 2.6</b> : décrochage aérodynamique passif.....	28
<b>Figure 2.7</b> : Courbe de puissance typique en décrochage passif.....	29
<b>Figure 2.8</b> : les éoliennes à pitch control [7].....	30
<b>Figure 2.9</b> : décrochage par contrôle de l'angle de calage $\beta$ .....	31
<b>Figure 2.10</b> : courbe de puissance avec contrôle de l'angle de calage.....	31
<b>Figure 2.14</b> : le contrôle par les volets.....	31
<b>Figure 2.11</b> : structure d'une éolienne à vitesse fixe.....	33
<b>Figure 2.12</b> : Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent.....	34
<b>Figure 2.13</b> : Schéma général en mode autonome pour une éolienne à vitesse fixe.....	35
<b>Figure 2.15</b> : les accédants dû à un sous-freinage [11].....	36
<b>Figure 2.16</b> : frein à disque [12].....	37
<b>Figure 2.17</b> : freinage par basculement de l'éolienne.....	38
<b>Figure 2.18</b> : une éolienne avec le système side-furling.....	38



# *Nomenclature*

## *Acronymes*

CDER : Centre de Développement des Energies Renouvelables

ENP: Ecole Nationale Polytechnique

HAWT : Horizontal Axis Wind Turbine

NREL: National Renewable Energy Laboratory

SWT: Small Wind Turbine

## *Variables latines*

$A$  : Surface [m<sup>2</sup>]

$C_p$  : Coefficient de puissance d'une éolienne [-]

$C_L$  : coefficient de portance [-]

$C_D$  : coefficient de traînée [-]

$D$  : diamètre du rotor d'une éolienne [m]

$\dot{m}$  : Débit massique [kg/s]

$P$  : Puissance d'une éolienne [W]

$R$  : Rayon du rotor [m]

$r$  : est la distance entre l'axe de rotation de la turbine et le tronçon de la pale [m]

$V$  : vitesse du vent libre [m/s]

$V_D$  : La vitesse de démarrage [m/s]

$V_N$  : La vitesse nominale [m/s]

$V_a$  : La vitesse d'arrêt [m/s]

$W$ : module du vent apparent[m/s]

## *Variables grecques*

$\lambda$  : Vitesse spécifique [-]

$\theta$ : l'angle de calage [°]

$\Omega_t$  : Vitesse de rotation [rd/s]

$\rho$ : Masse volumique [kg/m<sup>3</sup>].

$\beta$  : Angle de calage [°]

## ***Introduction générale***

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des éoliennes n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (éolienne à axe vertical ou à axe horizontal).

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et propre. Donc elle peut être présentée comme l'une des solutions aux problèmes d'épuisement des énergies fossiles et à la pollution atmosphérique, il faudrait pour cela pouvoir développer davantage les énergies renouvelables pour pouvoir diminuer la consommation de l'énergie fossile. Aujourd'hui, le développement et la multiplication des éoliennes ont conduit les chercheurs à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion mécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Les structures des éoliennes sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones, et il existe plusieurs systèmes de régulation qui permettent de contrôler la puissance délivrée par les éoliennes dans le but de maximiser ces puissances et aussi pour des mesures de protections on installe des systèmes de freinage qui arrête le rotor de l'éolienne d'une façon douce et sécurisé.

Ces systèmes de régulation de puissance et de freinage sont le moyen le plus simple et le plus efficace pour éviter la destruction d'une éolienne, lorsque le vent atteint une certaine vitesse un dispositif de freinage se déclenche ce qui fait immobiliser l'éolienne, cette immobilisation peut être effectuée par plusieurs techniques, dans notre mémoire on va présenter ces techniques et on va les décrire d'une façon détaillée.

Le but de ce projet est de présenter les différentes techniques utilisées pour contrôler et réguler la puissance délivrée par une éolienne, et aussi présenter les systèmes de freinage qui existent au niveau des petites et grandes éoliennes.

Le chapitre 1 présente d'abord une courte revue sur les éoliennes en générale, en suite il va parler des différents types d'éoliennes en citant leurs avantages et inconvénients, il discute aussi du principe de fonctionnement d'une éolienne, et de ces constituants, et enfin ce chapitre présente les zones de fonctionnement d'une éolienne.

Dans le chapitre 2 présente les différents systèmes de régulation et de contrôle de la puissance délivré par une éolienne au niveau du rotor et au niveau de la génératrice, ce chapitre présente aussi les systèmes de protection des éoliennes, autrement dit les systèmes de freinage qui existe pour les petites et grandes éoliennes.

***Chapitre 1 : Généralité sur les éoliennes, et  
travaux antérieurs***

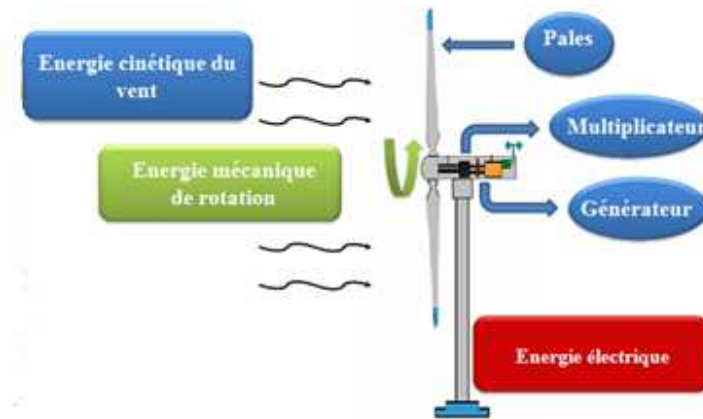
## 1.1 Introduction :

Dans ce chapitre, On va présenter l'énergie éolienne d'une manière générale en décrivant tous les types des éoliennes avec les avantages et inconvénients de chacune, ensuite on perlera des composants qui constitue une éolienne moderne, et en fin on va donner le principe de fonctionnement d'une éolienne. Ce chapitre sera clôturé par une conclusion.

## 1.2 Définition d'une éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure 1.1).

Le Système de Conversion Eolien (SCE) 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.



**Figure 1.1 :** Les étapes de fonctionnement d'une éolienne.

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

### 1.3 Types d'éoliennes :

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

#### 1.3.1 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, la structure avec un rotor Savonius et celle avec un rotor de Darrieux.

A nos jours, ce type d'éolienne est plutôt marginal et son utilisation est beaucoup moins répandue.

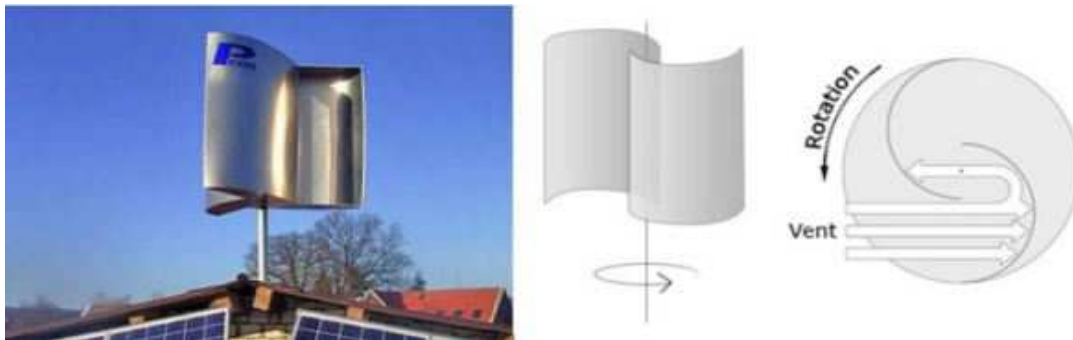


Figure 1.2 : Éolienne à axe vertical de type Savonius [1]

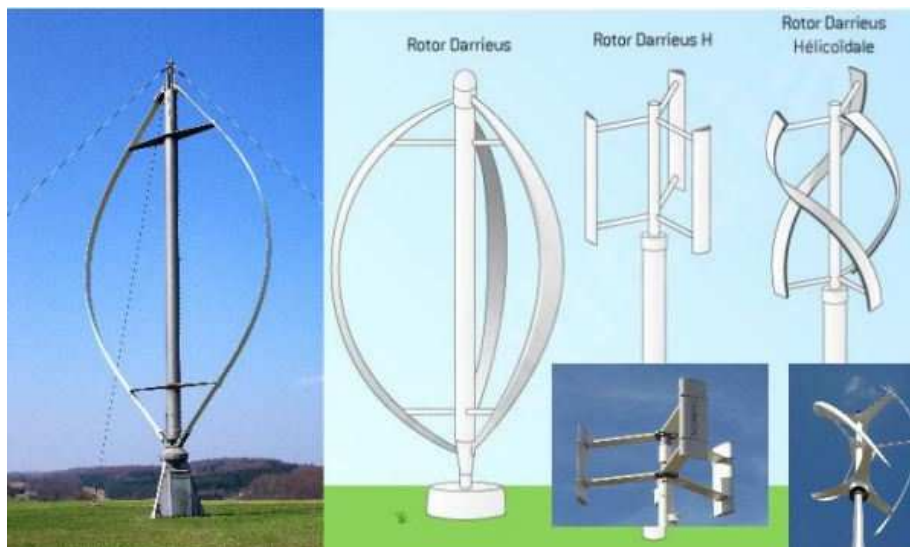


Figure 1.3 : Les éoliennes à axe vertical de type Darrieux et à H [2]

Elles présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit :

**a. 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.

**b. Inconvénient**

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

**1.3.2 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 en amont ou en aval par rapport au vent [3].



**Figure 1.4 :** les éoliennes à axe horizontal [4].

Les éoliennes à axe horizontal présentent des avantages et des inconvénients que nous pouvons citer comme suit :

**a. 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.
- Elle présente un rendement meilleur que les éoliennes à axe vertical.

