



**République Algérienne Démocratique et  
Populaire**



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

**UNIVERSITE D'EL-OUED**

**FACULTE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIE**

**Mémoire de fin d'étude**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**LICENCE ACADEMIQUE**

Domaine : Sciences et Technologies

Spécialité : Génie mécanique

Option : Electromécanique industriel

**Thème**

**Étude électromécanique d'une chaîne de  
conversion d'énergie éolienne**

Devant le jury composé de : Présenté par :

.....	Président	- HORRA Salim
.....	Examinateur	- HAMIDATOU Abdellmounaim
.....	Examinateur	- EMBAREK Selmane
A. GUERRAH	Encadreur	

**2013-2014**

## *Dédicace*

*À nos parents,  
À nos familles,  
À nos amis.*

## **REMERCIEMENTS**

*Tout d'abord, nous remercions ALLAH, notre créateur de nous avoir donné les forces pour accomplir ce travail.*

*Nous adressons le grand remerciement à notre encadreur qui a proposé le thème de ce mémoire, aussi pour ses conseils et ses orientations.*

*Nous avons également l'honneur de remercier l'Administration du Département de Mécanique d'avoir facilité le processus de sélection du mémoire et de l'encadreur, ainsi que de l'organisation et la bonne coordination.*

*Un grand merci est adressé aux examinateurs d'avoir accepté la lecture et l'évaluation de notre mémoire.*

*Finalement, nous remercions tous ceux qui ont participé à réaliser ce mémoire.*

# Tableau des matières

Index des figures .....	i
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Généralités sur les systèmes éoliens

I.1 Introduction .....	2
I.2 Principales sources d'énergies renouvelables .....	2
I.3 Définition de l'énergie éolienne .....	2
I.4 Différents types d'aérogénérateurs.....	4
I.5 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal .....	5
I.5.2 La tour .....	6
I.5.3 Les pales du rotor .....	6
I.5.4 La nacelle .....	6
I.5.5 Le moyeu.....	7
I.5.6 L'arbre lent .....	7
I.5.7 Le multiplicateur .....	7
I.5.8 l'arbre rapide avec son frein mécanique .....	7
I.5.9 La génératrice.....	7
I.5.10 Le dispositif d'orientation.....	9
I.5.11 Le système contrôle-commande.....	9
I.5.12 L'unité de refroidissement .....	10
I.5.13 L'anémomètre et la girouette .....	10
I.6 Le principe de fonctionnement d'une éolienne .....	10

## Chapitre II : Aspects mécaniques de l'éolienne

II.1 Introduction.....	11
II.2 Aérodynamique des éoliennes .....	11
II.2.1 Description d'une pale d'éolienne .....	11
II.2.2 Fonctionnement d'une pale d'éolienne.....	12
II.2.3 Portance et traînée d'un profil aérodynamique.....	12
II.2.4 Force de poussée sur une pale d'éolienne.....	13
II.2.5 Énergie fournie par le vent.....	13
II.2.6 Loi de Betz.....	13
II.3 Le Multiplicateur .....	14
II.4 Dynamique de la rotation du rotor .....	15

## Chapitre III : Aspects électriques de l'éolienne

III.1 Introduction .....	17
III.2 Type de machine électrique .....	17
III.2.1. Machine synchrone à aimants permanents .....	17
III.2.2 Machine synchrone à rotor bobiné .....	21
III.2.3 Générateurs asynchrones .....	21
III.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents .....	22
III.3.1 Les hypothèses simplificatrices .....	22
III.3.2 Modèle en abc.....	22
III.3.3 Modèle biphasé (transformation de Park).....	23
III.3.4 Expression du couple électromagnétique .....	25
III.3.5 L'équation mécanique .....	25
III.4 Modèle de l'onduleur de tension .....	26
III.5 Modèle du redresseur.....	27
III.6 La Commande M.L.I.....	29
III.7 Connexion de parcs éoliens au réseau .....	30

## Chapitre IV : Contrôle et commande de l'éolienne

IV.1 Introduction .....	32
IV.2 Problèmes rencontrés en éolien .....	32
IV.3 Pourquoi une régulation de vitesse.....	33
IV.4 Systèmes de régulation mécanique.....	33
IV.4.1 Le positionnement de la nacelle .....	33
IV.4.2 Le système à pas ou calage variable.....	34
IV.4.3 Le système par décrochage aérodynamique actif .....	36
IV.4.4 Autres systèmes mécaniques .....	36
IV.5 Systèmes de régulation électronique .....	36
IV.5.1 Variation de la résistance rotorique.....	36
IV.5.2 Variation de vitesse .....	37
IV.5.3 Démarreur à gradateur .....	39
IV.5.4 Batterie de condensateur .....	40
IV.6 Stratégie de régulation.....	40
IV.6.1 Association de système de contrôle.....	40
IV.6.2 Système MPPT .....	40
IV.7 Systèmes d'urgence.....	41
IV.7.1 Frein aérodynamique .....	41

IV.7.2 Frein mécanique .....	41
IV.7.3 Frein électronique.....	41
IV.7.4 Détection vibration.....	42
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>43</b>
<b>Références bibliographiques.....</b>	<b>44</b>

## Index des figures

Figure I- 1 Différents types d'éoliennes.....	5
Figure I- 2 Principaux parties d'une éolienne .....	6
Figure I- 3 Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine .....	7
Figure I- 4 Machine synchrone connectée directement au réseau .....	8
Figure I- 5 Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance .....	8
Figure I- 6 Anémomètre WMR80 .....	10
Figure II- 1 Description d'une pale d'éolienne.....	11
Figure II- 2 Forces appliquées sur la pale.....	12
Figure II- 3 Schéma bloc du multiplicateur.....	14
Figure II- 4 Mouvement de rotation du rotor. ....	15
Figure III- 1 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents.....	18
Figure III- 2 Machines à flux radial (a) et axial (b).....	18
Figure III- 3 Machine synchrone à flux axial.....	19
Figure III- 4 Etage d'une machine synchrone à aimants permanents discoïde.....	20
Figure III- 5 MSAP à flux radial.....	20
Figure III- 6 Modèle de la machine synchrone à aimant permanent en abc.....	23
Figure III- 7 Modèle de la machine en biphasé.....	23
Figure III- 8 Machine synchrone liée au réseau par un ensemble redresseur à diode, convertisseur DC/DC et onduleur MLI.....	24
Figure III- 9 Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le stator de la machine.....	26
Figure III- 10 Pont redresseur.....	27
Figure III- 11 Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.....	28
Figure III- 12 Détermination des instants d'échantillonnage.....	29
Figure III- 13 Exemple d'architectures de connexion de parcs à un réseau.....	30
Figure IV- 1 courbe typique de la puissance extraite.....	33
Figure IV- 2 L'angle de calage.....	34
Figure IV- 3 Coefficient de puissance en fonction de vitesse spécifique.....	35
Figure IV- 4 Ecoulement autour d'une pale.....	35
Figure IV- 5 montage à variation de résistance rotorique.....	37
Figure IV- 6 Génératrice asynchrone GAS avec multiplicateur et à variation de vitesse par le rotor.....	38
Figure IV- 7 Génératrice à attaque directe à convertisseur de fréquence sur le stator.....	39
Figure IV- 8 Génératrice synchrone GS via un multiplicateur.....	39
Figure IV- 9 Système de « tracking » de la puissance maximale pour un générateur débitant sur une source de tension continue.....	40
Figure IV- 10 Frein aérodynamique.....	41
Figure IV- 11 Frein mécanique.....	41
Figure IV- 12 Détection vibration.....	42

# **INTRODUCTION GENERALE**

### **Introduction générale**

L'intense industrialisation des dernières décennies et la multiplication des appareils domestiques électriques ont conduit à des besoins en énergie électrique considérables. Face à cette demande, toujours croissante de nos jours, les pays industrialisés ont massivement fait appel aux centrales nucléaires. Cette source d'énergie présente l'avantage indéniable de ne pas engendrer de pollution atmosphérique contrairement aux centrales thermiques, mais le risque d'accident nucléaire, le traitement et l'enfouissement des déchets sont des problèmes bien réels qui rendent cette énergie peu attractive pour les générations futures.

La production d'énergie éolienne a été de plus en plus acceptée par les investisseurs et plus de parcs éoliens sont en cours de construction, car ce secteur est devenu rentable. Le coût de l'énergie du vent a diminué au point où il y a des endroits que le prix de l'énergie éolienne est compétitif par rapport aux sources classiques d'énergie, même sans incitation.

L'objectif de ce travail est manifesté dans le cadre de projet de recherche académique, qui doivent d'avoir d'une base générale de fonctionnement du système éolienne soient de côté électrique ou de côté mécanique.

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres :

Dans le premier chapitre de ce mémoire les généralités sur les systèmes éoliens sera présenté. Il s'agit d'une étude assez détaillée : principales sources d'énergies renouvelables, définition de l'énergie éolienne et principe de fonctionnement d'une éolienne avec d'une présentation de chaque composants et leur fonction.

Dans le chapitre suivant, nous effectuons l'étude d'aspects mécaniques de l'éolienne : aérodynamique des éoliennes, description et fonctionnement d'une pale d'éolienne.....), le multiplicateur et dynamique de la rotation du rotor.

Dans le troisième chapitre, nous effectuons l'étude l'aspect électrique de l'éolienne. On aborde les types de machine électrique et modélisation de la machine synchrone à aimants permanents et modèle de l'onduleur de tension et modèle du redresseur, et la commande M.L.I et la connexion de parcs éoliens au réseau.

Dans le dernier chapitre, nous avons présenté le système de commande et le système de contrôle du système éolien.

# **CHAPITRE I :**

**Généralités sur les systèmes éoliens**

### 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). L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, provient du déplacement des masses d'air qui est 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 la masse d'air est en perpétuel déplacement. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne. L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver).

### I.2 Principales sources d'énergies renouvelables

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

### I.3 Définition de l'énergie éolienne

L'humanité utilise le vent depuis la nuit des temps (bateau à voile, moulin à vents...). C'est certainement la forme d'énergie renouvelable qui connaît le plus fort développement les éoliennes ayant fait de gros progrès depuis une dizaine d'années (plus 55% en productivité, moins 50% en niveau de bruit). Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie cinétique du vent (déplacement d'une masse d'air) en énergie mécanique ou électrique. Les éoliennes sont conçues de manière à produire un maximum de puissance pour des vents de force moyenne fréquemment rencontrés. Elles atteignent leur puissance nominale pour une vitesse de vent de 50 km/h (14 m/s). Si le vent devient plus violent, la machine subit des contraintes plus importantes. Elle est alors freinée grâce à un système de régulation électronique qui lui permet de rester à la puissance maximale (atteinte dès 50 km/h) tout en limitant les efforts sur la structure. Au-delà d'un certain seuil (90 km/h, soit 25 m/s), la régulation ne suffit plus. La machine est alors stoppée afin de lui éviter de subir des charges trop importantes. Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet (pas d'effet de serre ou de pluies acides) et aucun déchet. Mais le principal inconvénient de cette source d'énergie renouvelable est son manque de flexibilité et son inconstance. Le vent ne souffle pas forcément quand on en a besoin ! En moyenne, une éolienne tourne à sa puissance nominale 1/5 du temps sur une année. Il convient alors de diviser par 5 la puissance installée pour obtenir la puissance réelle moyenne.

- **Les avantages :**

L'énergie éolienne, propre, fiable, économique, et écologique, c'est une énergie qui respecte l'environnement.

Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO<sub>2</sub>, ...etc.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, gratuit, et inépuisable.

Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO<sub>2</sub> rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.

Parmi toutes les sources de production d'électricité, celle d'origine éolienne subit de très loin le plus fort taux de croissance. L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.

L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.

Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace

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

La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.

C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, selon l'article le coût de l'éolienne à diminuer presque 90% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.

- **Les inconvénients :**

Mêmes s'ils ne sont pas nombreux, l'éolien a quelques désavantages :

L'impact visuel : Ça reste néanmoins un thème subjectif. Des images de synthèse sont élaborées pour montrer l'impact visuel. Dans la plus grande majorité des cas, les enquêtes réalisées montrent une réelle acceptation des populations voisines ou visitant un site éolien.

Les bruits mécaniques ou aérodynamiques ont été réduits par l'utilisation de nouveaux profils, extrémités de pale, mécanismes de transmission etc. et ne sont plus une gêne, même proche des machines (50-60 dB équivalent à une conversation). Une distance d'environ huit fois le diamètre permet de ne plus distinguer aucun bruit lié à cette activité (< 40 dB). De plus, il faut souligner que le bruit naturel du vent, pour des vitesses supérieures à 8 m/s, a tendance à masquer le bruit rayonné par l'éolienne.

La source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était

faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suit, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.

Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien.

Selon l'article de, il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

### I.4 Différents types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées.

Le tableau I-1 présente une classification des turbines éoliennes.

ECHELLE	DIMETRE DE L'HELICE	PUISSANCE DELIVREE
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	46 m et plus	1 MW et plus

Tableau I-1 classification des turbines éoliennes.

- **Les raisons pour choisir une grande éolienne**

1. Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité à un moindre coût qu'une petite. La raison pour cela est que les coûts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande, p.ex.) sont plus ou moins les mêmes, quel que soit la taille de l'éolienne.

2. Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées à l'installation en mer. Le coût des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les coûts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.

3. Dans les zones où il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seule éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

- **Les raisons pour choisir une éolienne plus petite**

1. Il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne. C'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau où la densité de la population et les besoins en électricité est très basse.

2. La production d'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoires, ayant donc tendance à

s'annuler. Et en plus, comme déjà mentionné, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se révéler avantageux dans un réseau électrique faible.

3. Les coûts liés à l'usage de très grandes grues et à la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certains endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.

4. Avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (p.ex. par suite d'une foudre). Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites. Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins rapide que celles d'un petit, ce qui a pour résultat qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

On distingue aussi le "grand éolien", qui concerne les machines de plus de 250 KW, de l'éolien de moyenne puissance (entre 36 KW et 250 KW) et du petit éolien (inférieur à 36KW).



