

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE
LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'automatique et de l'électromécanique

Polycopie de Cours

Spécialité : Master

Energie renouvelable en Electrotechnique

Intitulé :

Systèmes de conversion de l'énergie éolienne

Dr. MOUSSA Oussama

Ghardaia 2024

Auteur

Dr: MOUSSA Oussama

Contact : par mail au moussa.oussama@univ-ghardaia.dz, ouskador@gmail.com

Faculté des Sciences et de la Technologie
Département d'automatique et de l'électromécanique
Etablissement : Université de Ghardaia, Ghardaia – Algérie
Niveau: Master 1_Energies Renouvelables en Electrotechnique

Public cible: 1 ère année master, spécialité Energie renouvelable en Electrotechnique

Intitulé du cours : « **Système de conversion d'énergie éolienne** »

Unité d'Enseignement Fondamentale Code: UEf2.1.2

Nombre d'heures d'enseignement Cours : **1,5 H** TD : **1,5 H** TP : **1,5 H** Nombre d'heures de travail personnel pour l'étudiant : **4,50 H**

Nombre de crédits : **4** Coefficient de la Matière : **3**

Description du cours

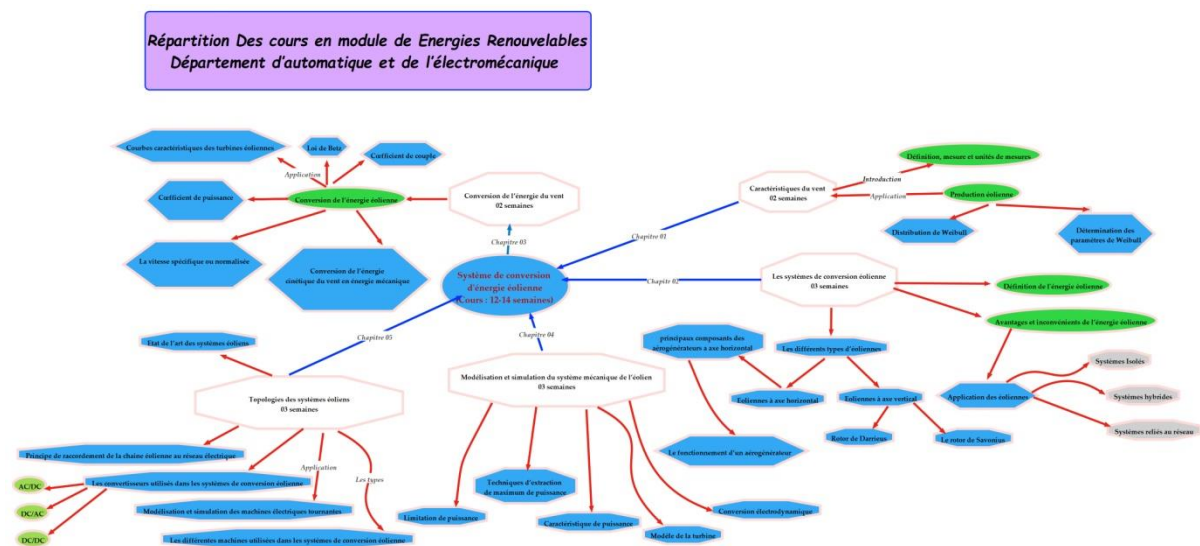
Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables. Fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la Terre, les chutes d'eau, les marées ou encore la croissance des végétaux, leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes. Ce sont les énergies de l'avenir.

Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel. Ainsi, les énergies renouvelables couvrent seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité.

L'augmentation des besoins planétaires en énergie électrique et la prise de conscience des problèmes environnementaux poussent aujourd'hui l'ensemble des responsables politiques et industriels à trouver de nouvelles voies de fourniture d'énergie, et notamment d'énergie électrique.

Ce cours intitulé le « **Système de conversion d'énergie éolienne** », on présentera un survol sur les systèmes de conversion éoliens de manière générale ; puis, l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Ensuite, un rappel théorique sur les différents types d'aérogénérateurs sera donné. Une description détaillée de l'aérogénérateur à axe horizontal qui est l'objet de notre étude, de la technologie de son fonctionnement, des méthodes de sa régulation, ainsi que sa protection mécanique seront présentées. Aussi, les différents types de machines électriques utilisées dans les systèmes éoliens, leurs avantages et leurs inconvénients seront exposés et discutés.

Le cours est scindé en un ensemble d'unités d'apprentissage qui vous permettent d'acquérir des compétences en manière de comprendre les sources de l'énergie renouvelable. Ce cours concerné l'énergie éolienne.