**b. Inconvénient**

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

Nous avons dans cette famille d'aéromoteurs à axe horizontal deux catégories, « on shore » et « off shore », ces termes permettent de distinguer si l'éolienne est implantée sur terre ou à la surface de la mer. Ces dernières présentent de nombreux avantages : Au niveau des nuisances sonores car elles sont éloignées des habitations. De plus, les vents marins sont plus nombreux, plus forts et surtout plus réguliers. Ce sont des conditions essentielles pour la bonne production d'électricité. En revanche, ces éoliennes sont beaucoup plus difficiles à installer et donc plus coûteuses.



**Figure 1.5 :** (a) Les éoliennes OFF-SHORE (b) Les éoliennes ON-SHORE [5]

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.

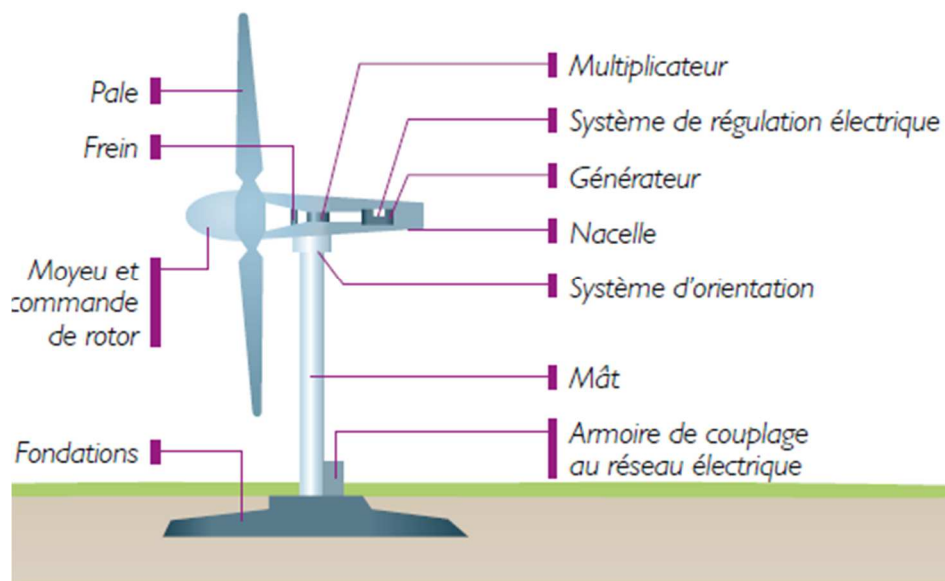


#### **1.4 Constitution d'une éolienne à axe horizontal :**

Une éolienne à axe horizontale est composée de plusieurs éléments qui sont :

- **Le mât** : la pièce la plus imposante de l'éolienne est une gigantesque structure d'acier ou de béton qui supporte l'éolienne, y amène les raccordements nécessaires et permet d'accéder à la nacelle. Elle maintient donc la nacelle en altitude, là où le vent est le plus constant et le plus fort.
- **Les pales** : elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il y a plusieurs points à prendre en considération pour la construction des pales des éoliennes entre autres l'aérodynamique et l'aspect structure.).
- **La nacelle** : elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. À l'amont de la nacelle, nous trouvons le rotor de l'éolienne, c'est-à-dire les pales et le moyeu.
- **Le moyeu** est le point de raccordement entre les pales et l'arbre lent de la machine.
- **Le multiplicateur** relie l'arbre lent à l'arbre rapide en augmentant au passage de plus de 100 fois la vitesse de rotation.
- **La génératrice** est l'endroit où l'énergie mécanique du rotor se transforme en énergie électrique.
- **L'arbre lent** de l'éolienne relie le moyeu du rotor au multiplicateur.
- **Le rotor** d'une éolienne moderne de 1 MW et plus (les pales et le moyeu) tourne assez lentement, environ 16 tours par minute. L'arbre contient un système de freinage hydraulique permettant l'opération des freins en cas de vents violents.
- **L'arbre rapide** tourne à environ 1 800 tours par minute et entraîne la génératrice électrique. Il est muni d'un frein mécanique à disque que l'on peut actionner en cas d'urgence, soit lorsque le frein aérodynamique est défectueux ou en cas de maintenance de l'éolienne.

- **La fondation** : est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.
- **L'armoire de couplage** au réseau électrique transforme la tension afin de rendre l'énergie produite par l'éolienne compatible à celle du réseau. Le convertisseur synchronise l'électricité produite par l'éolienne à celle présente sur le réseau.
- **Le frein** permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien.
- **L'anémomètre** : mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter. Il permet aussi d'évaluer les performances de l'éolienne et de reproduire la courbe de puissance.
- **La girouette** : indique la direction du vent et permet à la nacelle de rester orientée face au vent.



**Figure 1.6** : Description d'une éolienne à axe horizontal [6]

### **1.5 Principe de fonctionnement des éoliennes :**

La production d'électricité par une éolienne est réalisée par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. De nombreuses étapes qui font appel à des technologies diverses sont nécessaires à cette transformation.

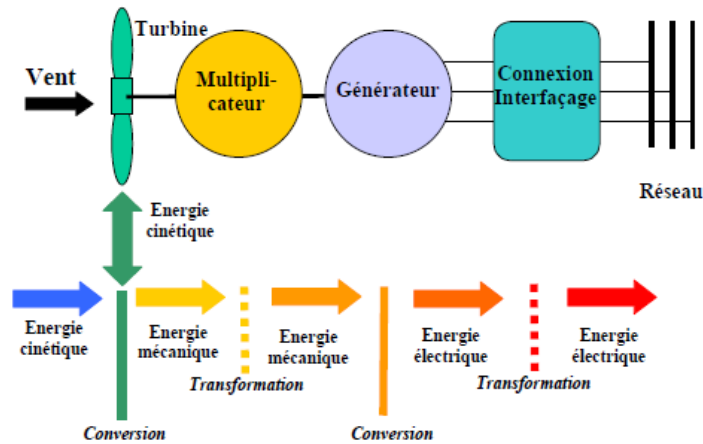


Figure 1.7 : La chaîne de production éolienne [7].

## 1.6 La chaîne de transformation énergétique :

Une éolienne transforme l'énergie du vent en énergie électrique. Cette transformation se fait en plusieurs étapes :

### A- La transformation de l'énergie par les pales :

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

### B- L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur :

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1 000 à 2 000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

### C- La production d'électricité par le générateur :

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.

### D- La régulation de l'électricité par le convertisseur et le transformateur :

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20 000 Volts par un transformateur.

L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches.

#### 1.7 Zones de fonctionnement de l'éolienne :

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

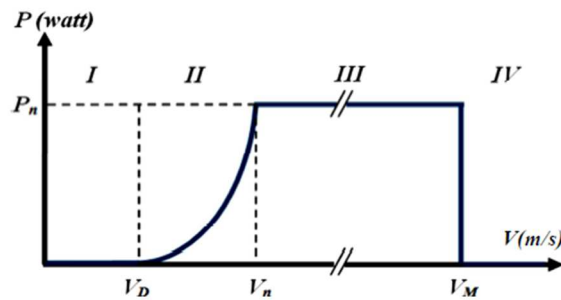


Figure 1.8 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [7].

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

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

$V_M$ : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient d'arrêter l'éolienne pour des raisons de sécurité et protéger l'éolienne contre les vents violents. Pour la grande majorité des éoliennes,  $V_M$  vaut 25m/s.

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

- **Zone II** :  $V_D < V < V_n$ : Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.
- **Zone III** :  $V_n < V < V_M$ : La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale de la turbine  $P_n$ . Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge. En cas de vent fort, les éoliennes modernes contrôlent de manière aérodynamique l'hélice de l'éolienne pour maintenir la puissance nominale entre  $V_n$  et  $V_M$ . C'est ce qu'on appelle le contrôle Actif.

Les pales des hélices sont souvent orientables (pas variable, pitched or feathered blades) ce qui permet de diminuer la puissance et le couple moteur lorsque le vent augmente. Ces éoliennes à contrôle par orientation des pales (pitch-controlled) permettent de contrôler la puissance fournie au réseau. C'est un système de contrôle actif.

Pour les éoliennes de faible puissance (50 à 500 kW) on utilise l'effet Stall pour limiter la vitesse de rotation lorsque le vent est fort (Stall-regulation) mais ce n'est pas très intéressant lorsque l'on injecte dans le réseau électrique car cette régulation est passive, donc indépendante de la demande électrique. On utilise parfois, pour les éoliennes puissantes, un contrôle actif par effet Stall (active Stall control) mais la plupart des éoliennes de forte puissance utilisent le contrôle par pas variable [8].