Figure I- 1 Différents types d'éoliennes

### I.5 Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

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. 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, qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le rotor, formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Le système électromécanique (intégré dans la nacelle), qui transforme l'énergie mécanique transmise par la turbine en énergie électrique et qui regroupe une génératrice électrique avec son environnement. Le système d'interconnexion, qui relie le système électromécanique (producteur d'électricité) au consommateur d'électricité. Le système de contrôle (utilisé généralement pour les systèmes éoliens de grande puissance), comportant un dispositif qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation et essaye aussi de la mettre fonctionner à ces puissances maximales. En cas de défaillance (par exemple surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice, ...etc.), le système arrête automatiquement l'éolienne

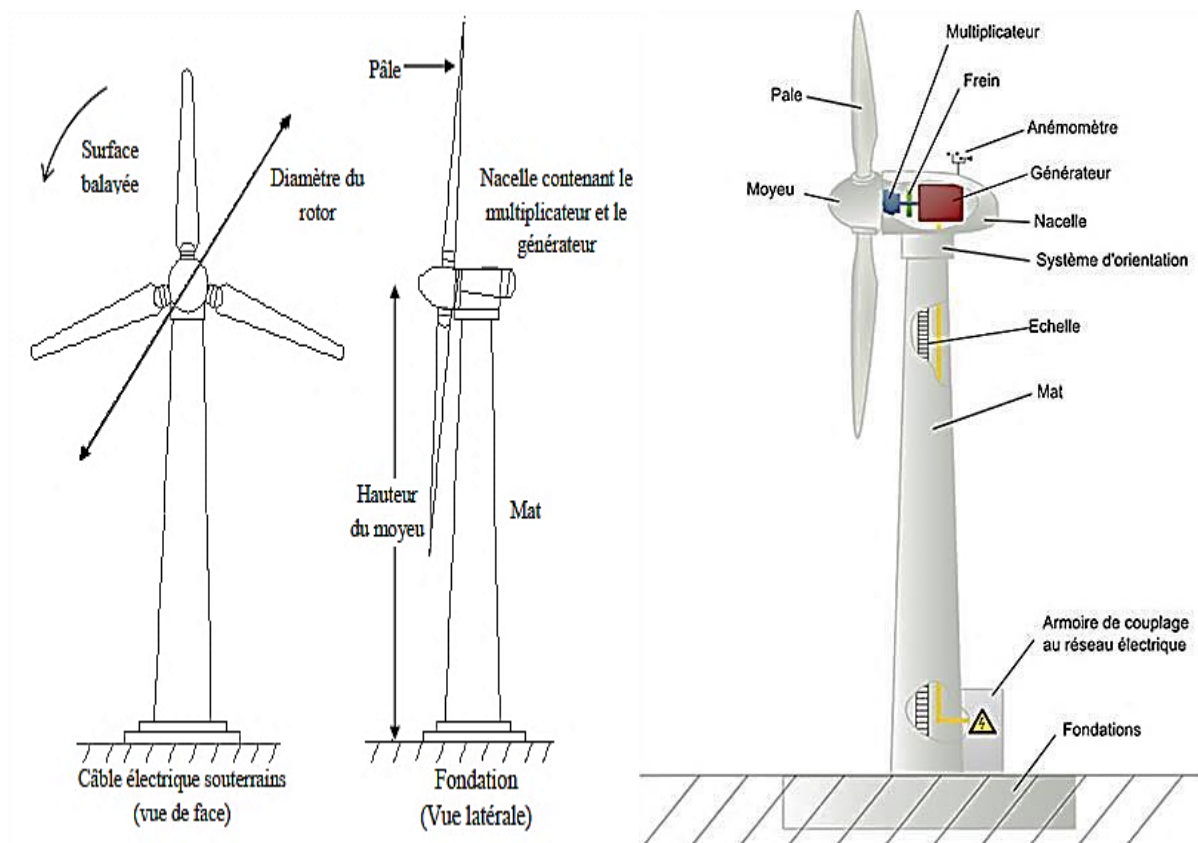


Figure I- 2 Principaux parties d'une éolienne

### I.5.2 La tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble « rotor plus nacelle » pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble « rotor plus nacelle » de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation.

### I.5.3 Les pales du rotor

Les pales du rotor captent le vent et transfèrent sa puissance au moyeu du rotor. Chaque pale d'une éolienne de 1.5 MW mesure environ 30 à 35 m de long et sa conception ressemble beaucoup à celle des ailes d'un avion.

### I.5.4 La nacelle

Une nacelle montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol est assuré par des câbles électriques descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne.

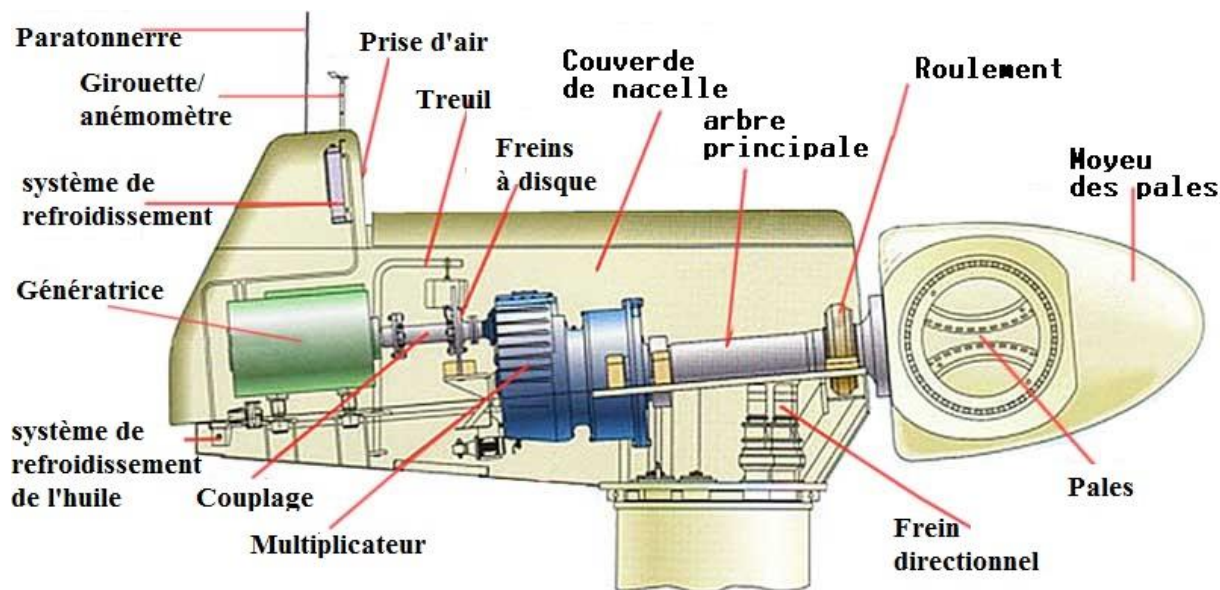


Figure I- 3 Principales composantes intérieures de la nacelle d'une turbine

### I.5.5 Le moyeu

Le **moyeu** est le point de raccordement entre les pales et l'arbre lent de la machine. Les éoliennes produisant de l'électricité sont équipées de pâles qui tournent autour d'un moyeu (Le moyeu est le point de raccordement entre les pâles et l'arbre lent de la machine). Ce moyeu est relié à un multiplicateur et à une génératrice située à l'intérieur de la nacelle.

### I.5.6 L'arbre lent

L'**arbre lent** de l'éolienne lie le moyeu du rotor au multiplicateur. L'arbre lent de l'éolienne lie le moyeu du rotor au multiplicateur. Le rotor d'une éolienne moderne de 1.000 kW tourne assez lentement, environ 20 tours par minute. L'arbre contient des tuyaux pour le système hydraulique permettant l'opération des freins aérodynamiques.

### I.5.7 Le multiplicateur

Le **multiplicateur** relie l'arbre lent à l'arbre rapide en augmentant au passage de plus de 100 fois la vitesse de rotation. Il est situé à droite de l'arbre lent. Il fait tourner l'arbre rapide à une vitesse 75 fois supérieure à celle de l'arbre lent

### I.5.8 l'arbre rapide avec son frein mécanique

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 tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

### I.5.9 La génératrice

La **génératrice** est l'endroit où l'énergie cinétique (du mouvement) se transforme en énergie électrique.

- **Générateur synchrone :**

C'est le type de machine qui est utilisé dans la plupart des procédés traditionnels de production d'électricité, notamment dans ceux de très grandes puissances (centrales thermiques, hydrauliques ou nucléaires). Les générateurs synchrones de 500 kW à 2 MW utilisés dans le domaine éolien, sont bien plus chers que les générateurs à induction de la même taille.

De plus, lorsque ce type de machine est directement connecté au réseau (figure I-4), sa vitesse de rotation fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion génératrice - réseau, les fluctuations du couple capté par l'aéroturbine se propagent sur tout le train de puissance, jusqu'à la puissance électrique produite.

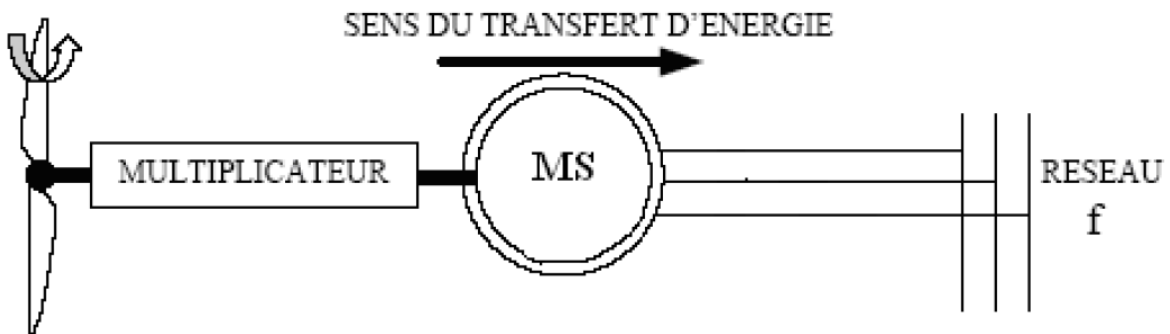


Figure I- 4 Machine synchrone connectée directement au réseau

C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau ; elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance (figure I-5).

Dans cette configuration, la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine sont découplés. Cette vitesse peut par conséquent varier de sorte à optimiser le rendement aérodynamique de l'éolienne et amortir les fluctuations du couple dans le train de puissance.

Certaines variantes de machines synchrones peuvent fonctionner à de faibles vitesses de rotation et donc être directement couplées à l'aéroturbine. Elles permettent ainsi de s'en passer du multiplicateur, élément présent sur la plupart des aérogénérateurs et demandant un important travail de maintenance.

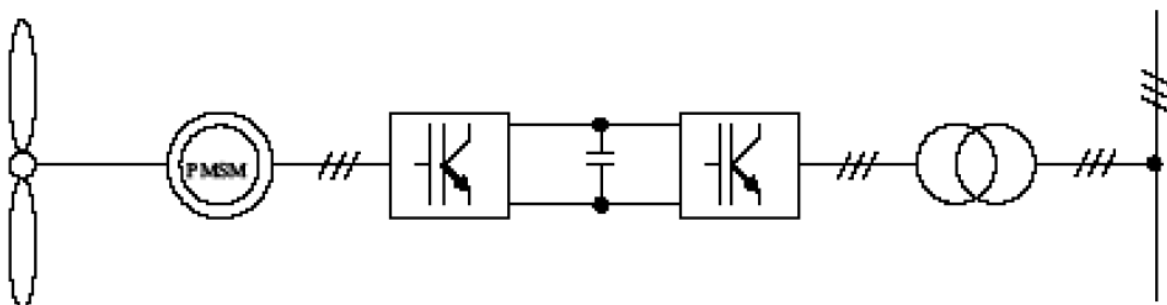


Figure I- 5 Machine synchrone connectée au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance

- **Générateur asynchrone:**

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

Ceci explique, pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. Il existe deux catégories de machine asynchrone: les machines asynchrones à cage d'écureuil et les machines asynchrones à rotor bobiné.

### **I.5.10 Le dispositif d'orientation**

#### **A) Un contrôleur électronique**

Il est chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 3,5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor + nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes pouvant survenir.

#### **B) Le dispositif d'orientation de la nacelle**

Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée : cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de la génératrice jusqu'au pied de la tour. En effet, l'utilisation d'un collecteur tournant n'est guère envisageable au vu des intensités élevées qui transitent (parfois plusieurs centaines d'ampères). Au bout d'un certain nombre de tours de la nacelle, celle-ci est alors manœuvrée en sens inverse à l'aide des moteurs d'orientation pour dévriller le câble. Celui-ci est généralement muni d'un interrupteur (actionné par la traction du câble résultant de son vrillage) qui empêche toute rotation supplémentaire de la nacelle en cas de défaillance du compteur.

#### **C) Le dispositif d'orientation des pales**

Il permet d'ajuster la portance des pales à la vitesse du vent pour maintenir une puissance sensiblement constante dans la zone III de vitesse.

### **I.5.11 Le système contrôle-commande**

Le système de contrôle de l'éolienne est composé d'un certain nombre d'ordinateurs qui surveillent sans cesse la condition de l'éolienne, tout en recueillant des statistiques sur son fonctionnement. Comme son nom l'indique, cette unité contrôle également plusieurs interrupteurs, pompes hydrauliques et soupapes situés à l'intérieur de l'éolienne.

Avec l'augmentation de la taille des éoliennes, il devient encore plus important que leur taux de disponibilité soit très élevé, donc que leur fonctionnement soit fiable à tout moment.

### I.5.12 L'unité de refroidissement

Le **refroidissement éolien**, parfois aussi appelé **facteur vent** dans le langage populaire, désigne la sensation de froid produite par le vent sur un organisme qui dégage de la chaleur, alors que la température réelle de l'air ambiant ne s'abaisse pas. Paul Siple et Charles F. Passel ont développé le concept de facteur du refroidissement éolien (en langue anglaise, le *wind chill*) juste avant l'entrée des États-Unis dans la Seconde Guerre mondiale lors d'expériences en Antarctique.

Le concept s'est graduellement répandu ensuite grâce au service météorologique des États-Unis. Environnement Canada et d'autres services nationaux de météorologie l'utilisent afin de pouvoir quantifier la température perçue, en cas de froid intense, par le corps humain en combinant la vitesse du vent et la température extérieure.

### I.5.13 L'anémomètre et la girouette

Un anémomètre associé à une station météo sert tout simplement à **mesurer la vitesse du vent**. Son préfixe « anémo » vient de la grecque et signifie « **vent** » et son suffixe « mètre » signifie « **mesure** ». En général sur les stations météo nous utilisons des anémomètres à coupelles (inventé par John Thomas Romney Robinson). Il se compose de 3 demi-coquilles disposées sur des bras horizontaux disposés à 120 degrés et montées sur un axe vertical équipé d'un dispositif de comptage de tours ; la vitesse de rotation de l'anémomètre est proportionnelle à la vitesse du vent.

De plus, à la fonction première de l'anémomètre est associée une seconde fonction qui est la **mesure de la direction du vent** grâce à la girouette associée. D'où la dénomination « **Anémomètre Girouette** »



Figure I- 6 Anémomètre WMR80

## I.6 Le principe de fonctionnement d'une éolienne

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice.