L'énergie éolienne est l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. Une 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. L'énergie éolienne est une énergie renouvelable ; c'est-à-dire non dégradée. De plus, c'est une énergie verte qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif.

La figure 1 montre la définition et la structure de cours «**Système de conversion d'énergie éolienne**»

I. Contenu

Le cours est scindé en cinq unités d'apprentissages, chaque unité d'apprentissage est traitée à travers des séquences pédagogiques permettant l'assimilation des concepts prévus, cette assimilation est consolidée par des activités d'apprentissages où ces notions sont mises en œuvre, c'est une des forces de ce cours. L'ensemble des unités d'apprentissage sont décrites ici, le plan détaillé du cours est disponible en accédant au cours en ligne puis en cliquant sur "plan détaillé".

a. Caractéristiques du vent

Cette unité donne un historique sur l'énergie renouvelable, les différents types de production d'énergie renouvelable, la modélisation de la première énergie de vent.

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le

refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement.

b. Les systèmes de conversion éolienne

Définition de l'énergie éolienne, l'énergie éolienne est l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent, les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne, application des éoliennes, les différents types d'éoliennes, les principaux composants des aérogénérateurs à axe horizontal, et Bilan des forces sur une pale.

c. Conversion de l'énergie du vent

Dans cette partie nous avons présentées les différentes parties de conversion de l'énergie du vent avec des activités d'apprentissage qui vous permettent l'assimilation des différents concepts. Premièrement la Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, et présentée la vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio), et présente la Coefficient de puissance, et la loi de Betz détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $16/27$ (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Et après la production d'énergie mécanique et la Caractéristique d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent.

d. Modélisation et simulation du système mécanique de l'éolien

Dans cette partie nous avons présentées la conversion électrodynamique. Le système de conversion de l'énergie éolienne est un système complexe à cause de la multiplicité des domaines existants, à savoir, le domaine aérodynamique, mécanique, et électrique. Et les facteurs déterminant la puissance mécanique, comme la vitesse du vent, la dimension, et la forme de la turbine. Puis on a fait la Modélisation de la turbine, Les variables d'entrée et sortie de la turbine éolienne peuvent se résumer comme suit :

1. La vitesse du vent qui détermine l'énergie primaire à l'admission de la turbine.
2. Les quantités spécifiques de la machine, résultantes particulièrement de la géométrie du rotor et la surface balayée par les pales de la turbine.
3. La vitesse de la turbine, l'inclinaison des pales, et l'angle de calage.

Les quantités de sortie de la turbine sont la puissance ou le couple qui peuvent être contrôlées en variant les quantités d'entrée précédentes.

e. Topologies des systèmes éoliens

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la

voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

II. Compétences visées

- Comprendre une idée générale sur les sources conventionnelles (non renouvelables) et non conventionnelles (renouvelables) et les méthodes correctes pour l'exploitation de ces sources d'énergies ;
- Présenter la modélisation individuelle de chaque élément de l'architecture complète du système de conversion éolienne ;
 - Savoir connaître tous les éléments de la chaîne de production d'énergie éolienne
 - Savoir modéliser la chaîne de production d'énergie éolienne
 - Savoir implanter et simuler un schéma bloc par **MATLAB-SIMULINK**
 - Savoir écrire et exécuter un algorithme sur **Matlab**
 - Savoir visualiser et exploiter les résultats de simulation
 - Savoir modéliser et simuler une machine électrique par MATLAB-SIMULINK en vue de l'utiliser dans une chaîne de conversion éolienne.

Mode d'évaluation : L'évaluation de l'étudiant se fait par :

1 / Examen de fin de semestre (60%): 1.5 heures et celui du rattrapage : 1 heure.

Travaux dirigés			Exposés	
Assiduité Interro	Participation	Interro	Ecrit	oral
/04 pts	/04 pts	/12 pts	/10 pts	/10 pts

2 / Contrôles continus (40%).

Chapitre I

Caractéristiques du vent

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables, inépuisables par nature, proviennent du soleil, du vent, de la chaleur terrestre, des chutes d'eau, des marées et de la croissance des végétaux. Leur utilisation génère peu ou pas de déchets et d'émissions polluantes, ce qui en fait les énergies de l'avenir. Cependant, elles sont actuellement sous-exploitées par rapport à leur potentiel, représentant seulement 20 % de la consommation mondiale d'électricité. La demande croissante en énergie électrique à l'échelle mondiale et la prise de conscience des enjeux environnementaux incitent aujourd'hui les décideurs politiques et industriels à rechercher de nouvelles sources d'énergie, en particulier d'énergie électrique.