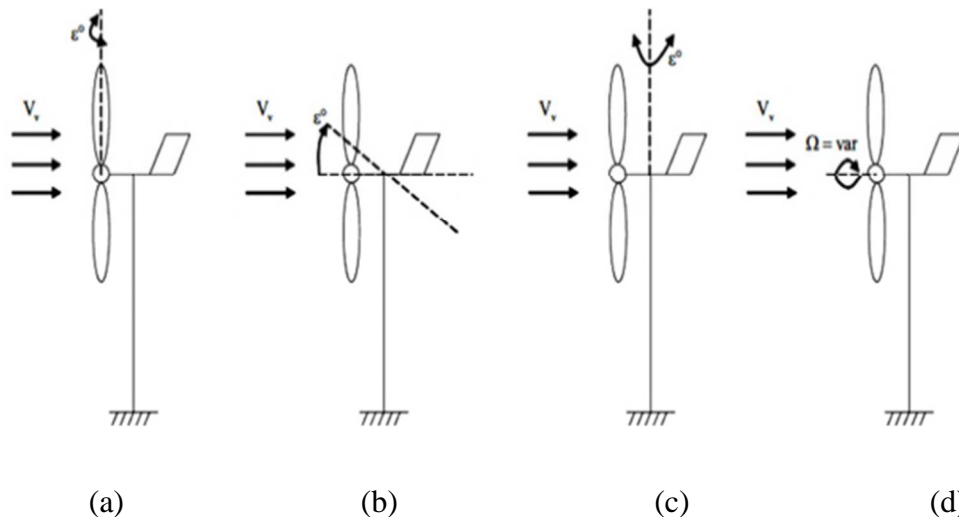


Figure 1.9 : Limitation de puissance éolienne.

- a) Pitch, b) déviation verticale de l'axe de Rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse continuellement Variable [9].

## **1.8 Travaux antérieur :**

### **a) Premier travail :**

Le travail présenté dans cette thèse par monsieur Boubekeur Boukhezzar porte sur la modélisation et la commande des éoliennes à vitesse et calage variables afin d'atteindre les deux objectifs principaux : à vents faibles, maximiser la capture de l'énergie du vent d'une part et à vents forts, réguler la puissance électrique produite d'autre part. Dans les deux cas, il s'agira également de réduire les charges mécaniques transitoires [13].

A l'heure actuelle, les commandes des systèmes éoliens sont réalisées à l'aide de régulateurs classiques PI ou PID. Leurs performances sont satisfaisantes lorsque le vent n'est pas trop turbulent mais cependant celles-ci se dégradent notablement lors des variations rapides de la vitesse du vent. Par conséquent, il est nécessaire de disposer de systèmes de commande plus performants afin de prendre en compte la forte non-linéarité de l'aérodynamique de l'éolienne, son aspect dynamique et la nature turbulente du vent.

Pour cela, Boukhezzar a étudié différentes stratégies de commande, en soulignant leurs avantages et inconvénients par rapport aux performances attendues. Parmi les contrôleurs qu'il a développés, si certains sont une adaptation de techniques bien connues pour les modèles de l'éolienne, en revanche les autres apparaissent pour la première fois dans ce domaine.

A vents faibles, Boukhezzar a élaboré des commandes non linéaires, avec estimateur de la vitesse du vent, qui permet d'obtenir la vitesse du vent fictif qui ne peut pas être mesurée, vu la variabilité spatiotemporelle du profil du vent autour du rotor.

Pour la commande à vents forts, il a montré qu'une commande monovariante en calage ou en couple du générateur ne permet pas d'atteindre le double objectif de réguler à la fois la puissance électrique et la vitesse du rotor. Par conséquent, son idée est de combiner une commande non linéaire par retour d'état dynamique en couple et une commande linéaire en pitch. Cette stratégie s'est avéré être la meilleure.

La validation des performances des contrôleurs a été réalisée avec des simulateurs aéroélastiques d'éoliennes, développés par NREL (National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO) en utilisant des profils de vent de forte turbulence. Les résultats sont satisfaisants

aussi bien en termes d'optimisation de la capture de l'énergie du vent qu'en régulation de puissance.

**b) Deuxième travail :**

La part de l'énergie éolienne dans le réseau est de plus en plus importante, et l'impact sur le réseau électrique et la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente. Le coût de l'énergie éolienne est encore trop élevé pour concurrencer les sources traditionnelles sur des sites moins ventés. Plus " d'intelligence " peut être introduite dans la commande des éoliennes pour résoudre ces problèmes. Cette commande doit être faite en tenant compte du comportement de l'aérogénérateur dans son ensemble. Les perturbations provenant du vent doivent également être considérées.

L'objectif de la thèse de monsieur Haritza Camblong est de concevoir des lois de commande d'un aérogénérateur à vitesse variable et régulation pitch, en tenant compte des perturbations éoliennes et avec quatre critères d'optimisation [14]. Ces critères sont : l'amélioration de la qualité de l'énergie électrique produite, du rendement énergétique et de la robustesse des commandes et la diminution des efforts subis par le train de puissance de l'éolienne. Des modèles de simulation permettant d'étudier les lois de commande d'aérogénérateurs existent, mais l'impact des perturbations éoliennes sur le système dans son ensemble n'est en général pas considéré avec suffisamment de précision. Ici, un modèle de simulation d'un aérogénérateur à vitesse variable et régulation pitch est présenté. Une attention particulière est portée à l'interaction entre le vent et la turbine. Ce modèle de simulation a été validé à l'aide de données réelles d'une éolienne de 180 kW et de données provenant de la littérature.

Un aérogénérateur à vitesse variable et régulation pitch a différentes zones de fonctionnement. En plus de la stratégie de commande générale de l'éolienne, différentes conceptions de commandes dans chacune de ces zones sont examinées.

Des modèles linéaires permettant d'étudier le comportement dynamique du système éolien sont obtenus sur différents points de fonctionnement à partir du modèle de simulation non-linéaire. Certains de ces modèles sont utilisés en tant que modèle de commande. Des régulateurs numériques robustes sont synthétisés dans chacune des zones de fonctionnement. Ces lois de commande sont ensuite testées sur le modèle de simulation. Différentes commandes sont comparées en observant leur comportement face aux quatre critères liés à l'objectif de thèse. Un modèle de simulation est pratique pour tester les lois de commande,

mais il convient d'essayer ces lois aussi sur un banc d'essai avant de les implémenter sur une éolienne réelle. Ici, l'aérogénérateur simulé est émulé sur un banc d'essai de 15 kW. Ensuite, quelques essais expérimentaux sont réalisés sur ce banc. Les résultats obtenus en simulations et sur le banc d'essai montrent que des lois de commande avancées permettent d'améliorer le comportement d'un aérogénérateur à vitesse variable et régulation pitch.

**c) Troisième travail :**

La thèse de monsieur Armand Boyette traite de l'étude, la modélisation et la simulation d'un système de conversion d'énergie éolienne, permettant de fournir au réseau une puissance constante, basé sur une unité de stockage d'énergie et une machine asynchrone à double alimentation (MADA) [15]. Cette éolienne à axe horizontale fournit au réseau une puissance active constante quelles que soient les conditions de vent. L'association de batterie ou autre système de stockage sur le bus continu permet de stocker temporairement de l'énergie. La modélisation de la partie mécanique de l'éolienne est particulièrement détaillée, une hélice à angle de calage variable est utilisée pour maximiser la puissance extraite. Ensuite, la modélisation, le contrôle direct et le contrôle indirect de la MADA sont présentés. Un contrôle indépendant des puissances active et réactive est utilisé et le dimensionnement de l'unité de stockage pour cette utilisation est particulièrement détaillé. La commande de l'ensemble avec la recherche du point de fonctionnement à puissance maximale (MPPT) est expliquée. Des résultats de simulations permettent de valider l'étude pour deux profils de vent longue durée. Ce système de conversion éolien permet d'offrir des services systèmes comme la compensation de facteur de puissance ou la minimisation de courants harmoniques présent sur le réseau. Ainsi, la MADA est utilisée, avec une commande additionnelle, pour réduire les harmoniques de courant du réseau. Ce système facilite l'intégration des éoliennes dans le réseau de distribution car le gestionnaire du réseau peut avoir une puissance constante et des services systèmes utiles.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté quelques généralités sur l'énergie éolienne, nous nous sommes attachés à décrire l'ensemble de la chaîne de conversion d'énergie par l'éolienne, nous avons présenté le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale ainsi que les différents types, et cela va nous aider à atteindre par la suite le but principal de notre travail.



## *Chapitre 2 : les systèmes de contrôle et de freinages des éoliennes*

## **2.1 Introduction :**

Dans ce chapitre on va voir les différents systèmes de régulation et de protection des éoliennes, ces derniers sont des éléments essentiels de la survie d'une éolienne, afin d'éviter la destruction de l'aéromoteur lorsque le vent est trop violent. Il est nécessaire d'équiper l'éolienne d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine en cas de survitesse du rotor. Ces systèmes peuvent être plus ou moins fins, et plus ou moins automatiques.