# **CHAPITRE II:**

**Aspects mécaniques de l'éolienne**

## II.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons examiner et modéliser tous les éléments mécaniques qui interviennent dans la conversion éolienne. Notamment, notre étude s'est focalisée sur l'élaboration d'une modélisation de l'hélice de l'éolienne en calculant les efforts créés par le vent sur les pales. Cette modélisation se démarque de la plupart des modélisations établies pour l'étude des éoliennes qui utilisent le calcul de la puissance disponible dans le vent et y affecte un coefficient pour obtenir la puissance disponible sur l'axe de l'hélice.

## II.2 Aérodynamique des éoliennes

L'aérodynamique est la branche de la mécanique des fluides qui s'intéresse aux effets du déplacement des corps dans l'air. L'étude de l'aérodynamique s'applique entre autre aux avions, aux automobiles mais aussi aux éoliennes. Lorsque l'on souhaite étudier et comprendre le fonctionnement d'un profil d'aile ou d'une pale d'éolienne, il est nécessaire de connaître certaines caractéristiques ainsi que le vocabulaire approprié. Nous allons présenter tout ceci.

### II.2.1 Description d'une pale d'éolienne

La figure II-1 décrit une pale d'éolienne et identifie les différentes zones avec la terminologie appropriée

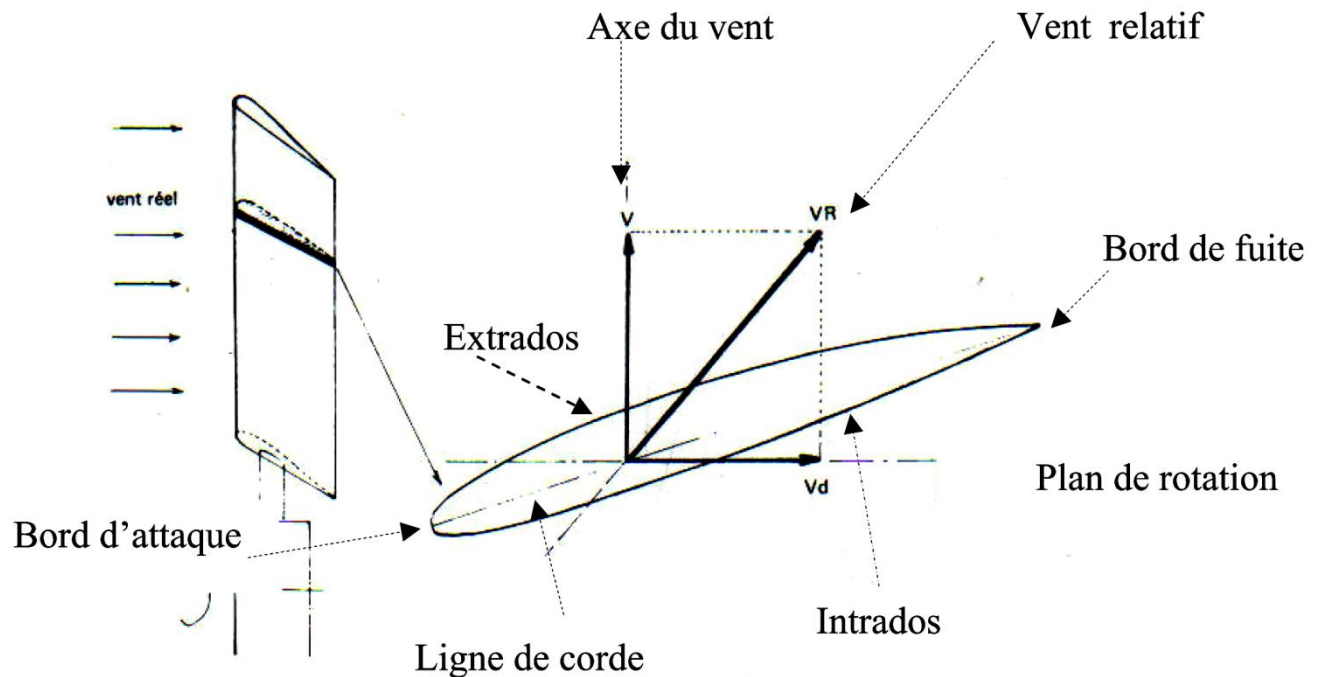


Figure II- 1 Description d'une pale d'éolienne.

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement.

## II.2.2 Fonctionnement d'une pale d'éolienne

Une pale d'éolienne extrait l'énergie cinétique du vent et la transforme, grâce à sa connexion avec le rotor, en mouvement de rotation. Le phénomène de portance aérodynamique est au cœur du principe de fonctionnement.

## II.2.3 Portance et traînée d'un profil aérodynamique

La portance représente la force exercée sur l'extrados de la pale. Cette force tend à tirer la pale ou à soulever l'aile de l'avion perpendiculairement à la direction du vent relatif. La traînée aérodynamique est une force qui s'oppose au mouvement d'un corps se déplaçant dans l'air; c'est la résistance à l'avancement. Elle s'accroît si la surface exposée au vent ou la vitesse de déplacement augmente.

Le coefficient de portance  $C_l$  (lift) et le coefficient de traînée  $C_d$  (drag) servent à caractériser l'aérodynamisme d'un profil. Dans la littérature française,  $C_d$  est remplacé par  $C_x$  et nommé coefficient de pénétration dans l'air.  $C_l$  est remplacé par  $C_z$  et conserve le même nom.

L'écoulement du vent sur le profil de la pale génère la portance. Pour comprendre le phénomène de portance il faut faire appel aux notions de mécanique des fluides que nous avons présentées précédemment. Ce phénomène est dû à la géométrie du profil. En effet nous avons vu qu'avec la relation de Bernoulli, nous pouvons démontrer que suite à un changement de section dans un écoulement, la vitesse augmente et la pression diminue. C'est exactement ce phénomène qui se produit sur une pale d'éolienne. Le fluide qui suit la partie supérieure de la pale, l'extrados, a plus de chemin à parcourir que le fluide qui suit le chemin inférieur, l'intrados. La conservation de la masse d'air entre l'entrée de la pale, (bord d'attaque) et la sortie de la pale, (bord de fuite), impose donc une augmentation de la vitesse et une chute de la pression sur l'extrados. La chute de pression sur l'extrados a tendance à soulever l'aile ou à faire avancer la pale ou encore à « porter » la pale : c'est le phénomène de portance. Bien sur la traînée aérodynamique produit elle aussi une force s'opposant au déplacement de la pale. La figure 58 nous présente :

- la portance  $P$ , perpendiculaire à la direction du vent relatif,
- la traînée  $T$  dans la même direction que le vent relatif.

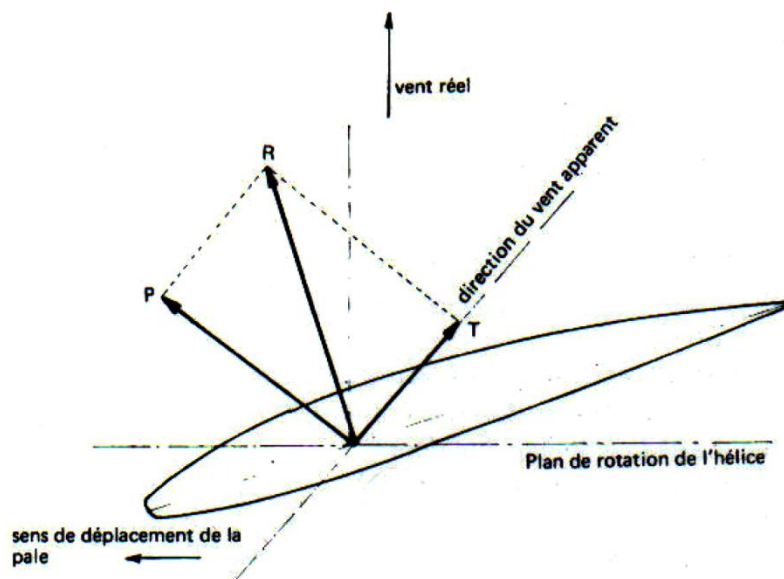


Figure II2 - Forces appliquées sur la pale.

### II.2.4 Force de poussée sur une pale d'éolienne

Une équation permet de calculer la force de poussée,  $F$ , ou la force résistive de l'air sur une pale:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2 \quad (\text{II-1})$$

Où :

$C_d$  : coefficient de traînée.

$A$  : surface projetée perpendiculairement à l'écoulement.

$\rho$  : (Rho) masse volumique de l'air.

$v$  : vitesse relative de l'air par rapport à la pale.

### II.2.5 Énergie fournie par le vent

Le vent fournit une énergie cinétique. En effet, il s'agit d'une masse d'air qui se déplace.

L'énergie cinétique est donnée par l'équation suivante :

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (\text{II-2})$$

Où :

$m$ : masse du volume de vent ou d'air (kg),

$v$  : vitesse du vent (m/s),

$E_c$  : énergie cinétique (Joule).

On rappelle au passage qu'un joule représente le travail d'une force de 1 N appliquée sur une distance de 1 mètre. Ou encore l'énergie nécessaire pour soulever 1 pomme de 1 mètre d'altitude.

### II.2.6 Loi de Betz

La totalité de l'énergie ne peut pas être captée par l'éolienne car la vitesse en aval du rotor n'est jamais nulle. Donc une partie de l'énergie cinétique du vent n'a pas été captée. Le théorème du physicien allemand Betz montre que le maximum d'énergie récupérable dans le vent par le rotor est égal à  $16 / 27$ , soit environ 60 % de l'énergie totale du vent.

La notion de coefficient de puissance  $C_p$  peut maintenant être présentée. Le Coefficient de puissance représente le ratio entre la puissance du rotor et la puissance disponible dans le vent.

$$C_p = \frac{\text{PUISSANCE rotor}}{\text{PUISSANCEvent}} \quad (\text{II-3})$$

En tenant compte de la limite de Betz,  $C_{pmax}$  vaut donc  $16 / 27$  soit 0.5926.

$$C_{p, max} = \frac{P_{rotor}}{P_{vent}} = \frac{P_{rotor}}{\frac{1}{2} \rho \cdot A v^2} = \frac{16}{27} \quad (\text{II-4})$$

La puissance maximale du rotor vaut donc

$$P_{max.} = \underbrace{\frac{16}{27}}_{P_{max}} \cdot \underbrace{\frac{1}{2} \rho \cdot A v^3}_{P_{vent}} \quad (\text{II-5})$$

En tenant compte de tous les autres rendements d'une éolienne comme celui de la génératrice ou du réducteur, le rendement global d'une machine se situe autour de 50 % de la limite de Betz.

$$P_{reelle, rotor} = \underbrace{\frac{1}{2}}_{rendement} \underbrace{\frac{16}{27}}_{Cp.max} \underbrace{\frac{1}{2} \rho \cdot A v^3}_{P_{vent}} \quad (II-6)$$

Pour conclure, dans bien des cas,

$$P_{reelle, rotor} = 0.3 P_{vent}$$

### II.3 Le Multiplicateur

Les multiplicateurs utilisés comportent généralement deux à trois trains d'engrenages épicycloïdaux permettant d'obtenir des rapports de multiplication de l'ordre de 100. Les différents engrenages sont générateurs de bruit et de pertes mécaniques. Ceux-ci diminuent la puissance disponible en sortie de la génératrice.

Pour la modélisation, nous allons utiliser un gain en couple et en vitesse correspondant au rapport de multiplication. Les pertes seront modélisées par des couples de frottements secs et fluides qui vont se soustraire au couple de l'hélice.

$$\Omega_h = \frac{1}{r} \Omega_g \quad (II-7)$$

$$C_g = \frac{1}{r} C_h - K_1 - K_2 \Omega_h - J_m \frac{d\Omega_g}{dt} \quad (II-8)$$

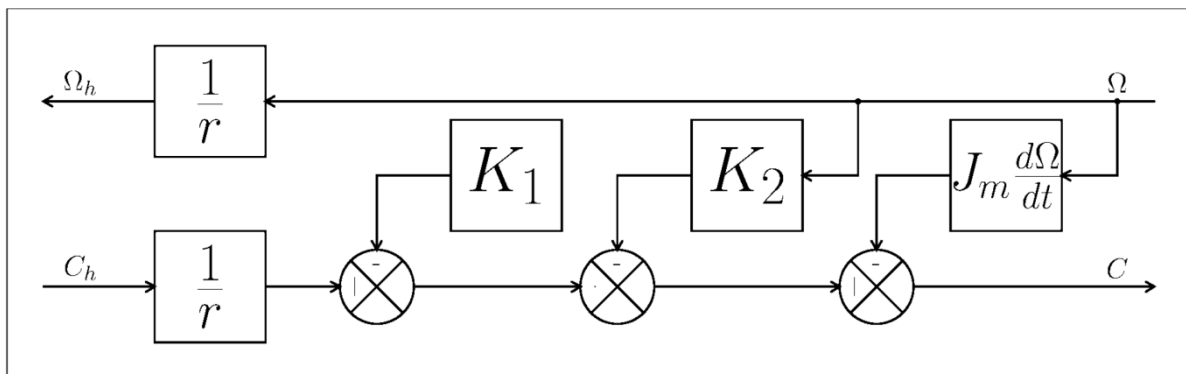


Figure II- 3 Schéma bloc du multiplicateur.

Les paramètres d'entrée de cette modélisation sont le couple coté hélice et la vitesse côté génératrice. Les sorties sont le couple coté génératrice et la vitesse coté hélice, on obtient le schéma bloc de la figure II-3.

## II.4 Dynamique de la rotation du rotor

Dans cette section, nous allons présenter la dynamique de base d'un mouvement de rotation. La vitesse angulaire de rotation est notée  $\omega$  (rad/s). L'accélération angulaire est notée  $\alpha$  (rad/s<sup>2</sup>). La vitesse tangentielle notée  $v$  s'exprime en mètre par seconde (m/s). Pour un point tournant sur un cercle de rayon  $r$ , l'expression de la vitesse tangentielle est la suivante :

$$v = \omega \cdot r \quad (\text{II-9})$$

Lors de la rotation du rotor, les pales subissent une accélération normale et une accélération tangentielle. Ces accélérations génèrent des forces en vertu de la deuxième loi de Newton :

$$\sum \vec{F} = m \cdot \vec{a} \quad (\text{II-10})$$

L'accélération normale donne naissance en quelques sortes aux forces « centrifuges ». Dans un mouvement de rotation, l'accélération normale est dirigée vers le centre de rotation donc les forces le sont aussi. La preuve? Si la pale continue de tourner autour du centre de rotation et ne s'en va pas, c'est bien qu'une force la maintient proche du centre. On peut voir cette force comme une réaction s'opposant à l'action de la force « centrifuge ». L'accélération normale s'écrit :

$$a = r \cdot \omega^2 \quad (\text{II-11})$$

$$\text{Ou encore: } a_n = v^2 / r \quad (\text{II-12})$$

Où :  $r$  = distance par rapport au centre de rotation (m).