I.2 Définition, mesure et unités de mesures

En météorologie, le **vent** désigne le **mouvement horizontal de l'air**. Sa mesure se fait selon deux paramètres : la **direction** et la **vitesse**, ou force. La vitesse est généralement exprimée en km/h ou en m/s, tandis que les marins et les pilotes utilisent les nœuds (1 nœud = 1,852 km/h). La mesure du vent est toujours une moyenne sur une période donnée. La vitesse du vent est mesurée à l'aide d'un anémomètre.

La *girouette* mesure la direction du vent en s'orientant dans le sens du vent.

On distingue trois classes : instantané, vent moyen et rafale.

- ✓ Le vent instantané est mesuré sur une période de 3s.
- ✓ Le vent moyen est calculé sur une période de 10 minutes.
- ✓ Une rafale est une brusque augmentation du vent instantané, dépassant le vent moyen de plus de 10 nœuds (18 km/h).

I.3 Production éolienne

La ressource éolienne résulte du déplacement des masses d'air, causé indirectement par l'ensoleillement de la Terre. Le réchauffement de certaines régions et le refroidissement d'autres créent une différence de pression, entraînant ainsi un mouvement constant des masses d'air.

I.3.1 Distribution de Weibull

Étant donné qu'il est difficile de manipuler toutes les données relatives à une distribution de la fréquence du vent, il est plus pratique, pour des considérations théoriques, de modéliser l'histogramme des fréquences des vitesses du vent par une fonction mathématique continue plutôt que par une table de valeurs discrètes.

On peut donc opter pour le modèle de **Weibull**. En effet, pour des périodes allant de quelques semaines jusqu'à une année, la fonction de **Weibull** représente raisonnablement les vitesses observées. Il s'agit d'une fonction de densité de probabilité, s'exprimant sous la forme:

$$P(V) = \left(\frac{K}{C}\right) \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \exp\left(-\left(\frac{V}{C}\right)^K\right)$$

Avec:

$P(V)$: est la densité de probabilité de la vitesse V

K : Le facteur de forme de la courbe (sans dimension), Il donne la forme de la distribution et accepte une valeur de 1 à 3. Une valeur plus faible impliquerait un vent très variable alors qu'un vent constant impliquerait une valeur k plus élevée.

C : Le facteur d'échelle de la courbe de **Weibull** exprimé en m/s ; il permet d'exprimer la chronologie d'une vitesse caractéristique. C'est proportionnel à la vitesse moyenne du vent.

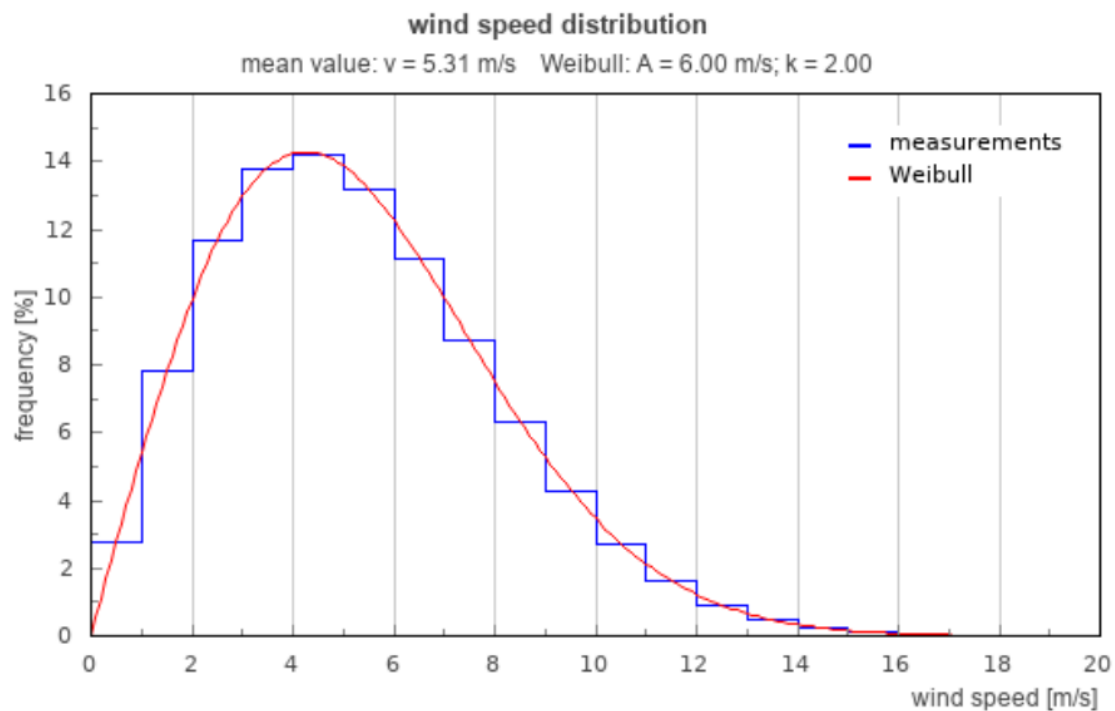
La vitesse moyenne du vent peut être trouvée en intégrant la fonction densité de probabilité, soit donc la formule :