## **2.2 Contrôles de la conversion d'énergie :**

Les conditions de fonctionnement d'une éolienne dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. On ne peut agir qu'en limitant, parfois de manière optimale dans certaines conditions de fonctionnement 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. Il est donc nécessaire de contrôler certaines grandeurs. Le contrôle de la puissance fournie par le système peut se faire à chacun des deux niveaux de conversion de l'énergie et de différentes manières suivant les conditions de fonctionnement :

- Au niveau de la turbine, essentiellement pour limiter la puissance pour les vents forts. Plusieurs méthodes sont utilisées.
- Au niveau du générateur, en particulier pour les structures à vitesse variable. Ce contrôle permet par exemple d'optimiser le captage de l'énergie pour les vents faibles et moyens. Plusieurs solutions existent. Elles nécessitent à la fois le contrôle des grandeurs affectant directement le fonctionnement du générateur (courants, vitesse) ou les contraintes de fonctionnement du système.

Le système de commande d'un système générateur éolien peut par ailleurs être séparé en deux niveaux fonctionnels essentiels (Figure 2.1) :

- Système de contrôle des grandeurs physiques et les surveillances et protections associées. Il s'agit d'assurer régulation et asservissement des grandeurs à des valeurs de consignes délivrées par le niveau de commande supérieur.
- Système de gestion des modes de fonctionnement, d'élaboration des lois de consigne et de gestion des protections.

Il faut ajouter, dans un cas plus général, un troisième niveau correspondant à la gestion de l'ensemble au sein d'un parc, en fonction par exemple de la demande provenant des contraintes d'exploitation du réseau.

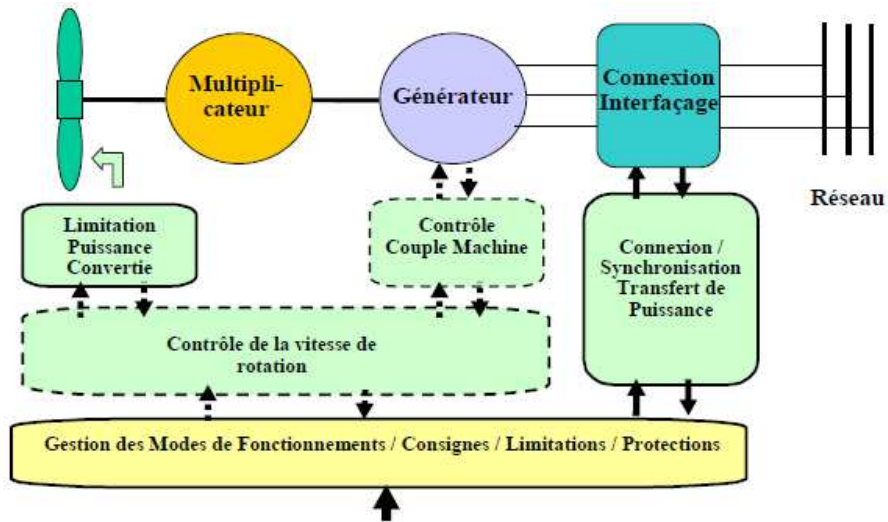


Figure 2.1: Structure général de contrôle d'une éolienne [7].

### 2.3 L'action du vent sur les pales de l'éolienne :

L'action de l'air en mouvement se traduit par des forces appliquées en chaque point de la surface des pales. Les pales ont un profil aérodynamique spécifique tel que présenté sur le schéma de la figure 2.2 :

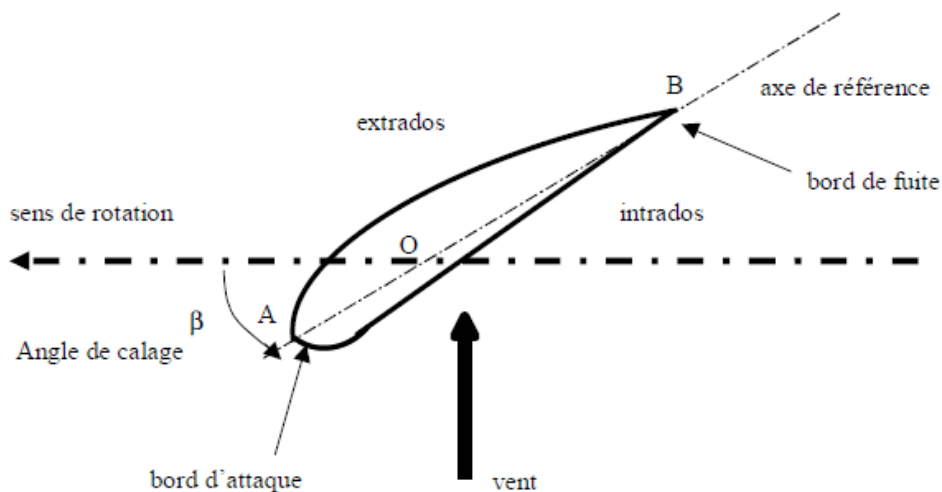


Figure 2.2 : éléments caractéristiques d'une pale.

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- extrados : dessus de la pale
- intrados : dessous de la pale
- corde : longueur  $l$  du profil du bord d'attaque au bord de fuite
- angle de calage  $\beta$  (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation)

Les profils sont généralement de type plan) convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis.

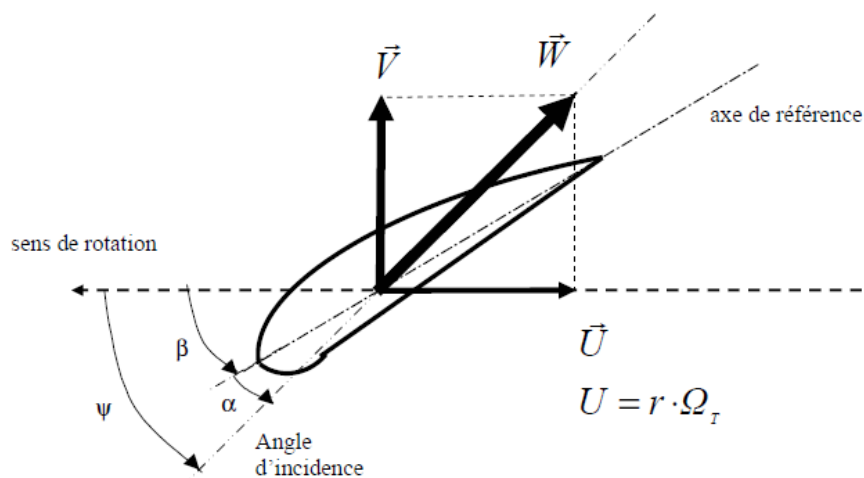


Figure 2.3 : Direction du vent sur un tronçon de pale.

Du fait de la rotation de la pale, l'élément de pale de largeur  $dr$  situé à une distance  $r$  du moyeu est soumis à la fois au vent incident de vitesse  $V$  et à un vent relatif de vitesse  $U$  dirigée dans le sens contraire de la rotation de vitesse  $\Omega_t$ .

$$U = r \cdot \Omega_t \quad (2.1)$$

Où :  $r$  : est la distance entre l'axe de rotation de la turbine et l'élément de la pale  $m$ .

$\Omega_T$  : est la vitesse de rotation de la turbine en rd/s.

La vitesse résultante  $W$  du vent « apparent » s'écrit donc :

$$W = U + V \quad (2.2)$$

La vitesse résultante du vent « apparent »  $W$  fait un angle  $\Psi$  avec le plan de rotation. Cet angle s'écrit :

$$\Psi = \arctg\left(\frac{U}{V}\right) \quad (2.3)$$

On introduit alors l'angle d'incidence note  $\alpha$  entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent apparent :

$$\alpha = \Psi - \beta \quad (2.4)$$

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de pale de largeur  $dr$  et de longueur de corde  $l$  à une distance  $r$  de l'axe de rotation une force résultante  $dF$  :

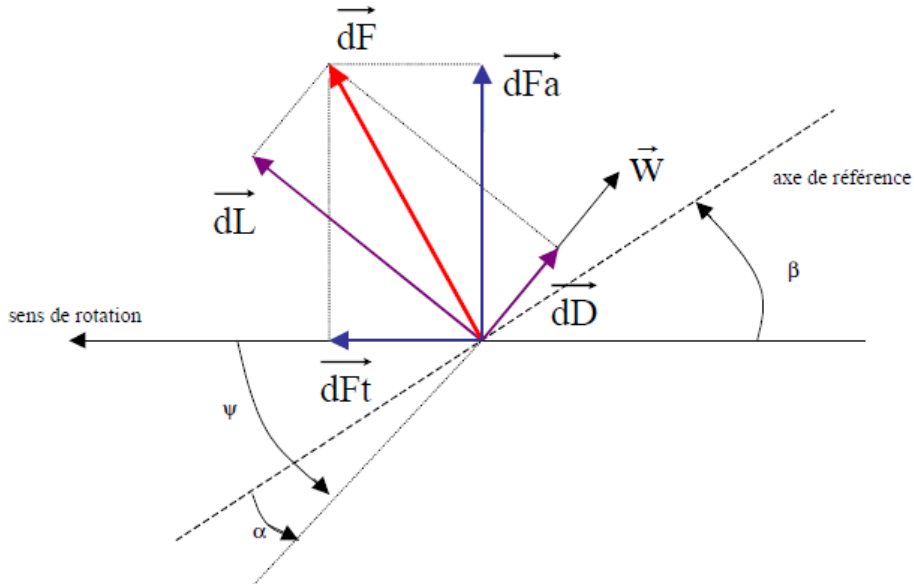


Figure 2.4 : Forces appliqués sur un élément de pale.