$\omega$  = vitesse de rotation angulaire (rad/s).

$v$  = vitesse tangentielle (m/s).

L'accélération tangentielle est tangente au cercle décrit par la rotation. Elle est nulle dans le cas d'un mouvement de rotation à vitesse constante. La figure 63 illustre l'ensemble de ces vitesses et accélérations. L'expression de l'accélération tangentielle est la suivante :

$$a = r \cdot \alpha \quad (\text{II-13})$$

Où :  $r$  = distance par rapport au centre de rotation (m).

$\alpha$  = accélération angulaire en (rad/s<sup>2</sup>).

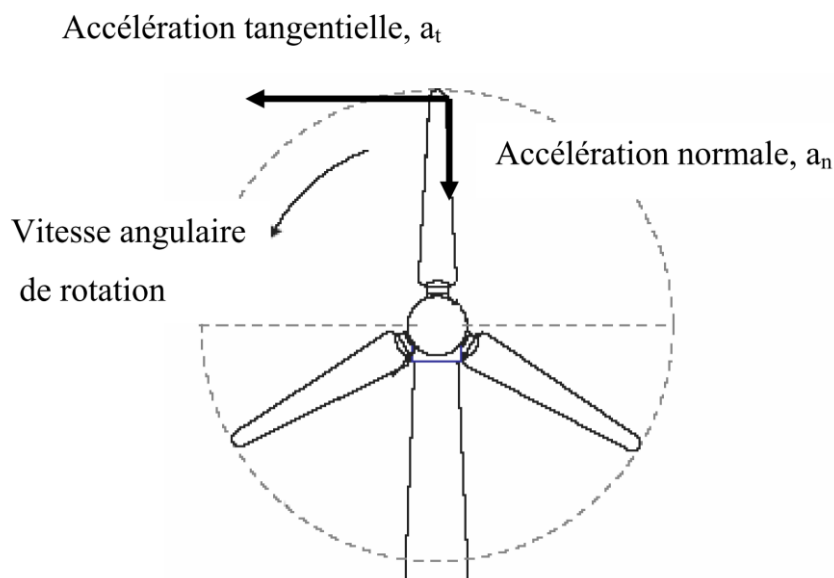


Figure II- 4 Mouvement de rotation du rotor.

Lors de la rotation du rotor, l'application d'un couple peut entraîner une accélération ou une décélération et donc une variation de la vitesse angulaire. Un corps comme le rotor va accélérer ou décélérer plus ou moins vite et facilement selon une grandeur que l'on nomme son moment d'inertie noté  $I$  (kg.m<sup>2</sup>). Si le corps présente une grande inertie, il faudra un couple important pour faire varier son accélération.

Nous pouvons donc écrire que la somme des moments où des couples appliqués sur le rotor en rotation est égale au produit de l'inertie et de l'accélération angulaire :

$$\Sigma \text{Moment} = I \cdot \alpha \quad (\text{II-14})$$

Lors de la rotation, le rotor emmagasine de l'énergie sous forme cinétique. Cette énergie peut s'écrire :

$$Ec = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2 \quad (\text{II-15})$$

Pour déterminer la vitesse de rotation  $\omega$  d'un corps soumis à une accélération angulaire constante  $\alpha$ , nous pouvons appliquer les équations du mouvement uniformément accéléré :

$$\omega = \alpha \cdot t \quad (\text{II-16})$$

# **CHAPITRE III:**

**Aspects électriques de l'éolienne**

### III.1 Introduction

Une éolienne a pour rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Ses différents éléments sont conçus pour maximiser cette conversion énergétique.

La multiplication des éoliennes a conduit les chercheurs en génie électrique à mener des investigations de façon à améliorer l'efficacité de la conversion électromécanique et la qualité de l'énergie fournie.

Afin de valider notre étude théorique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, la réalisation pratique sinon la simulation du processus est nécessaire. Pour ce faire, on a besoin de modéliser la chaîne à étudiée. On s'intéresse dans ce chapitre à la modélisation de la chaîne de conversion globale.

### III.2 Type de machine électrique

Les machines asynchrones présentent le défaut d'imposer la présence d'un multiplicateur de vitesse. Elles sont en effet bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. Par contre, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à dimensions géométriques convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes. Les systèmes de ce type possèdent aussi leurs défauts.

La machine synchrone (MS) a l'avantage d'avoir un bon rendement et un bon couple massique notamment pour la machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que la MAS

Les machines synchrones MS peuvent être à excitation bobinée, généralement avec systèmes sans bagues ni balais ou à excitation par aimants (gain de masse mais surcoût important dû au prix élevé des aimants). Pour les deux types d'excitation, les chaînes de conversion peuvent être les mêmes.

#### III.2.1. Machine synchrone à aimants permanents

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. 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.

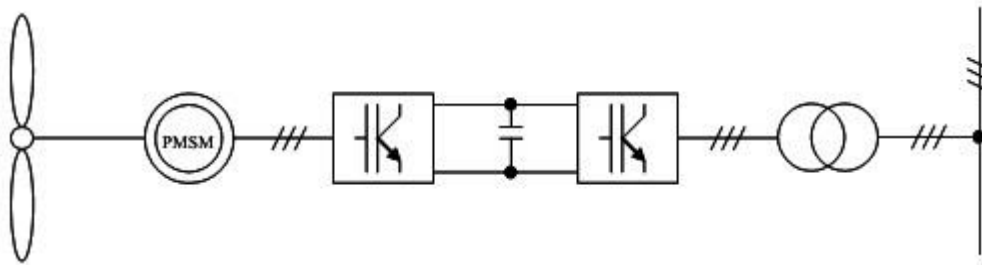


Figure III- 1 Système éolien basé sur la machine synchrone à aimants permanents.

Les principales raisons pour choisir ce type de machine sont: rendement très élevé, grande puissance massique, simplicité du contrôle.

Dans la pratique, des génératrices synchrones à aimants permanents sont très peu utilisées. Il y a plusieurs raisons pour cela : d'abord, les aimants permanents tendent à se démagnétiser lorsqu'ils travaillent dans les champs magnétiques puissants à l'intérieur de la génératrice. En plus, les aimants forts (fabriqués de métaux rares tels que le néodyme) coûtent assez chers, malgré la baisse des prix qui a eu lieu dernièrement. En effet, son rotor est plus léger, permet la régulation de la tension, et son bobinage est facilement modifiable.

Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur.

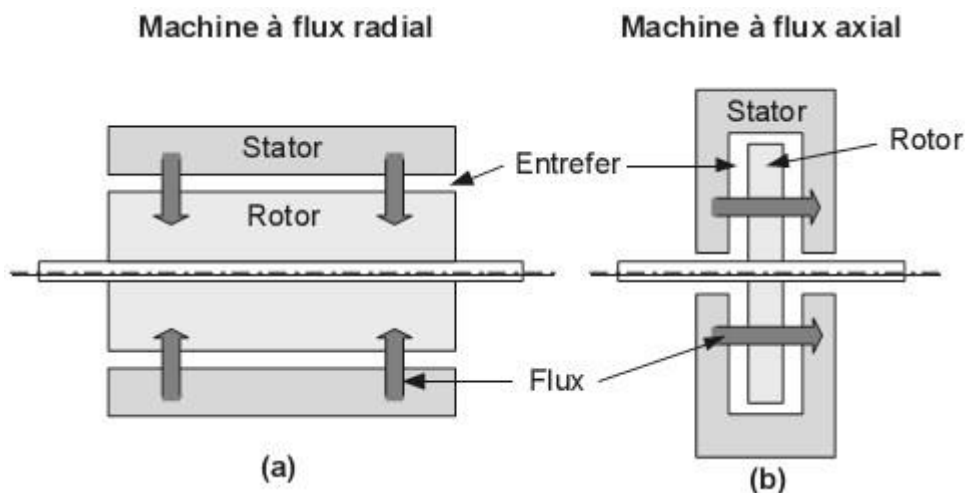


Figure III- 2 Machines à flux radial (a) et axial (b).

• *Machines synchrones à flux axial*

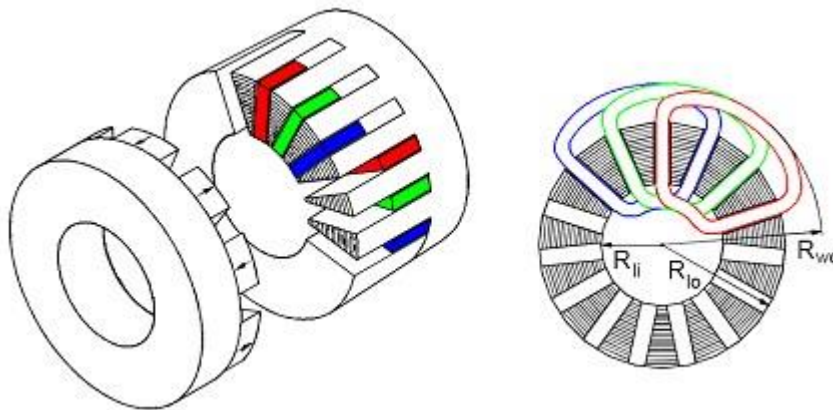


Figure III- 3 Machine synchrone à flux axial.

Pour une machine axialement courte, le volume d'entrefer et donc le couple produit sont plus importants pour une machine à flux axial que pour une machine à flux radial (éq III-1).

$$T_{radial} \propto R_{ext} L_m$$

$$T_{radial} \propto \frac{R_{ext}^2 - R_{int}^2}{2} \quad (III-1)$$

Avec  $L_m$  la longueur de la machine,  $R_{ext}$  le rayon externe de la machine et  $R_{int}$  le rayon interne du rotor (machine axiale).

Pour les applications basses vitesses, la structure de la machine axiale reste compacte alors que la machine radiale tend vers une structure creuse. Ceci conduit à un meilleur couple volumique pour la machine à flux axial.

La machine synchrone à aimants permanents et à entrefer axial dite "discoïde" peut être constituée, dans sa structure élémentaire (étage), soit d'un disque rotorique entouré par deux disques statoriques, soit de deux disques rotoriques entourant le disque statorique comme le montre la figure III-3.

Un disque rotorique est constitué d'un circuit magnétique torique portant les aimants permanents sur une ou deux faces. Le disque statorique est constitué d'un circuit magnétique torique à section rectangulaire portant les bobinages statoriques. Ces derniers peuvent être enroulés autour du tore statorique, ou encore, ils peuvent être logés dans des encoches disposées radialement tout au long de l'entrefer. Cette structure axiale permet de réaliser une machine modulaire en disposant plusieurs étages les uns à côté des autres et en les connectant en parallèle.

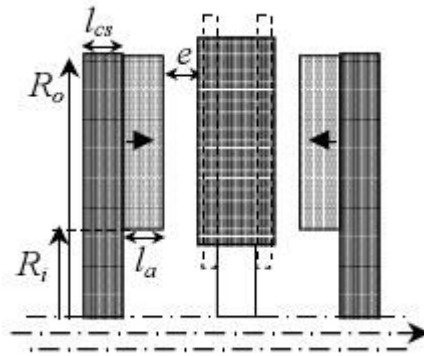


Figure III- 4 Etage d'une machine synchrone à aimants permanents discoïde.

Un autre avantage de cette topologie est la possibilité d'assembler plusieurs machines sur un même axe afin d'accroître le couple. Un inconvénient de cette structure est que les forces d'attraction axiale entre le rotor et le stator peuvent contraindre à des renforcements mécaniques de la structure avec des conséquences sur le poids et le prix.

La machine discoïde utilise cette technologie et trouve des applications dans la propulsion navale. L'éolienne Jeumont J48 de 750 KW met en œuvre ce type de machine pour la vitesse variable à entraînement direct (grand nombre de pôles).

• **Machines synchrones à flux radial**

Plusieurs MSAP à flux radial ont été proposées dans la littérature. La plupart sont à rotor intérieur, mais certaines ont un rotor extérieur,. Ce type de machine permet d'avoir de bonnes performances sur une grande plage de variation de la vitesse de rotation.

La figure III-5 montre une MSAP classique à flux radial et à rotor intérieur.

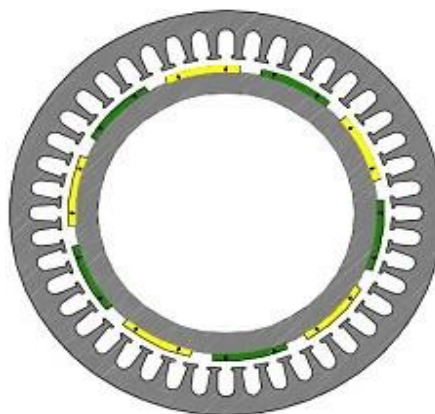


Figure III- 5 MSAP à flux radial.

### III.2.2 Machine synchrone à rotor bobiné

Dans la plupart des cas, le champ tournant rotorique est créé par un bobinage alimenté en courant continu par l'intermédiaire d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation entraîne la présence de contacts glissants au rotor.

Les constructeurs préfèrent donc employer des générateurs synchrones à électroaimants, qui sont alimentés en courant continu obtenu après redressement du courant alternatif du réseau et transmis au rotor par l'intermédiaire d'un système de collecteur tournant.

Les machines synchrones à rotor bobiné demandent un entretien régulier de système des bagues et balais. Le circuit d'excitation de l'inducteur demande la présence du réseau et une fourniture de la puissance réactive.

### III.2.3 Générateurs asynchrones

La connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douée grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor. Ceci explique pourquoi pratiquement toutes les éoliennes à vitesse fixe utilisent des machines à induction. Dans les années 90 les Danois ont rajouté une deuxième machine électrique pour pouvoir faire fonctionner l'éolienne à deux vitesses et ainsi augmenter le rendement énergétique de leurs aérogénérateurs. L'introduction de convertisseurs de puissance entre la machine et le réseau permet comme pour la machine synchrone de découpler la fréquence du réseau et la vitesse de rotation de la machine et ainsi de faire fonctionner l'aérogénérateur à vitesse variable avec tous les avantages cités auparavant. Comme pour les machines synchrones- il existe différents types de machine asynchrones, qui associées à divers convertisseurs de puissance, fonctionnent avec des domaines de variation de vitesse de rotation plus ou moins grands. Deux des désavantages principaux des machines à induction sont la consommation de puissance réactive et le courant élevé au démarrage, mais ces problèmes peuvent être résolus par l'utilisation d'éléments d'électronique de puissance.

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent. L'inconvénient principal de ce genre de système est le surcoût introduit par l'incorporation des convertisseurs de puissance. Ce coût dépendant de la taille de ces convertisseurs, il devient relativement important pour les éoliennes de grande taille.