On peut décomposer la force résultante  $dF$  de la manière suivante :

- la portance  $dL$ , normale à la direction du vent apparent.
- la force de traînée  $dD$ , parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

- la poussée axiale  $dF_a$ , perpendiculaire au plan de rotation.
- la poussée tangentielle  $dF_t$ , dans la direction de rotation.

On déduit aisément les expressions de la poussée axiale et tangentielle en fonction de la portance et de la traînée à partir du schéma précédent :

$$dF_t = dL \cdot \sin(\Psi) - dD \cdot \cos(\Psi) \quad (2.5)$$

$$dF_a = dL \cdot \cos(\Psi) + dD \cdot \sin(\Psi) \quad (2.6)$$

C'est le couple résultant de l'ensemble des forces tangentielles qui va provoquer la rotation de la turbine. Les modules des forces  $dL$  et  $dD$  s'expriment en fonction de deux coefficients, le coefficient de portance  $C_L$  et le coefficient de traînée  $C_D$  :

$$dL = \frac{1}{2} \rho \cdot W^2 \cdot dA \cdot C_L \quad (2.7)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho \cdot W^2 \cdot dA \cdot C_D \quad (2.8)$$

Avec :

$dA = l(r) \cdot dr$  : surface de l'élément de pale

$l(r)$  : longueur de la corde à la distance  $r$  de l'axe de rotation

$C_L$  : coefficient de portance (sans dimension)

$C_D$  : coefficient de traînée (sans dimension)

$W$ : vitesse du vent apparent [m/s]

Ces coefficients  $C_L$  et  $C_D$  dépendent fortement de l'angle d'incidence  $\alpha$  figure. Pour des angles  $\alpha$  faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance. C'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler. Ici, elle « aspire » la pale vers l'avant. Si  $\alpha$  augmente, la portance augmente jusqu'à un certain point puis l'écoulement devient turbulent. Du coup, la portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique.

Cependant, les concepteurs de pales ne se préoccupent pas uniquement de la portance et du décrochage. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance de l'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique, la traînée. La traînée augmente en général si la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente. Ce phénomène apparaîtra ici pour des angles  $\alpha$  importants.

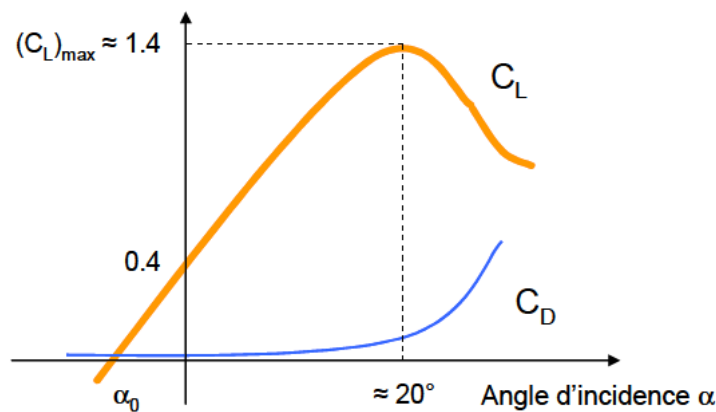


Figure 2.5 : Evolution des coefficients de portance  $C_L$  et de traînée  $C_D$

Par ailleurs, on connaît la puissance disponible par dérivation de l'énergie cinétique de la Masse d'air traversant la surface  $A$  balayée par la turbine :

$$P_{disp} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot v^3 \quad (2.9)$$

Dans cette expression,  $v$  représente la vitesse du vent supposée uniforme et horizontale sur toute la surface  $A$ . On peut en déduire le coefficient de puissance par :

$$C_P = \frac{P_{disp}}{P_T} \quad (2.10)$$

Ce coefficient  $C_P$  est donc bien spécifique à la turbine considérée, il dépend des variables  $v$  et  $\Omega_t$  et du paramètre  $\beta$ . Plus généralement, on regroupe les deux variables pour définir une nouvelle variable  $\lambda$  appelée rapport de vitesse ou « tip speed ratio » (TSR) en anglais.

$$\lambda = \frac{R_T \cdot \Omega_t}{v} \quad (2.11)$$

La puissance captée par la turbine pourra donc s'écrire comme suit :

$$P_T = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot C_P(\beta, \lambda) \cdot v^3 \quad (2.12)$$

## **2.4 Contrôle de la puissance de l'éolienne :**

### **2.4.1 Contrôles au niveau du rotor de l'éolienne :**

Comme le montrent les expressions des forces précédemment données, celles-ci augmentent rapidement avec le vent apparent et la puissance correspondante peut devenir rapidement supérieure à la puissance nominale de la machine. Il faut donc à un moment donné pouvoir limiter le couple. Le réglage du couple, donc de la puissance captée par la turbine, se fait essentiellement par action sur la portance qui dépend principalement de l'angle d'incidence  $\alpha$ . Le réglage de la puissance va donc se faire par action sur  $\alpha$ .

Il existe trois méthodes de contrôle, elles servent principalement à limiter la puissance captée pour les vents forts mais certaines peuvent également intervenir pour faciliter la mise en rotation de la turbine [7].

#### **Contrôle par décrochage aérodynamique passif (« passive stall ») :**

Sur une éolienne à régulation par décrochage aérodynamique passif, les pales sont fixées au moyeu de façon rigide donc l'angle de calage  $\beta$  est fixe. L'angle  $\alpha$  augmente naturellement avec la vitesse du vent incident  $V$  si la vitesse de rotation est pratiquement constante. Cette augmentation provoque une augmentation de la traînée (coefficient  $C_D$ ) et un décrochage progressif de la pale (Figure 2.6). Le couple est maintenu à peu près constant ( $\alpha_1 < \alpha < \alpha_2$ ) jusqu'au décrochage total  $\alpha_3 < \alpha$  (chute brutale de  $C_L$  et croissance importante de  $C_D$ ) où il chute rapidement. La puissance est donc bien limitée.

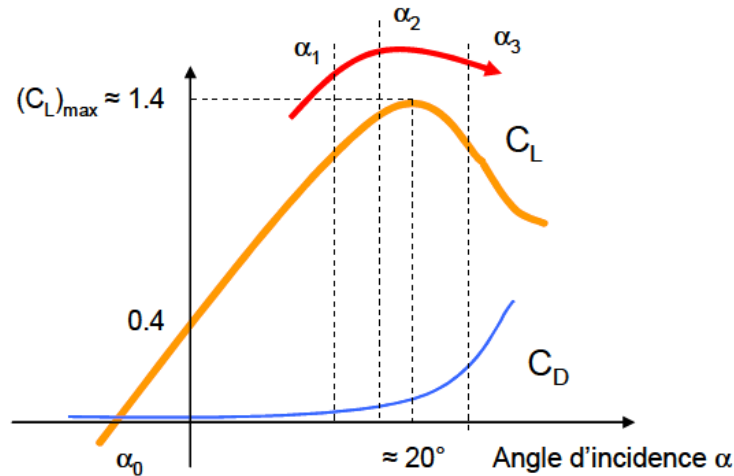


Figure 2.6 : décrochage aérodynamique passif.

**Avantages :**

Ce concept simple et normalement robuste ne fait intervenir aucun système mécanique ou électrique auxiliaire.

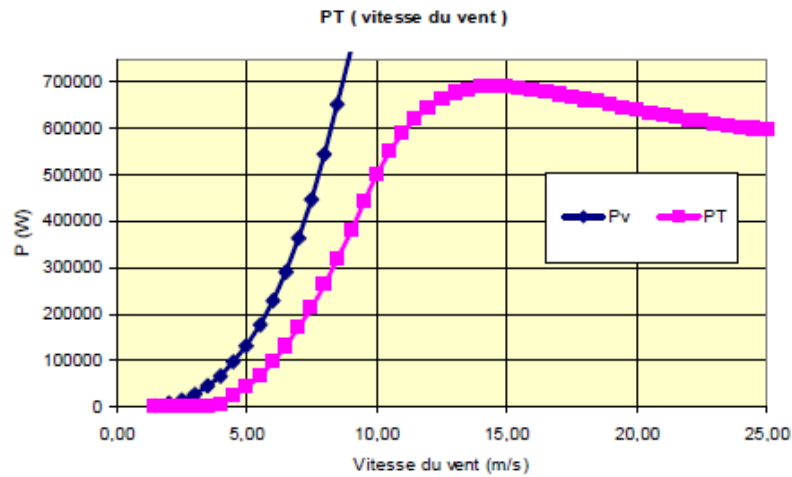
**Inconvénients :**

La puissance captée par la turbine est seulement fonction de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. Il n'y a donc aucune possibilité d'adaptation. En cas de défaut sur le réseau, si l'énergie captée ne peut lui être transmis, il est nécessaire d'actionner les freins pour absorber l'énergie cinétique de la turbine ainsi que l'énergie captée pendant le freinage, même en cas de problème sur la transmission, ce qui suppose un système de freinage sur l'arbre de la turbine lui-même (couple de freinage très élevé).

Généralement, les constructeurs prévoient de pouvoir utiliser les extrémités des pales comme aérofreins en les faisant pivoter de  $90^\circ$  en cas d'urgence. Dans ce cas, le système de freinage mécanique

peut être monté derrière le multiplicateur de vitesse ou le couple est plus faible, et il n'est utilisé que comme frein de « parking ». Un freinage d'urgence peut également être assuré par le générateur à condition de prévoir un circuit électrique résistif de récupération d'énergie connecté (freinage rhéostatique). Par ailleurs, en fonctionnement normal, le générateur doit être capable de freiner la turbine et d'imposer le décrochage alors que la vitesse du vent croît, ce qui peut nécessiter un dimensionnement supérieur à celui correspondant aux conditions nominales.





**Figure 2.7 :** Courbe de puissance typique en décrochage passif.

Avec  $PT$  : puissance de l'éolienne en Watt

$Pv$  : puissance du vent en Watt

### Contrôle par décrochage aérodynamique actif (« Active Stall ») :

Du point de vue technique, ayant des pales mobiles, ces machines ressemblent à celles contrôlées à calage variable. Afin d'avoir un couple relativement élevé à des vitesses de vent faibles, ces éoliennes sont normalement programmées pour pivoter leurs pales de la même façon que les éoliennes à pas variable.

Cependant, lorsque l'éolienne atteint sa puissance nominale, elle augmentera l'angle d'attaque des pales du rotor pour faire décrocher les pales encore plus, perdant ainsi l'excès d'énergie du vent. Car l'angle d'attaque  $\alpha$  peut être augmenté (ou diminué) légèrement par diminution (ou augmentation) de l'angle de calage  $\beta$  de quelques degrés (3 à 5° généralement). Le décrochage peut être légèrement avancé (ou retardé). Le couple est maintenu pratiquement constant jusqu'au décrochage total ou il chute rapidement. La puissance peut donc être limitée à sa valeur nominale.

### Avantages :

Il y a possibilité d'adaptation de la turbine aux conditions d'exploitation. Les actionneurs, électriques ou hydrauliques nécessaires, sont de taille réduite, les mouvements de rotation des pales restant de faible amplitude. La possibilité de provoquer un décrochage volontairement facilite les conditions de freinage. Le frein mécanique peut être monté derrière le multiplicateur de vitesse où le couple est plus faible, et il n'est utilisé que comme frein de « parking ».

**Inconvénients :**

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

**Contrôle par angle de calage variable (« Pitch Control ») :**

L'angle  $\alpha$  peut être augmenter (ou diminuer) fortement par diminution (ou augmentation) de l'angle de calage  $\beta$  de quelques dizaines de degrés (20 à 30° généralement). Les forces aérodynamiques s'exerçant sur les pales sont donc ainsi réduites (à la fois pour la portance et pour la traînée) (Figure 2.8). Le couple est maintenu pratiquement constant et peut être annulé par « mise en drapeau » des pales ( $\beta = 90^\circ$ ). La puissance est donc limitée.



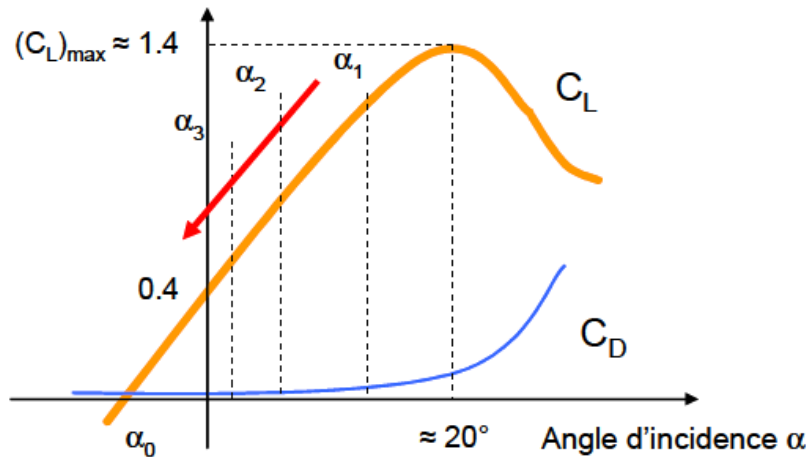
**Figure 2.8 :** les éoliennes à pitch control [7].

**Avantages :**

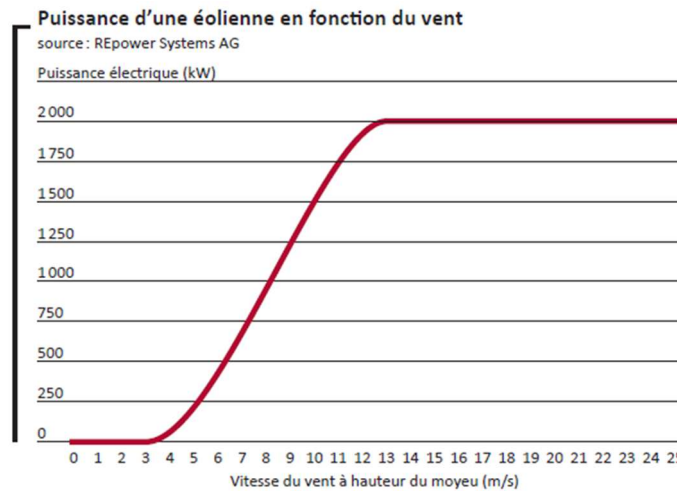
La diminution de l'angle d'incidence a jusqu'à une valeur nulle ou négative limite toutes les forces aérodynamiques sur les pales, ce qui réduit considérablement les efforts à vitesse de vent élevée. Comme la force de poussée axiale est également diminuée, les efforts sur la tour sont réduits. Cet avantage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

**Inconvénients :**

Les actionneurs nécessaires sont de puissance supérieure à celle du cas précédent. L'énergie nécessaire aux actionneurs doit être transmise au moyeu de la turbine. Si les actionneurs sont électriques, cela nécessite également des contacts glissants bagues/charbons sujets à l'usure et nécessitant un entretien.



**Figure 2.9 :** décrochage par contrôle de l'angle de calage  $\beta$

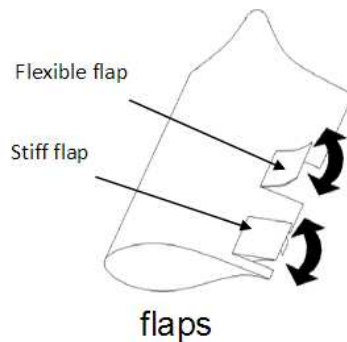


**Figure 2.10 :** courbe de puissance avec contrôle de l'angle de calage.

La figure 2.10 montre bien que l'éolienne avec système de contrôle actif (angle de calage variable) a une courbe qui est maintenue horizontale au-delà de la vitesse nominale car l'angle de calage varie pour pouvoir maintenir la puissance proche à la puissance nominale et cela se manifeste par la rotation de la pale autour d'elle-même commandée par un moteur pas-à-pas.

**Le contrôle par les volets :**

Les volets (aérofrein ou flaps) s'ouvrent automatiquement, si la vitesse du vent devient excessive ou si un problème est décelé, et ralentissent les pales ou diminuent leur portance en provoquant un décrochage aérodynamique.



**Figure 2.14 :** le contrôle par les volets.

**Le contrôle par les spoilers :**

Les spoilers sont encastrés dans le bord d'attaque des pales (freinage aérodynamique). Chaque spoiler est maintenu dans son logement par un ressort de rappel et une masse tarés individuellement en fonction de la position du spoiler sur le bord d'attaque de la pale. À partir d'une certaine vitesse linéaire, la force centrifuge provoque l'éjection de tous les spoilers au même moment modifiant ainsi le profil aérodynamique de la pale.

**2.4.2 Contrôle au niveau de la transmission au réseau :**

**Les éoliennes à vitesse fixe et à vitesse variable :**

Pour optimiser la puissance débitée en fonction du vent, il est souhaitable de pouvoir régler la vitesse de rotation de l'éolienne. L'idée est de réaliser un générateur à fréquence fixe et vitesse variable.

**Objectif de la vitesse variable et fixe :**

En vitesse fixe : le maximum théorique n'est pas atteint.

En vitesse variable : La puissance maximale est exploitée pour toutes les vitesses du vent (régulation de  $\lambda$  optimal pour avoir  $C_p$  maximum).

### Eoliennes à vitesse fixe :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Dans cette technologie, la génératrice est directement couplée au réseau. Sa vitesse mécanique est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. La technologie inhérente aux éoliennes à vitesse fixe est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui fait preuve d'une simplicité d'implantation, une fiabilité et un faible coût. Cela permet une installation rapide de centaines de kW de génération éolienne. Cependant, avec la mise en place très progressive de projets d'éoliennes dont la puissance est supérieure au MW, ce sont les éoliennes à vitesse variable qui se développeront à l'avenir pour cette gamme de puissance. La configuration à vitesse fixe peut être représentée d'une manière simplifiée par le schéma de la figure. La chaîne de conversion de l'énergie est composée d'une turbine, le multiplicateur de vitesse et la génératrice [18].