Deux variantes de ces machines synchrones et asynchrones pourraient se développer dans les prochaines années : des générateurs synchrones à aimant permanent directement couplés à la turbine ou des générateurs asynchrones doublement alimentés au stator. Ce dernier n'est pas encore complètement au point mais aurait un avantage sur les générateurs asynchrones doublement alimentés (GADA) à rotor bobiné, puisqu'il n'a pas de bagues, élément des machines asynchrones à rotor bobiné demandant une certaine maintenance.

### **III.3 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents**

La modélisation des machines est essentielle aussi bien, pour le concepteur que pour l'automaticien. Elle est généralement utilisée pour l'analyse du comportement du système. Les machines à courant alternatifs sont en générale, modélisées par des équations non linéaires (équation différentielles). Cette non linéarité est due aux inductances et coefficients des équations dynamiques qui dépendent de la position rotorique et du temps. Une transformation triphasé – biphasé nécessaire pour simplifier le modèle (réduire le nombre des équations).

#### **III.3.1 Les hypothèses simplificatrices**

Pour une représentation plus simple nécessite l'introduction des hypothèses simplificatrices suivantes :

- Caractéristique magnétique de la machine linéaire.
- Symétrie de la machine.
- Alimentation par un système de tensions triphasées, symétriques et sinusoïdales.
- Répartition sinusoïdale dans l'entre fer.
- L'influence des pièces polaires.

#### **III.3.2 Modèle en abc**

- **Les équations électriques**

Equations des tensions des enroulements statoriques et rotoriques:

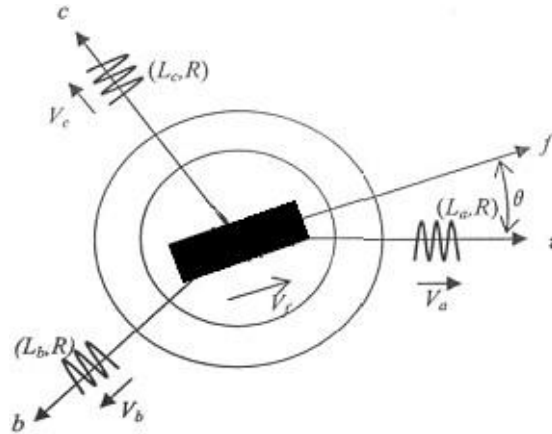


Figure III- 6 Modèle de la machine synchrone à aimant permanent en abc.

$$\begin{cases} va = R \cdot ia + \frac{d}{dt} \psi_a \\ vb = R \cdot ib + \frac{d}{dt} \psi_b \\ vc = R \cdot ic + \frac{d}{dt} \psi_c \end{cases} \quad (III-2)$$

On désigne par  $\Psi_a, \Psi_b, \Psi_c$  les flux totaux qui traversent les enroulements (a, b, c), et par  $(i_a, i_b, i_c)$  les courants qui circulent dans ces enroulements.

### III.3.3 Modèle biphasé (transformation de Park)

A l'aide de transformation de PARK on passe de grandeurs réelle  $(V_a, V_b, V_c)$  et  $(i_a, i_b, i_c)$  à leurs composantes  $(V_o, V_d, V_q)$  et  $(i_o, i_d, i_q)$ .

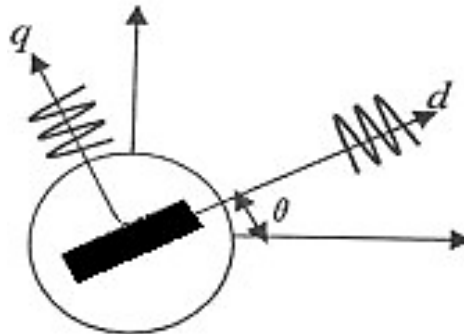


Figure III- 7 Modèle de la machine en biphasé.

La matrice de PARK s'exprime par :

$$P_3(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1/2 & \cos\theta & -\sin\theta \\ 1/2 & \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ 1/2 & \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (III-3)$$

Si le neutre de la machine synchrone est isolé (non relié à la terre) alors :

$$\{i_a + i_b + i_c = 0\} \quad (III-4)$$

Dans ce cas la composante homopolaire est nulle. La matrice de transition de PARK devient alors :

$$[P_2(\theta)] = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \cos(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 2\pi/3) \\ \cos(\theta - 4\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{III-5})$$

Et sa matrice inverse sera exprimée par :

$$[P_2(\theta)]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos \theta & \cos(\theta - 2\pi/3) & \cos(\theta - 4\pi/3) \\ -\sin \theta & -\sin(\theta - 2\pi/3) & -\sin(\theta - 4\pi/3) \end{bmatrix} \quad (\text{III-6})$$

• **Equations électriques :**

La figure III-8 représente les trois enroulements statoriques fixes, et le rotor à aimants permanents.

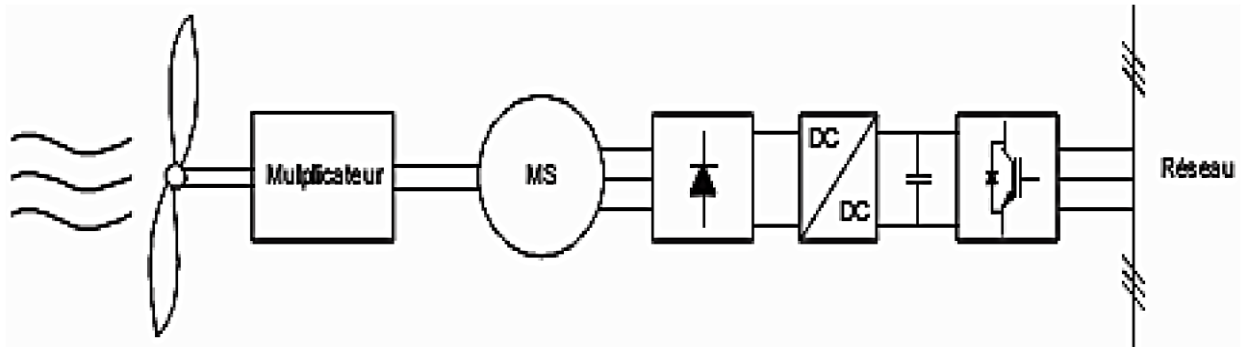


Figure III- 8 Machine synchrone liée au réseau par un ensemble redresseur à diode, convertisseur DC/DC et onduleur MLI.

On a:

$$[V_{dq}] = [P_2(\theta)] \cdot [V_s] \quad (\text{III-7})$$

$$[i_{dq}] = [P_2(\theta)]^{-1} \cdot [i_s] \quad (\text{III-8})$$

Tel que :

$$[V_{dq}] = \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix}, \quad [i_{dq}] = \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad \text{et} \quad [V_s] = \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix}, \quad [i_s] = \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (\text{III-9})$$

Après simplifications on aura :

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \psi_q \cdot \omega_r \quad (\text{III-10})$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} - \psi_d \cdot \omega_r \quad (\text{III-11})$$

Avec :

$$\psi_d = L_d \cdot i_d + \psi_f \quad (\text{III-12})$$

$$\psi_q = L_q \cdot i_q \quad (\text{III-13})$$

$\psi_f$ : Flux des aimants permanents.

Les relations (III-11) et (III-12) deviennent alors :

$$V_d = R_s \cdot i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q \cdot i_q \cdot \omega_r \quad (\text{III-14})$$

$$V_q = R_s \cdot i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + (L_d \cdot i_d + \psi_f) \cdot \omega_r \quad (\text{III-15})$$

### III.3.4 Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{1}{2} * [i_s] \cdot \left\{ \frac{d}{d\theta_m} [L] \right\} \cdot [i_s] \quad (\text{III-16})$$

Avec :  $\theta_e = p\theta_m$

$\theta_e$ : L'angle électrique.

$\theta_m$ : L'angle mécanique.

P : Nombre de paires pôles.

Après développement et simplification on trouve :

$$C_{em} = p \cdot (\Phi_d i_q - \Phi_q i_d) \quad (\text{III-17})$$

En remplaçant  $\Phi_d$  et  $\Phi_q$  par leurs valeurs on trouve :

$$C_{em} = p((L_d - L_q) \cdot i_d + \Phi_f) \cdot i_q \quad (\text{III-18})$$

### III.3.5 L'équation mécanique

L'équation mécanique s'écrit:

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_{em} - C_r \quad (\text{III-19})$$

$$\Omega = \frac{\omega_r}{P} \quad (\text{III-20})$$

$\omega_r$ : Vitesse angulaire (pulsation électrique).

$\Omega$ : Vitesse mécanique.

$J$ : moment d'inertie de la partie tournante.

$f$  : Coefficient de frottement visqueux.

### III.4 Modèle de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension est un convertisseur statique constitué de cellules de commutation généralement à transistors ou des thyristors GTO pour les grandes puissances. Il est constitué de trois bras, de deux interrupteurs pour chacun. Pour assurer la continuité en courants chaque interrupteur est monté en antiparallèle avec une diode de récupération. Les interrupteurs (K1, K4), (K2, K5), (K3, K6) sont contrôlés de manière complémentaire pour éviter le court-circuit de la source.

Le schéma structurel d'un tel convertisseur statique est illustré par la figure III-9.

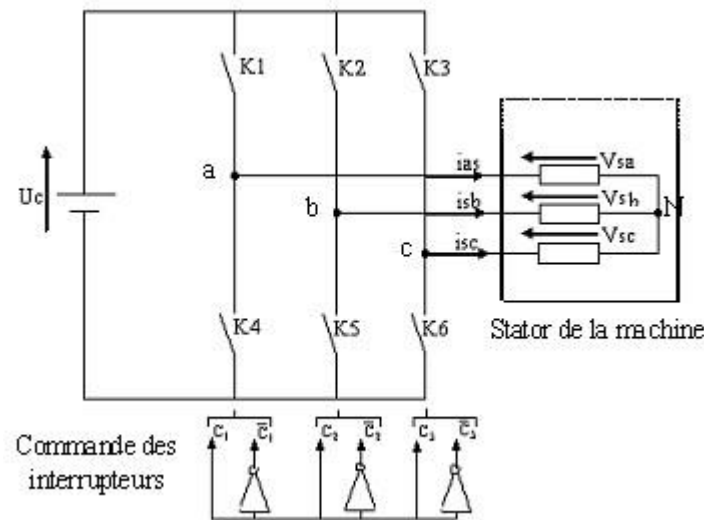


Figure III- 9 Schéma d'un onduleur de tension triphasé alimentant le stator de la machine.

Pour simplifier la modélisation de l'onduleur on supposera que les interrupteurs sont idéaux (temps de commutation nul, pertes négligeables), la charge triphasée est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé.

L'objectif de la commande est de trouver la bonne combinaison de contrôle des interrupteurs, de façon à reconstituer la forme de 3 signaux sinusoïdaux. Soit  $CK$ , les signaux de commande des bras  $K$  de l'onduleur ; avec  $K \in \{1,2,3\}$ .

$CK = 1$  Si l'interrupteur en haut d'un bras est fermé et celui en bas est ouvert ;

$CK = 0$  Si l'interrupteur en haut est ouvert et celui en bas est fermé.

Si la charge connectée à l'onduleur est équilibrée, ( $V_{sa} + V_{sb} + V_{sc} = 0$ ) alors :

$$\begin{cases} V_{aN} = V_{sa} = \frac{U_c}{3} (2 \cdot C_1 - C_2 - C_3) \\ V_{bN} = V_{sb} = \frac{U_c}{3} (2 \cdot C_2 - C_1 - C_3) \\ V_{cN} = V_{sc} = \frac{U_c}{3} (2 \cdot C_3 - C_2 - C_1) \end{cases} \quad (\text{III-21})$$

Sous formes matricielle :

$$[C_K] = [C_1 \ C_2 \ C_3]^t ; [V_{sabc}] = [V_{sa} \ V_{sb} \ V_{sc}]^t \quad (\text{III-22})$$

Où  $V_{sabc}$  est le vecteur des tensions simples à la sortie de l'onduleur, donné par :

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \cdot U_c \cdot \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \\ C_3 \end{bmatrix} = U_c \cdot [T_s] \cdot [C_K] \quad (\text{III-23})$$

### III.5 Modèle du redresseur

La réversibilité de l'onduleur de tension à deux niveaux lui permet de fonctionner en redresseur de courant. Les modèles élaborés pour les onduleurs de tension à deux niveaux sont valables pour les redresseurs de tension en tenant compte des nouvelles conventions des deux sources (réseaux et la charge).

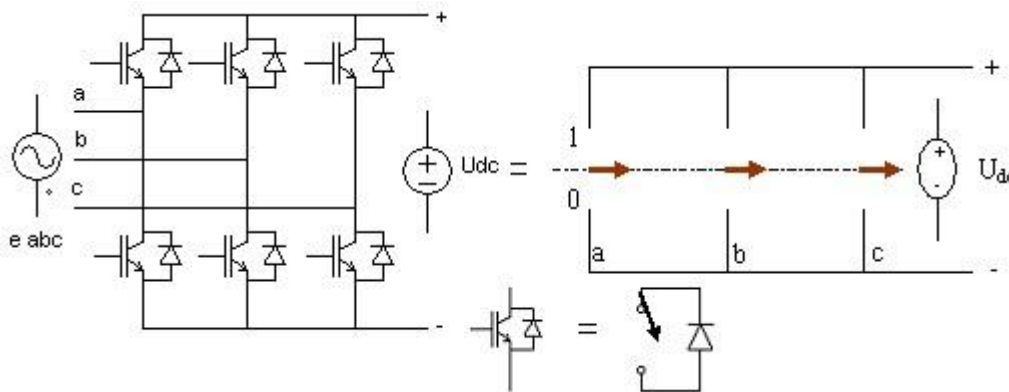


Figure III- 10 Pont redresseur.

Le pont redresseur est constitué de trois bras avec deux transistors (thyristors) bipolaires antiparallèle avec des diodes (figure III-10). Ces bras sont présentés comme des interrupteurs pouvant être commandés en ouverture '1' et en fermeture '0'. La tension redressée  $U_{dc}$  est en fonction des états de ces interrupteurs.

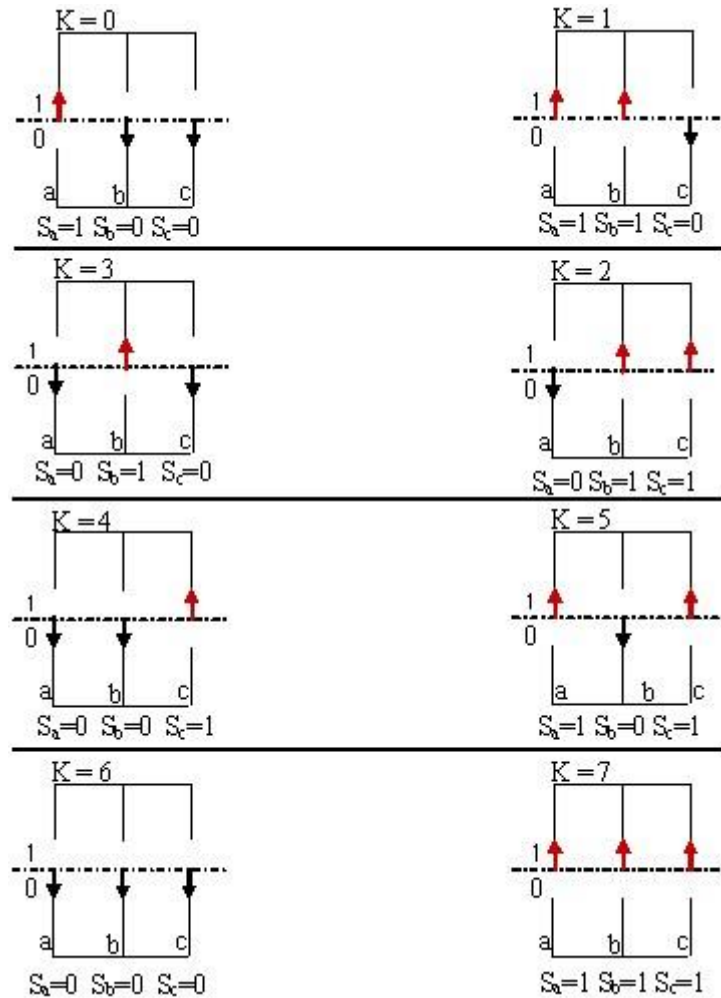


Figure III- 11 Différents états de commutation des interrupteurs du redresseur MLI.

Tableau (III-1) : les huit états possibles des interrupteurs.

K	$s_a$	$s_b$	$s_c$	$v_{ab}$	$v_{bc}$	$v_{ca}$
0	1	0	0	$u_{dc}$	0	$-u_{dc}$
1	1	1	0	0	$u_{dc}$	$-u_{dc}$
2	0	1	0	$-u_{dc}$	0	0
3	0	1	1	$-u_{dc}$	$-u_{dc}$	$u_{dc}$
4	0	0	1	0	$-u_{dc}$	$u_{dc}$
5	1	0	1	$u_{dc}$	0	0
6	0	0	0	0	0	0
7	1	1	1	0	0	0

De cette table on peut écrire la tension d'entrée redresseur d'une manière générale comme suit :

$$\begin{aligned}
 v_{ab} &= (s_a - s_b) \cdot U_{dc} \\
 v_{bc} &= (s_b - s_c) \cdot U_{dc} \\
 v_{ca} &= (s_c - s_a) \cdot U_{dc}
 \end{aligned}
 \tag{III-24}$$

D'où l'on peut déduire les tensions simples :

$$\begin{aligned} v_a &= f_a U_{dc} \\ v_b &= f_b U_{dc} \\ v_c &= f_c U_{dc} \end{aligned} \quad (\text{III-25})$$

Avec :

$$\begin{aligned} f_a &= \frac{2s_a - (s_b + s_c)}{3} \\ f_b &= \frac{2s_b - (s_a + s_c)}{3} \\ f_c &= \frac{2s_c - (s_a + s_c)}{3} \end{aligned} \quad (\text{III-26})$$

### III.6 La Commande M.L.I

Cette méthode consiste à comparer trois tensions de références sinusoïdales (modulatrices) propres à chaque phase à un signal triangulaire (porteuse) commun pour les trois phases.

On a :

$$V_{réf}(i) = V_{réf\ max} \cdot \sin\left(2\pi \cdot f_m \cdot t - (i - 1) \cdot \frac{2\pi}{3}\right) \quad (\text{III-27})$$

Avec:  $i = 1, 2, 3$ .

$V_{réf\ max}$  : Amplitude de la tension de référence.

$f_m$  : Fréquence des modulatrices.

Cette largeur d'impulsion dépend uniquement de la valeur de la tension de référence au début de l'échantillonnage, ce qui facilite la réalisation pratique de cette méthode de modulation par des algorithmes numériques.

Les instants de commutation  $t_1$  et  $t_2$  sont déterminé comme suit :

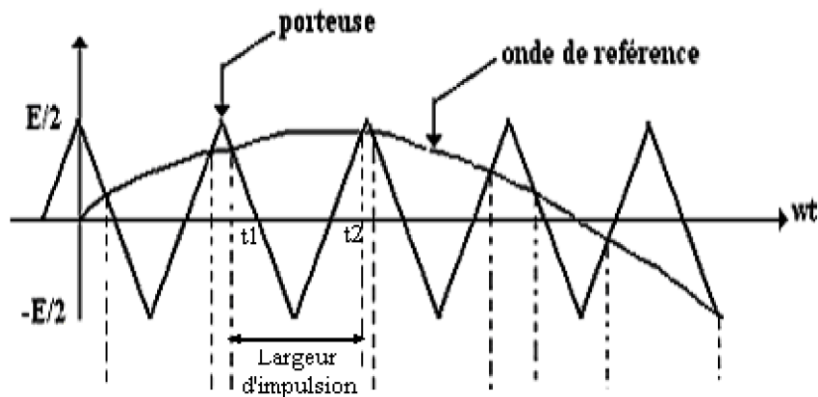


Figure III- 12 Détermination des instants d'échantillonnage.

### III.7 Connexion de parcs éoliens au réseau

Quand on utilise plusieurs éoliennes sur un même site on parle alors de parc éolien ou de ferme éolienne. Ainsi, la réalisation de fermes de plusieurs centaines de MW nécessite la mise en place d'architectures de regroupement (en clusters). Les techniques de connexion au réseau sont diversifiées :

- regroupement en étoile (star cluster).
- regroupement en chaîne (string cluster).

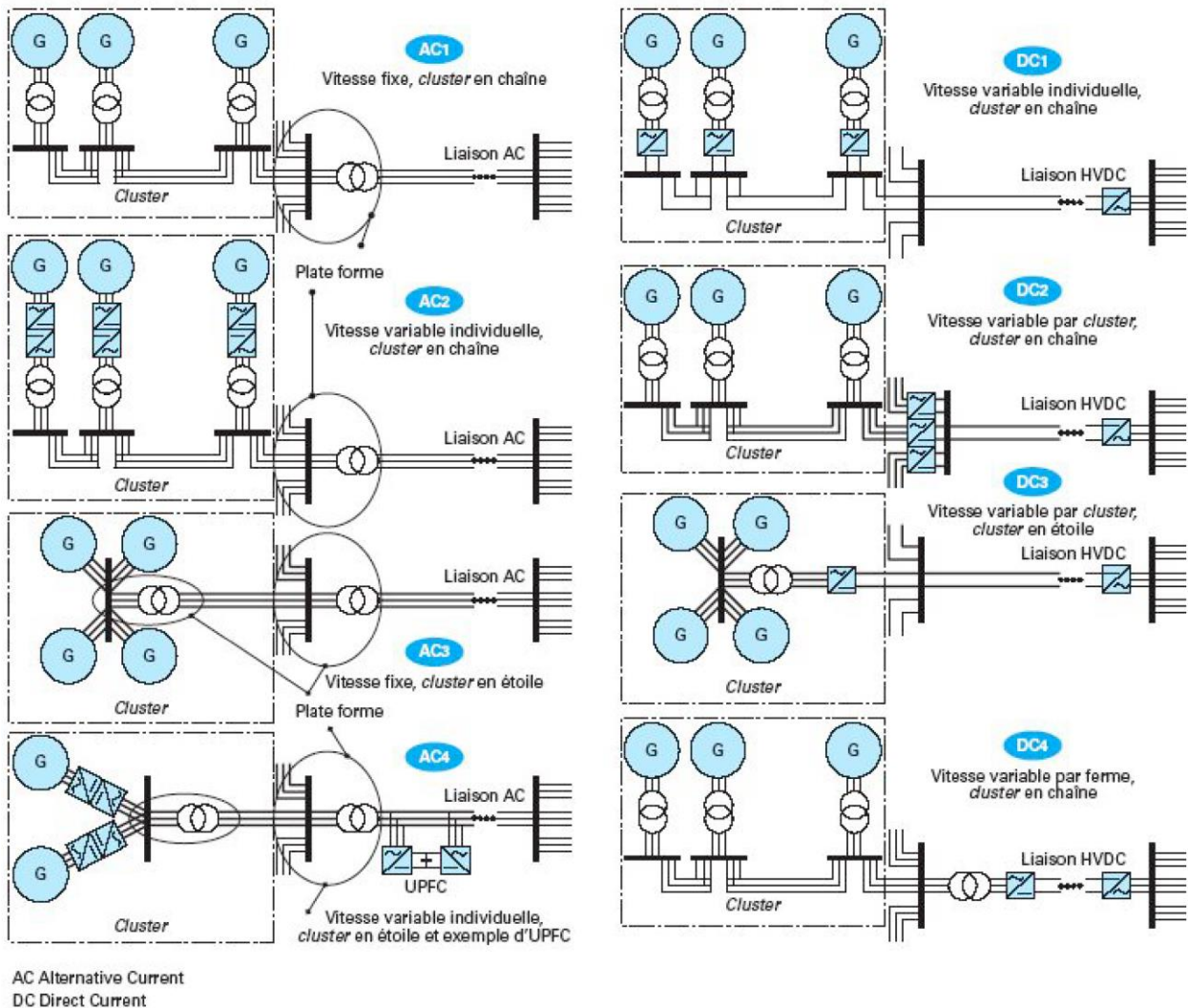


Figure III- 13 Exemple d'architectures de connexion de parcs à un réseau.

La différence majeure entre ces deux types de regroupement est liée à la disponibilité de l'énergie des générateurs, moins bonne pour un cluster en chaîne dans lequel le câble de raccordement est commun à l'ensemble du cluster.

En contre-partie, chaque cluster en étoile nécessite une plate-forme. Les architectures de raccordement à vitesse fixe (AC1, AC3 sur la figure précédente) ou variable (AC2, AC4) sont assez proches. Le dimensionnement des câbles et des transformateurs diffère selon l'architecture et la puissance des générateurs.

Par exemple, pour une architecture en étoile, on peut éviter l'utilisation de transformateurs si les tensions des générateurs sont suffisamment élevées (AC3, AC4).

Sur les liaisons en alternatif, en particulier si la puissance de la ferme devient non négligeable par rapport à la puissance du réseau, on intercale souvent des équipements type UPFC chargés de limiter les variations de puissance et de stabiliser l'ensemble en dépit des variations de vent (AC4).

Les liaisons réseaux s'effectuent classiquement en alternatif pour des questions de coût, en particulier dans les parcs terrestres (onshore) ou les parcs offshore proches du rivage. Pour les parcs éloignés du rivage, les liaisons continues à haute tension HVDC deviennent intéressantes (DC 1, 2, 3,4), cela d'autant plus que la puissance de la ferme augmente vis-à-vis de la puissance de court-circuit du réseau. En effet, les liaisons sous-marines à courant alternatif sont limitées à quelques dizaines de kilomètres en raison des échauffements dus aux courants capacitifs.

Pour les systèmes à vitesse variable, le nombre de convertisseurs AC-DC et DC-AC peut varier selon que l'on connecte un convertisseur par générateur (AC2, AC4, DC1) ou un convertisseur par cluster (DC2, DC3), voire un seul convertisseur pour le parc complet (DC4).

Dans le premier cas, la vitesse de chaque turbine peut être individuellement asservie en fonction du vent. Dans le second et troisième cas, on agit indirectement sur l'ensemble du cluster ou de la ferme, ce qui nécessite que les conditions de vent soient homogènes, ce qui est fréquent en mer.

# **CHAPITRE IV :**

**Contrôle et commande de l'éolienne**

### IV.1 Introduction

Les éoliennes traitées dans ce chapitre sont uniquement à axe horizontal. A titre d'information, elles fonctionnent, en général, pour des vents compris entre 15 et 90 km/h et leur puissance nominale est atteinte à partir de 50 km/h.

En effet, le fait de réguler la puissance de l'éolienne permet d'obtenir la puissance nominale de l'éolienne sur une plage de vent importante et donc de générer une production électrique plus stable indispensable à la mise en réseau. Mais l'aspect sécurité est aussi pris en compte et impose une gestion particulière lorsque le vent atteint des vitesses pouvant détériorer l'éolienne.

Il existe plusieurs systèmes passif ou actif permettant de réaliser le contrôle de la puissance de l'éolienne et de palier aux problèmes de l'éolien.

### IV.2 Problèmes rencontrés en éolien

Les éoliennes sont soumises à des problématiques qui leur sont propres :

D'ordre mécanique ou aérodynamique :

- Vent violent
- Vent faible
- Variabilité d'intensité ou de direction et Instabilité du vent
- Effet de masquage des pales par le mat

D'ordre électrique ou électronique :

- Perturbation du réseau du fait des connexions/déconnexions
- Nécessité d'une alimentation pour magnétiser les GAS
- Nécessité d'une alimentation pour polariser le rotor des GS
- Production d'électricité devant être régulière et de qualité

### IV.3 Pourquoi une régulation de vitesse

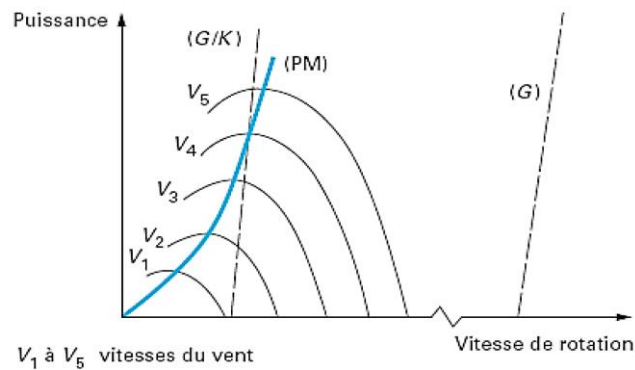


Figure IV- 1 courbe typique de la puissance extraite.

- G est la droite de puissance d'une génératrice asynchrone, la pente de ce droit est légèrement incliné prenant en compte le glissement.
- La droite G/K est celle rapportée via le multiplicateur K à la vitesse du rotor de l'éolienne.
- PM correspond à la puissance mécanique maximum obtenue en fonction de la vitesse du vent et du rotor.

On observe l'intérêt du multiplicateur qui permet d'adapter la vitesse du rotor afin de se rapprocher de la courbe PM.

On peut aussi se rendre compte que afin d'optimiser la puissance délivrée par la génératrice d'une éolienne, il faudrait suivre au plus près la courbe PM. Pour cela, il faut donc adapter la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse du vent, d'où l'intérêt d'utiliser des machines à vitesse variable.