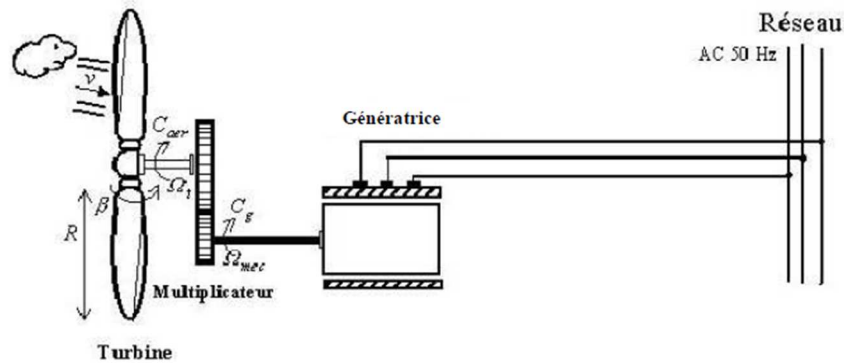


Figure 2.11 : structure d'une éolienne à vitesse fixe.

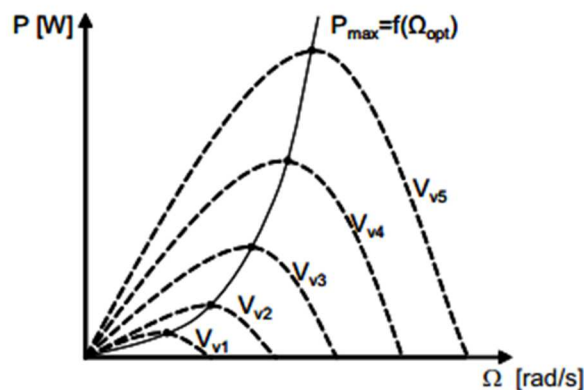
Pour les machines synchrones classiques et asynchrones à cage, la vitesse de rotation est directement dépendante de la fréquence des courants des bobinages statoriques. La Machine Asynchrone à cage a un nombre de paires de pôles fixe et fonctionne donc sur une plage de vitesse très limitée. La Machine Synchrone fonctionne en vitesse fixe impérativement.

### Les éoliennes à vitesse variable :

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable, la première est basée sur une machine asynchrone à cage, piloté au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La deuxième est basée sur la machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné. La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique [10].

Le générateur à vitesse variable permet de fonctionner pour une large gamme de vents donc de récupérer un maximum de puissance tout en réduisant les nuisances sonores lors d'un fonctionnement à faible vitesse de vent. En vitesse variable, on régule le système de façon à ce que pour chaque vitesse de vent, l'éolienne fonctionne à puissance maximale. C'est ce qu'on appelle le Maximum Power Point Tracking. La puissance maximale est atteinte pour une vitesse de rotation de la turbine donnée par la caractéristique de l'éolienne «  $P=f(\Omega)$  »

En ce qui concerne la puissance éolienne, elle résulte de la vitesse de rotation de l'arbre mécanique de l'éolienne et de la vitesse du vent et de la caractéristique  $C_p$ . Elle peut être optimisée dans le but de maximiser l'énergie captée par l'éolienne. La Figure 2.12 donne l'image de la famille des courbes de la puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent ainsi que la courbe optimale qui relie leurs sommets selon une fonction cubique de la vitesse de rotation. En suivant cette courbe continuellement, la puissance éolienne recueillie sera toujours maximale. De nombreuses études ont montré l'intérêt de la vitesse variable en éolien sur le plan énergétique, y compris dans le petit éolien [33] où le surcoût entraîné par la vitesse variable (du fait de l'électronique de puissance et de réglage supplémentaire) est compensé par le surplus de production. Mais c'est aussi et surtout sur le plan de la durée de vie des systèmes que se situe l'avantage de la vitesse variable. En effet, les chaînes à vitesse variable sont moins « raides » que les chaînes à vitesse fixe ou presque fixe rigidement couplées au réseau : cette liaison rigide se solde par de fortes oscillations de puissance engendrées par les turbulences. Ces variations sont à la longue nuisibles pour les éléments mécaniques : la vitesse variable permet de mieux lisser la production à travers l'énorme moment d'inertie que constitue la voilure.



**Figure 2.12 :** Puissance éolienne en fonction de la vitesse de rotation pour différentes vitesses du vent.

### 2.4.2.1 Système de connexion des éoliennes:

#### a) Système isolé ou autonome

Les éoliennes non raccordées au réseau, fonctionnent en mode autonome et alimentent des charges isolées avec éventuellement un ou plusieurs groupes électrogènes en appui. Pour cette configuration, le recours à un système de stockage présente un intérêt significatif en cas d'absence de groupes électrogènes, notamment en cas de vent faible. Le recours à des batteries est utile pour le stockage d'énergie à long terme. D'autres systèmes de stockage sont envisagés comme le stockage inertiel à court terme. Le stockage inertiel évite alors l'utilisation de batteries qui présentent un caractère polluant pour l'environnement. L'énergie se présente sous forme d'énergie cinétique, stockée dans un volant d'inertie. La génératrice utilisée peut être une machine synchrone à aimants permanents ou une machine asynchrone à cage munie de capacités indispensables pour son excitation.

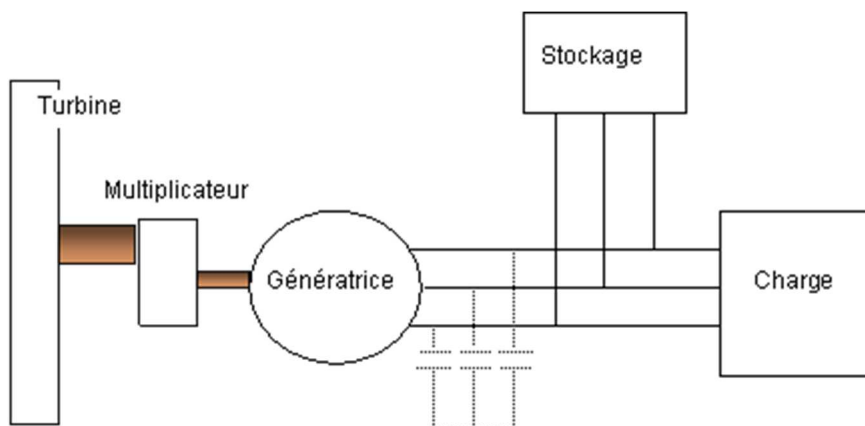


Figure 2.13 : Schéma général en mode autonome pour une éolienne à vitesse fixe.

#### a) Système raccordée au réseau :

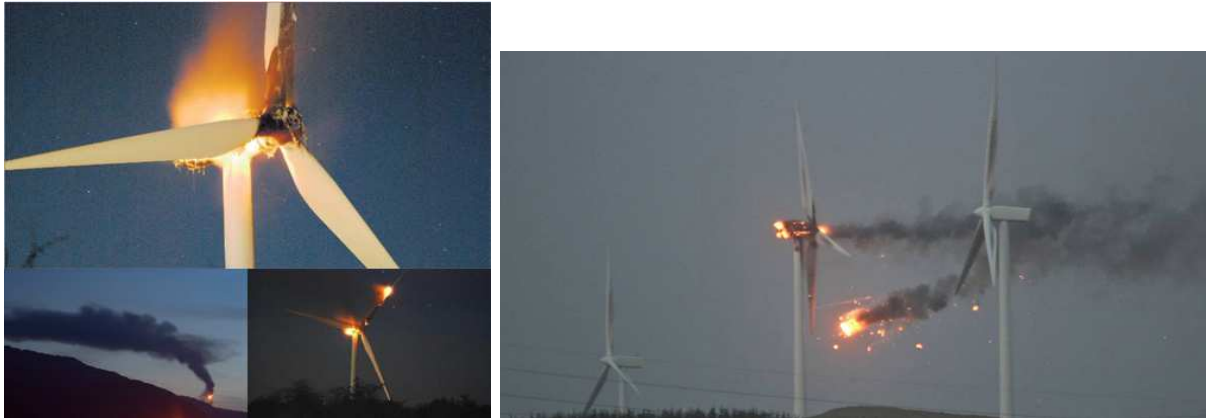
Lorsque l'éolienne est connectée au réseau, la vitesse de rotation de la machine asynchrone doit rester pratiquement constante de façon à ce que la machine reste proche de la vitesse de synchronisme, principal critère pour un fonctionnement stable de la génératrice. La fréquence du réseau impose la vitesse de rotation de la machine. Le générateur à vitesse fixe, en liaison directe avec le réseau, est nécessairement muni d'un multiplicateur de vitesses. L'éolienne tourne à une vitesse de rotation donnée pour une plage restreinte de vitesses de vent, ses applications sont donc limitées.

Il existe d'autres modes de contrôles de puissance, parmi ces modes on trouve principalement :

## **2.5 Les systèmes de freinage :**

La plupart des accidents survenus sur un aérogénérateur sont la cause d'un sous-freinage de ces machines. On cherche donc à installer sur une éolienne au moins deux systèmes de freinage afin de protéger le générateur électrique contre la surproduction et la surchauffe et d'éviter une casse mécanique importante de l'éolienne elle-même.

On appelle vitesse de régulation la vitesse du vent à laquelle le mécanisme de régulation est pleinement activé.



**Figure 2.15 :** les accidents dû à un sous-freinage [11].

C'est le moyen le plus simple pour éviter la destruction d'une machine, lorsque le vent atteint une certaine vitesse un opérateur immobilise l'éolienne, cette immobilisation peut être effectuée de plusieurs manières :

- A l'aide d'un frein.
- En changeant l'orientation de l'hélice : l'hélice est placée parallèlement au vent (mise en drapeau).
- En modifiant le calage des pales afin d'obtenir un couple moteur nul.

### **2.5.1 Arrêt par frein à disque automatique :**

Un détecteur de vitesse déclenche, à un certain seuil prédéterminé, un mécanisme automatique d'arrêt complet de l'éolienne. Il ne s'agit plus d'un système de ralentissement, mais bien d'un stoppage complet. Lorsque le vent baisse d'intensité, le frein est relâché et



l'éolienne est de nouveau libérée. Ces arrêts peuvent aussi être déclenchés lorsque l'automate détecte un problème de réseau.

Les éoliennes à pas fixe et régulation Stall comportent souvent, par sécurité, deux freins à disques. Un tel système permet de freiner l'éolienne en douceur sans trop de contraintes et fatigue de la tour et des éléments mécaniques.

Le système d'arrêt par frein à disque automatique est le même que pour le freinage d'une voiture.



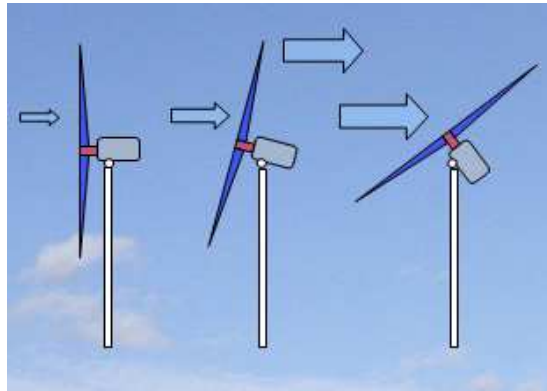
**Figure 2.16** : frein à disque [12].

### **2.5.2 Régulation et freinage par basculement de l'éolienne :**

Le basculement de l'éolienne entraîne une réduction de la surface effective balayée par le rotor. Pour réduire cette surface il faut augmenter l'angle formé par l'axe de rotation du rotor et la direction du vent dominant soit en faisant basculer l'hélice vers le haut soit en le faisant pivoter sur le côté. Lorsque le rotor est "effacé" vers le haut ou sur le côté, le rendement du rotor diminue considérablement et la puissance produite chute rapidement.

Ce dispositif est installé essentiellement sur les petites éoliennes, l'intervention de l'opérateur peut être remplacée et automatisée par action du vent sur une "palette" de commande parallèle et solidaire du plan de rotation de l'hélice. Lorsque la pression du vent sur la palette atteint un certain seuil, celle-ci entraîne la commande d'un frein ou de la mise en drapeau. Cette palette peut être associée à un ressort permettant de replacer l'hélice dans sa position normale lorsque la pression du vent sur la palette diminue. Le passage d'une position à l'autre peut être progressif et l'angle formé par le plan de l'hélice et le vent dépendra de la pression sur la palette (entre  $0^\circ$  : vitesse nominale et  $90^\circ$  : arrêt de la machine). La modification de cet angle modifie les efforts de l'air sur les pales.

Ce système peut être utilisé uniquement sur des aéromoteurs dont la vitesse de rotation n'a pas à être constante et présente l'inconvénient d'interrompre le fonctionnement de l'aérogénérateur au-delà d'une vitesse de vent limite par exemple sur la majorité des éoliennes de pompage pour lesquelles le rendement et la vitesse de rotation ne sont pas importants.



**Figure 2.17 :** freinage par basculement de l'éolienne.

### **2.5.3 Régulation et freinage par gouvernail articulé :**

À partir d'un certain niveau de vent, jugé excessif pour la sécurité mécanique de l'éolienne, le gouvernail se replie progressivement et automatiquement à travers de l'axe du vent. Non seulement il freine l'écoulement, ralentissant la vitesse, mais il détourne l'éolienne de la perpendiculaire au vent. Celle-ci devient alors de moins en moins efficace et sa vitesse ne peut augmenter même si le vent force. On parle généralement d'effacement latéral ou de "side-furling" dans ce cas précis, ceci est très utilisé pour les petites éoliennes car c'est un système très simple à mettre en œuvre.



**Figure 2.18:** une éolienne avec le système side-furling.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes techniques utilisées pour contrôler et réguler la puissance délivrée par une éolienne, et on a aussi présenté les systèmes de freinage qui sont les systèmes de protection des éoliennes, et en fin on a présenté quelques travaux sur les systèmes qu'on a défini au préalable.

## *Conclusion générale*

L'objectif principal de ce projet consiste à présenter les différentes techniques utilisées pour le contrôle et la régulation de la puissance délivrée au niveau du rotor et de la génératrice de l'éolienne, et présenter aussi les différents systèmes de protection et de freinage utilisés dans les éoliennes.

Pour cela, on a commencé tout d'abord par donner quelques généralités sur les éoliennes, on a aussi donné le principe de fonctionnement d'une éolienne d'une manière générale, par la suite on s'est attachés à décrire l'ensemble de la chaîne de conversion d'énergie par l'éolienne, on est passé ensuite à décrire les différents types d'éoliennes, car cela va nous permettre de mieux comprendre l'univers des éoliennes.

Par la suite, on a présenté les deux niveaux de conversion de l'énergie lors de contrôle de la puissance fournie par éolienne de différentes manières suivant les conditions de fonctionnement, le premier niveau c'est le rotor, et le second niveau c'est la génératrice qui se trouve dans la nacelle. On a parlé de l'action du vent sur les pales de l'éolienne, on a aussi défini la portance, la trainée, et aussi le décrochage aérodynamique, ce qui va nous permettre de mieux comprendre les techniques de régulation et de contrôle de l'énergie éolienne au niveau du rotor. On est arrivé ensuite à la présentation des différents systèmes de contrôle au niveau de la génératrice.

On a terminé notre projet par la présentation des systèmes de protection et de freinage des éoliennes, ces systèmes sont super important vu que la majorité des accidents survenus sur un aérogénérateur sont la cause d'un sous-freinage de ces machines. Donc les concepteurs cherchent à installer sur une éolienne au moins deux systèmes de freinage afin de protéger le générateur électrique contre la surproduction et la surchauffe et d'éviter une casse mécanique importante de l'éolienne elle-même.

# *Bibliographie*

- [1] <http://www.ecosources.info/> Consulté le 25 Mars 2016.
- [2] [eolupjv.wordpress.com](http://eolupjv.wordpress.com). Consulté le 26 Mars 2016.
- [3] R. A. MANWELL, Wind Energy Explained : Theory, Design and Application, Chichester (Angleterre): John Wiley & Sons, 2002.
- [4] H. Link, J. v. Dam et C. P.Butterfield, «Wind turbine generator system safety and function test report,» NREL, Colorado (Etats Unis), 2003.
- [5] Robert Gasch, Jochen Twele, Wind Power Plants: Fundamentals, Design, Construction and Operation publié Springer Science & Business Media, 12 oct. 2011.
- [6] <http://tpe-noeux-energies-renouvelables.e-monsite.com/pages/les-principales-energies-renouvelables.html>. Consulté le 23/04/2016.
- [7] Nicolas Laverdure. Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires. Energie électrique. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2005. Français.
- [8] L.Freris et D.Infield, Dunod. Les énergies renouvelables pour la production d'électricité, 2009.
- [9] <http://cleantechnica.com/2014/11/05/global-wind-energy-market-rebounding-setun-spectacular-growth/> Consulté le 19 Mars 2016.
- [10] R.Teadorescu, F.Blaabjerg, « Flexible Control of small wind turbine with Grid Failure Detection Operation in Stand-Alone and Grid-Connected Mode”, IEEE vol.19. 2004.
- [11] <http://www.techniques-ingenieur.fr/actualite/articles/revue-du-web-16-les-videos-de-la-semaine-10638/> Consulté le 26 juin 2016.
- [12] <http://doctecho.free.fr/techno/4eme/moulinot/www.talentfactory.dk/fr/kids/choose/nacelle/brake.htm>. Consulté le 26 juin 2016.
- [13] Boubekeur Boukhezzar. Sur les stratégies de commande pour l'optimisation et la régulation de puissance des éoliennes à vitesse variable. Automatique / Robotique. Université Paris Sud - Paris XI, 2006.

[14] Haritza Camblong. Minimisation of the wind perturbations impact on the generation of electricity by variable speed wind turbines. Engineering Sciences [physics]. Arts et Métiers Paris Tech, 2003.

[15] Armand Boyette. Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne. Énergie électrique. Université Henri Poincaré - Nancy I, 2006.