Cela peut être réalisé de plusieurs manières, comme nous l'avons déjà vu précédemment, on peut agir sur le nombre de pôles mais cela implique que la génératrice fonctionnera avec plusieurs vitesses fixes. Sinon, on peut utiliser un variateur de fréquence comme nous allons le voir dans la partie Système de régulation électronique.

### IV.4 Systèmes de régulation mécanique

#### IV.4.1 Le positionnement de la nacelle

Comme nous l'avons vu précédemment, les éoliennes sous le vent et celle à axe vertical peuvent s'affranchir de ce type de système.

En fonction de la direction du vent, la nacelle est positionné à l'aide d'un système motorisé qui peut selon la taille de l'éolienne être très imposant et coûteux vu le poids à déplacer.

Ce système est en place sur l'éolienne de petite puissance de l'université CUST de Clermont-ferrand (1,5 kWatt). Il permet de voir la roue dentée interne de l'éolienne avec le moteur d'entraînement. On peut donc imaginer la taille du moteur et de la roue dentée sur des éoliennes de plusieurs Mégawatts.

### IV.4.2 Le système à pas ou calage variable

L'angle de calage des pales est modifié afin de diminuer ou d'augmenter la portance et inversement pour la traînée des pales de l'éolienne. Cela a pour effet de diminuer ou d'augmenter la puissance transférée à la génératrice.

La modification du calage est réalisée à l'aide de puissant vérin et un asservissement de position électronique (actif) sur les machines de puissances importante ou de façon mécanique et automatique par des masselottes centrifuges (passif).

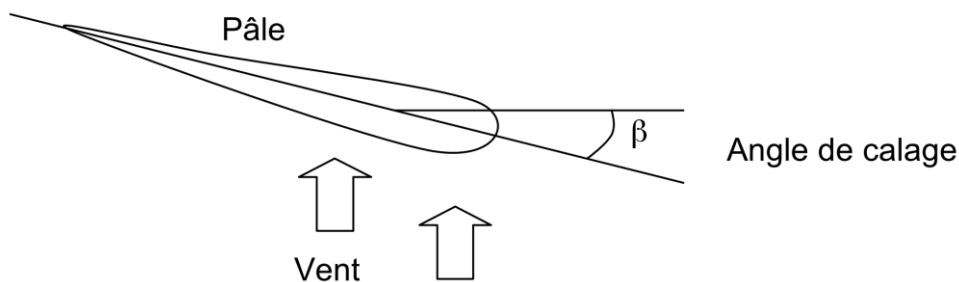


Figure IV- 2 L'angle de calage.

Lorsque l'angle augmente la portance et la traînée diminuent et inversement lorsque l'angle diminue.

Ce système, appelé système Pitch en anglais, permet d'améliorer plusieurs points :

- Démarrage avec des vents faibles par augmentation de la portance des pales lorsque la vitesse du vent diminue, favorisant donc le couple maximum.
- Réduction des efforts sur les pales, en adaptant la puissance mécanique fournie à la génératrice, cela permet de rendre les pales plus légères par construction.
- Réduire le dimensionnement des freins de secours en mettant les pales en drapeau (' à  $90^\circ$ ) lorsque le vent est trop important, la portance est donc minimum.

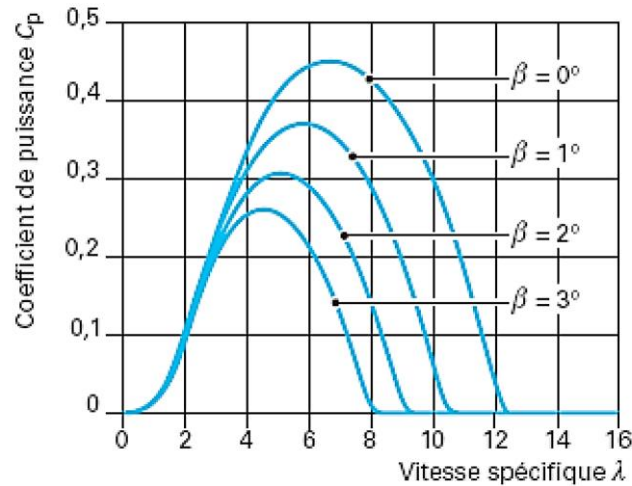


Figure IV- 3 Coefficient de puissance en fonction de vitesse spécifique.

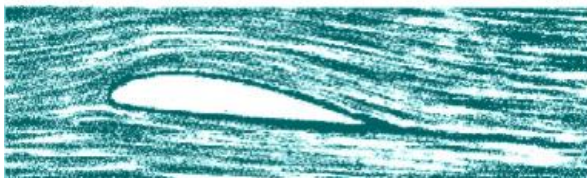
On observe, sur cette courbe, que lorsque l'angle  $\beta$  augmente alors la puissance disponible diminue.

Remarque :  $\lambda$  est le rapport de la vitesse en bout de pale sur la vitesse du vent donc lorsque la vitesse du vent  $\uparrow$  alors  $\lambda \downarrow$ .

L'effet d'une modification faible de l'angle n'a plus d'influence lorsque le vent est trop important.

Par contre, afin de réaliser une régulation optimale, il peut être intéressant de connaître les conditions climatiques d'où la mise en place de capteurs adaptés. Ce système est coûteux et donc pas utilisé pour des éoliennes de petites puissances ni pour des grosses puissances car il devient alors trop fragile.

Dans le système à décrochage dynamique passif, il s'agit d'un système passif, en effet, c'est la forme des pales qui permet d'atteindre le décrochage en fonction de la vitesse du vent. Ce système est donc peu coûteux, il ne nécessite aucune régulation de position.



Écoulement autour d'une pale en régime normal ( $\beta \approx 90^\circ$ )



Écoulement autour d'une pale en décrochage aérodynamique ( $0 < \beta < 90^\circ$ )

Figure IV- 4 Écoulement autour d'une pale.

Ce système est appelé le système Stall passif en anglais et permet principalement de gérer la puissance maxi de l'éolienne et d'assurer la sécurité par perte de portance lorsque la vitesse du vent est trop importante.

### **IV.4.3 Le système par décrochage aérodynamique actif**

C'est une combinaison du système Stall passif et du système pitch, par contre, comme le décrochage est recherché, l'asservissement de position va diminuer l'angle de calage contrairement au système pitch classique. La rotation étant très faible, le système de positionnement est plus simple et robuste que le système pitch

### **IV.4.4 Autres systèmes mécaniques**

D'autres systèmes existent, tel que l'inclinaison verticale de l'éolienne ou la modification d'orientation de la nacelle en fonction de la vitesse du vent ainsi on modifie la portance des pales, mais ces systèmes sont uniquement adaptés aux petites éoliennes de faible puissance car sur des puissances plus fortes les efforts engendrés seraient destructeurs.

## **IV.5 Systèmes de régulation électronique**

Les génératrices asynchrones sont les plus utilisées actuellement. Nous allons traiter, bien sûr, les deux types de génératrice dans ce chapitre.

### **IV.5.1 Variation de la résistance rotorique**

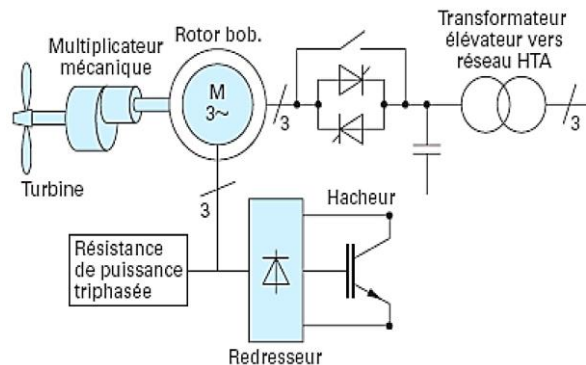
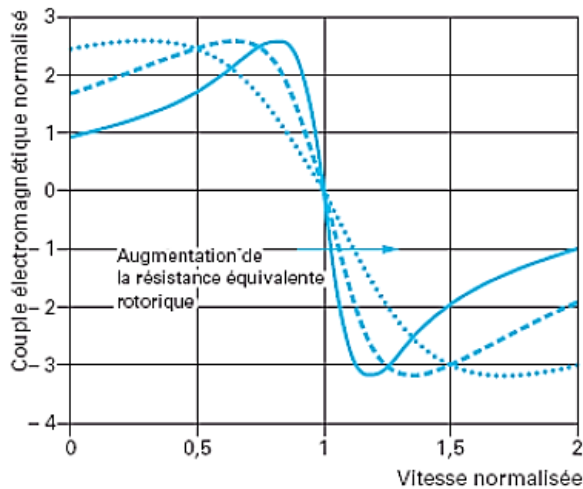
Ce type d'asservissement est utilisé uniquement sur les génératrices asynchrones. On peut agir donc sur le glissement en augmentant ou diminuant la résistance interne du rotor. Cela ne peut être réalisé que sur des génératrices à rotor bobiné car les rotors à cage ne sont pas modifiables.

Ces systèmes obligent généralement à utiliser des montages bagues-balais triphasés car la modification de la résistance du rotor est réalisé en externe, le système d'asservissement étant placé dans la nacelle, et nécessite donc une maintenance plus importante.

Il apparaît, notamment chez VESTAS, des systèmes entièrement compris dans le rotor et piloté via une liaison optique (Optislip) afin d'éliminer ces montages, lourds d'entretien.

Le glissement peut alors varier de 1 à 10%, ce n'est donc pas une réelle régulation de vitesse, mais permet d'absorber les rafales de vents sans soumettre la mécanique à des efforts trop important et de diminuer les effets de flicker tout en gardant un rendement global de la machine élevé.

Exemple de montage à variation de résistance rotorique :



Effet de l'accroissement de la résistance rotorique sur la courbe couple-vitesse

Structure à réglage électronique de la résistance rotorique

Figure IV- 5 Montage à variation de résistance rotorique.

#### IV.5.2 Variation de vitesse

Nous avons vu précédemment l'intérêt d'un système à variation de vitesse. Cela peut être réalisé sous les différents modes suivants :

- **Modification du nombre de pôles**

Cette méthode est utilisée principalement sur les génératrices asynchrones à cage ou les génératrices synchrones afin de leur permettre de fonctionner à plusieurs vitesses constantes. Cela améliore donc le rendement de l'éolienne mais bien sûr pas autant qu'une vitesse continûment variable car on ne peut suivre parfaitement la courbe de puissance maximale.

- **Génératrice à double alimentation**

Ce système n'est valable que pour les génératrices asynchrones, au lieu de gérer la puissance du rotor via une résistance et un hacheur commandé (chap. A), le principe est de la transférer sur le réseau ou de l'augmenter via le réseau.

Cela peut être réalisé totalement ou en partie selon le système utilisé :

- Le pont à diodes et pont à thyristors : Onduleur simple et peu coûteux mais pas d'asservissement possible de la vitesse et génération d'harmoniques sur le réseau.
- Pont à diodes et pont à transistors (onduleur MLI) : Pas de génération d'harmoniques sur le réseau, possibilité d'asservissement du flux de puissance réactive mais pas d'asservissement de la vitesse

- 2 convertisseurs MLI : Idem précédemment mais flux rotorique bidirectionnel, donc possibilité d'asservissement du flux et de la vitesse coté machine et du flux de puissance réactive et actives coté réseau.

Le stator et le rotor sont donc alimentés de façon différente même si la source est identique au départ. L'ensemble de l'électronique de puissance est donc dimensionné pour la puissance (glissement x Pméca).

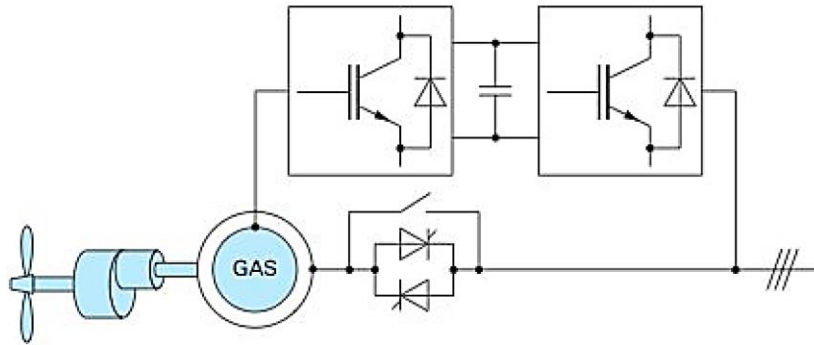


Figure IV- 6 Génératrice asynchrone GAS avec multiplicateur et à variation de vitesse par le rotor.

L'intérêt de ce principe est que l'on peut diminuer le coût du convertisseur de fréquence, le plus utilisé étant composé deux ponts triphasés d'IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor) commandables par modulation de largeur d'impulsion (convertisseur MLI)

En effet, si vous voulez faire varié la vitesse, autour de celle de synchronisme  $\Omega$  symétriquement, d'une certaine valeur, disons entre  $\Omega_{min}$  et  $\Omega_{max}$  avec :

$$k_{\Omega} = \frac{\Omega_{max}}{\Omega_{min}} = 2. \text{ Alors le glissement va varier de } -33 \text{ à } +33\%.$$

La puissance de dimensionnement du convertisseur statique est pratiquement égale à :

$$\frac{k_{\Omega}-1}{2k_{\Omega}} \times P_{méca} \text{ turbine}$$

On obtient alors une puissance transitant par le rotor représentant 25% de la Pméca fournit à la turbine. Le convertisseur est donc dimensionné pour cette puissance.

Un extrait de "L'état des aérogénérateurs 2002" est disponible en annexe 3 pour de plus amples informations sur le fonctionnement de l'ensemble convertisseurs MLI et génératrice asynchrone.

- **Génératrice avec convertisseur de fréquence**

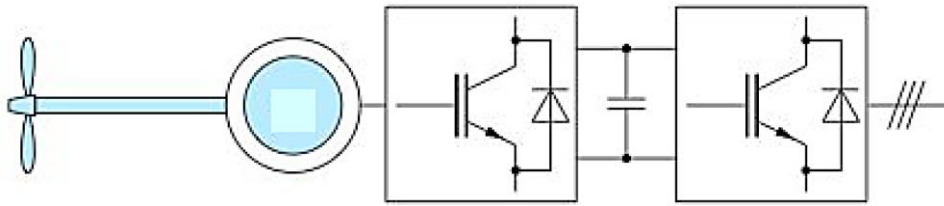


Figure IV- 7 Génératrice à attaque directe à convertisseur de fréquence sur le stator.

Sur les génératrices asynchrones, ce système, qui ne pose, techniquement, pas de problème particulier, n'est cependant pas utilisé car le coût du convertisseur de fréquence pour de grande puissance devient plus élevé que celui de la génératrice même.

Les génératrices synchrones sont très intéressantes en terme de couple, surtout lorsque le nombre de pôles est important, par contre, pour les raccordements en direct, il est alors nécessaire d'ajouter un convertisseur de fréquence permettant d'être en permanence à la puissance maxi. Ce montage est donc largement utilisé et notamment par Enercon.

- **Génératrice en raccordement indirect :**

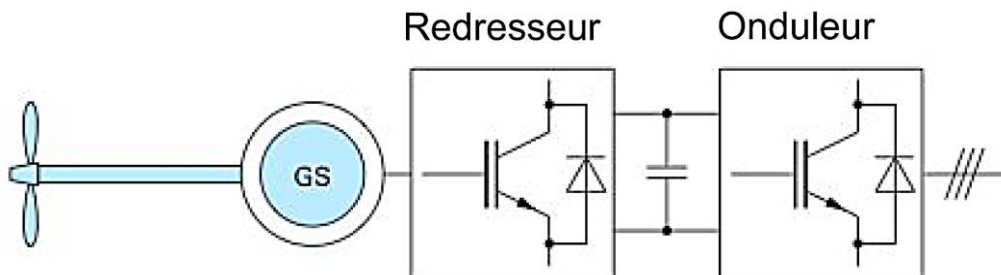


Figure IV- 8 Génératrice synchrone GS via un multiplicateur.

Ce type de raccordement est le plus utilisé, il permet de travailler en vitesse variable avec une génératrice, un multiplicateur et surtout un ensemble composé d'un convertisseur AC/DC (redresseur MLI) et DC/AC (onduleur MLI). La tension est ensuite adaptée par un transformateur au réseau.

### IV.5.3 Démarreur à gradateur

Ce système est utilisé sur les machines asynchrones à cage raccordées en direct sur le réseau. L'ajout dans l'installation d'un démarreur automatique progressif à gradateur (gradateur triphasé à thyristors) permet la mise sous tension progressive du bobinage statorique et de diminuer l'impact sur réseau lors de la connexion.

Sur les installations équipées de convertisseur MLI, il n'est pas nécessaire car cela est réalisé par les convertisseurs.

### IV.5.4 Batterie de condensateur

La mise en place dans l'installation d'une batterie de condensateur permet de fournir à la génératrice asynchrone et notamment au stator, la puissance réactive nécessaire.

Pour les machines raccordées directement au réseau, cette puissance évolue avec la charge et l'utilisation de condensateur réglable (par gradins) permet encore d'améliorer le fonctionnement.

## IV.6 Stratégie de régulation

### IV.6.1 Association de système de contrôle

Le système pitch, qui permet le contrôle de la puissance mécanique transféré à la génératrice, est relativement lent et donc pas adapté à la gestion des rafales de vents.

Sur les génératrice asynchrone, il peut être couplé à une régulation du glissement ainsi le système détecte une augmentation brusque du couple, il modifie le glissement et le calage des pales puis lorsque le calage est réglé, il remodifie le glissement afin d'obtenir toujours le meilleur rendement. L'ensemble réagit donc plus rapidement et efficacement.

### IV.6.2 Système MPPT

Le système MPPT, Maximum Power Point Tracking, est une fonction d'asservissement gérée par microprocesseur, basé sur la logique floue, qui permet d'obtenir le couple maximum quelque soit la vitesse du vent et cela sans la mesurer.

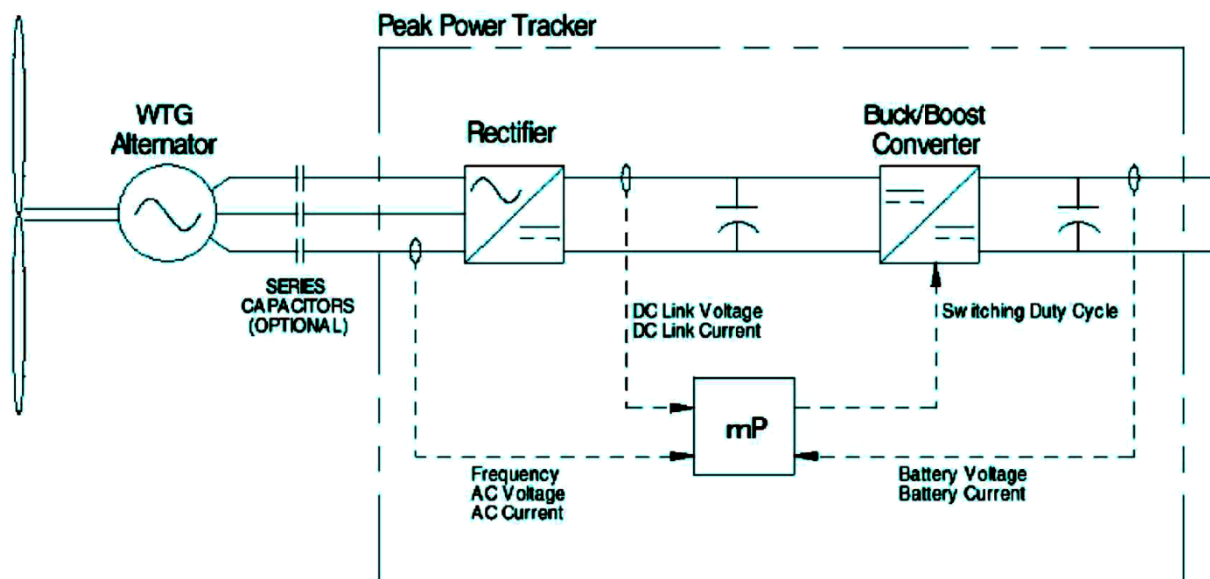


Figure IV- 9 Système de « tracking » de la puissance maximale pour un générateur débitant sur une source de tension continue.

## IV.7 Systèmes d'urgence

### IV.7.1 Frein aérodynamique

Le freinage aérodynamique est utilisé pour stopper l'éolienne si elle rencontre une anomalie telle que, par exemple, la perte de pression du circuit hydraulique, un défaut électrique, .... Ce système est en bout de pale sur les éoliennes à pas fixe ou utilise le système en place pour celles à pas variable, la pale se positionne à 90° grâce à l'action d'un ressort cela afin d'être toujours actif même en cas de perte de tension.



Figure IV- 10 Frein aérodynamique.

### IV.7.2 Frein mécanique

Ce système est en secours du système aérodynamique et permet lors des phases d'arrêt de l'éolienne de travailler en sécurité.



Figure IV- 11 Frein mécanique.

### IV.7.3 Frein électronique

Un freinage électrique est à l'essai sur les installations raccordées au réseau en indirect donc équipé de 2 convertisseurs MLI.

Il comprend un module de dissipation en parallèle sur le condensateur intermédiaire entre les deux convertisseurs. Il s'agit d'une résistance de puissance réglée électroniquement par hachage. Le freinage est possible même en cas de disparition réseau. L'inducteur à aimants garantit la présence des forces électromotrices et la possibilité de freiner dans la quasi-totalité des situations.

### IV.7.4 Détection vibration

Un système arrête l'éolienne en cas de vibration trop importante, celui-ci est très simple et est composé uniquement d'une boule en équilibre sur un support, lorsqu'elle tombe, elle tire sur un câble qui actionne un contact mécanique.



Figure IV- 12 Détection vibration.

# **CONCLUSION GENERALE**

### **Conclusion générale**

Le travail présenté dans ce mémoire porte sur l'étude électromécanique d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne.

Dans un premier temps, une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée. Comme beaucoup d'énergies renouvelables, et généralités sur les systèmes éoliens. Et on peut dire aussi que la chaîne éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées car elle ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre. Vue l'importance de l'énergie éolienne, on s'intéressera dans les chapitres suivants à les parties mécaniques et électriques.

Dans un second temps nous avons présenté Aspects mécaniques de l'éolienne. Nous avons étudié l'aérodynamique des éoliennes (description d'une pale d'éolienne, Fonctionnement d'une pale d'éolienne ..., Loi de Betz, Le multiplicateur et dynamique de la rotation du rotor).

Dans un dernier temps, nous avons abordé la description des machines électriques (en s'intéresse à la machine synchrone à aimants permanents), on a passé en revue la machine synchrone et la modélisation des différents blocs de la chaîne de conversion, tels que la machine synchrone à aimants permanents, les convertisseurs statiques (onduleur et redresseur) et la commande M.L.I, et finalement, la présentation du système de commande et de contrôle pour l'éolienne.

L'importance de cette travail est manifesté dans le cadre de projet de recherche académique, qui doivent avoir d'une base générale de fonctionnement du système éolienne soient de côté électrique ou de côté mécanique.

## Références bibliographiques

- [1] A.G. Kladas, M. P. Papadopoulos, and J. A. Tegopoulos, "Multi-pole permanent magnet generator design for gearless wind turbine applications " proceeding of the IEEE industry applications conference, New York, vol. 1, pp. 387-394, 1998.
- [2] A. BOYETTE, "Contrôle-commande d'un générateur asynchrone à double alimentation avec système de stockage pour la production éolienne," Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré, Nancy 1, 2006.
- [3] A. Mirecki, "Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance," 5 April 2005.
- [4] ADINEOLE, "Visite guidée dans l'univers de l'énergie éolienne," Association danoise de l'industrie éolienne, 2002.
- [5] B. Multon and J. Bonal, "Electromechanical direct drives: Variety, constraints and solutions," Electrical Engineering Review (REE in French), 1999.
- [6] B. Multon, G. Robin, M. Ruellan, and H. B. Ahmed, "Situation énergétique mondiale à l'aube du 3ème millénaire. Perspectives offertes par les ressources renouvelables," revue 3EI, vol. 36, pp. 1-14, mars 2004.
- [7] G. Sturtzer and E. Smigiel, "Modélisation et commande des moteurs triphasés," Edition Ellipse, 2000.
- [8] H. B. Ahmed, "Généralités sur l'énergie éolienne et convertisseurs associés et convertisseurs associés " séminaire électrotechnique de l'académie de Rennes, 9 mars 2004. 2004.
- [9] H. Camblong, "Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éoliennes dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable," Arts et Métiers ParisTech, 2003.
- [10] J. Chen, C. V. Nayar, and L. Xu, "Design and finite-element analysis of an outer-rotor permanent-magnet generator for directly coupled wind turbines," Magnetics, IEEE Transactions on, vol. 36, pp. 3802-3809, 2000.
- [11] J. W. Smith, J. A. Taylor, D. L. Brooks, and R. C. Dugan, "Interconnection studies for wind generation," in Rural Electric Power Conference, 2004, 2004, pp. C3-1-8.
- [12] L. Söderlund, J. Eriksson, J. Salonen, H. Vihriälä, and R. Perälä, "A permanent-magnet generator for wind power applications," IEEE Transactions on Magnetics, vol. 32, 1996.
- [13] M. Dubois, H. Polinder, and J. Ferreira, "Comparison of generator topologies for direct-drive wind turbines," in Proceedings of IEEE Nordic Workshop on Power and Industrial Electronics (Norpie 2000), Aalborg, Denmark, 2000, pp. 22-26.

- [14] M. Olivier and M. Jérôme, "Etude bibliographique : éoliennes, effet Magnus et production électrique," Ecole des Mines de Douai, 2007.
- [15] O. Carlson, A. Grauers, J. Svensson, and A. Larsson, "A comparison of electrical systems for variable speed operation of wind turbines," European wind energy conf, pp. 500-505, 1994.
- [16] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur," École normale supérieure de Cachan-ENS Cachan, 2002.
- [17] P. Lampola, "Direct driven, low speed permanent magnet generator for wind power applications," acta polytechnica scndinaviica, electrical engineering series, vol. 101, 2000.
- [18] R. Michaux and P. Letellier, "Les machines discoïdes à champs axial dans les systèmes de production électrique," revue de l'électricité et de l'électronique, vol. 3, pp. 37-42, 1997.
- [19] R. Radia, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne," Mémoire de Magistère, Université de Constantine, 2009.
- [20] R. Ramakumar and A. Naeter, "Role of renewable energy in the development and electrification of remote and rural areas " PES general meeting Denver, Colorado, USA,, June 6 à12 2004.
- [21] S. El Aimani, "Modélisation des différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension," Ecole Centrale de Lille, 2004.
- [22] T. Grignoux, R. Gibert, P. Neau, and C. Buthion, "Eoliennes en milieu urbain - État de l'art " janvier, pp. 1-129, 2006.
- [23] T. Weigel, "Demagnetization effect in synchronous machine with permanent magnets," proceedings of the 33rd international symposium on electrical machines, pp. 99-104, 1997.
- [24] Y. Bertin, "Refroidissement des machines électriques tournantes," Techniques de l'ingénieur, traité de génie électrique D3460, 1999.

### Sites :

- [1] <http://www.arenidf.org>
- [2] <https://www.eolien.qc.ca>.
- [3] <http://www.station-meteo.com/anemometre/>

## Résumé

Les sources d'énergie renouvelable, permettant une production décentralisée de l'électricité, peuvent contribuer à résoudre le problème de l'électrification des sites isolés où un grand nombre d'individus est dépourvu de tout apport énergétique, ne pouvant ainsi satisfaire aucun besoin même minime et améliorer ses conditions de vie.

On présente dans ce travail l'étude électromécanique d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne. Nous avons étudié cette chaîne en termes d'électrique et mécanique, L'objectif de ce travail est de donner au lecteur un aperçu et résumé du système l'éolienne.

**Mots clés :** éolienne, étude électromécanique, contrôle, commande.

---

## ملخص

لقد أصبحت للطاقات المتجددة مكانة كبيرة في التكنولوجيا الحديثة، و هذا بسبب حاجة الانسان لمصادر جديدة لطاقات صديقة للبيئة، و من بين هذه الطاقات المتجددة الطاقة الهوائية التي يتم استغلالها عن طريق عنفة الرياح.

دراستنا هذه مكرسة من أجل وضع مرجع يحوي اساسيات هذه التكنولوجيا من جانبيين اساسيين، الكهربائي و الميكانيكي، و ذلك من أجل اعطاء فكرة عامة حول طريقة عمل العنفات الهوائية من أول مرحلة الى آخر مرحلة مروراً بالمكونات الاساسية للجهاز، و كذا تحول طاقة الرياح الى طاقة ميكانيكية، ثم تحول الطاقة الميكانيكية الى كهربائية، فتوصيل الكهرباء مع شبكات توزيع الكهرباء. اهمية هذه الدراسة انها عبارة عن قاعدة ننطلق منها في بداية مشاريع البحث الاكاديمية المتعلقة بهذا المجال.

**كلمات مفتاحية :** عنفة هوائية، دراسة الكتروميكانيكية، مراقبة، تحكم.