$$V_{moy} = \int V \cdot P(V) \cdot dv$$

Ainsi, la distribution de **Weibull** peut faciliter beaucoup de calculs rendus nécessaires par l'analyse des données du vent.

Exemple :

Classe	Fréquence en %
0-1 m/s	2.75
1-2 m/s	7.80
2-3 m/s	11.64
3-4 m/s	13.79
4-5 m/s	14.20
5-6 m/s	13.15
6-7 m/s	11.14
7-8 m/s	8.7
8-9 m/s	6.34
9-10 m/s	4.30
10-11 m/s	2.73
11-12 m/s	1.62
12-13 m/s	0.91
13-14 m/s	0.48
14-15 m/s	0.24
15-16 m/s	0.11
16-17 m/s	0.05
17-18 m/s	0.02
18-19 m/s	0.01
19-20 m/s	0.00

**Figure 1-1 : Distribution de Weibull**

I.3.2 Détermination des paramètres de Weibull

Il existe de nombreuses méthodes pour déterminer K et C à partir d'une distribution de vent donnée :

$$C = \frac{1.125 \times V_{moy}}{(1 - B)}$$

$$K = 1 + 0.483(V_{moy} - 2)^{0.51}$$

$$B = 1 - 0.81(V_{moy} - 1)^{0.089}$$

Calcul du profil des vents

Au niveau du sol, la vitesse du vent est significativement réduite en raison de la présence d'obstacles et des variations du relief. À une altitude déterminée, au sein des couches géostrophiques (à environ 5 kilomètres d'altitude), le vent cesse d'être soumis à l'influence de la surface terrestre. La vitesse du vent change en fonction de l'altitude. Ce phénomène est communément appelé le cisaillement vertical du vent.

Au-dessus d'un terrain plat et avec une stratification atmosphérique neutre, le profil logarithmique du vent permet une bonne approximation du cisaillement vertical :

$$V_2 = V_1 \frac{\ln\left(\frac{h_2}{z_0}\right)}{\ln\left(\frac{h_1}{z_0}\right)}$$

La vitesse de référence V_1 est mesurée à la hauteur de référence h_1 . V_2 est la vitesse du vent à la hauteur h_2 . z_0 Est la longueur de rugosité (voir tableau ci-dessous).

Classe de rugosité	Longueur de rugosité z_0	Types de surface
0	0.0002 m	Eau : mers, lacs
0.5	0.0024 m	Terrains découverts avec surfaces nues. Ex : béton, pistes d'atterrissage, gazon tondu, etc
1	0.03 m	Terrains agricoles découverts, sans clôtures avec des constructions éparpillées et des collines peu profilées
1.5	0.055 m	Terrains agricoles avec quelques bâtiments et des haies de 8m de hauteur distantes de plus 1Km
2	0.1 m	Terrains agricoles avec quelques bâtiments et des haies de 8m de hauteur distantes d'env. 500m
2.5	0.2m	Terrains agricoles avec de nombreux bâtiments, des Buissons et des plantes ou des haies de 8m de hauteur distantes d'env. 250
3	0.4 m	Villages, petites villes, terrains agricoles avec de nombreuses haies ou de hauts arbres, forêts, terrains très accidentés
3.5	0.6 m	Grandes villes avec de hauts bâtiments
4	1.6 m	Grandes villes avec de hauts bâtiments et des gratte-ciel

Exemple

Hauteur h_1	10m
Vitesse de vent	5m/s
Rugosité z_0	0.1 m

Hauteur	Vitesse de vent
150m	7.94 m/s
140m	7.87 m/s
130m	7.78 m/s
120m	7.70 m/s
110m	7.60 m/s
100m	7.50 m/s
90m	7.39 m/s
80m	7.26 m/s
70m	7.11 m/s
60m	6.95 m/s
50m	6.75 m/s
40m	6.51 m/s
30m	6.19 m/s
20m	5.75 m/s
10m	5.00 m/s

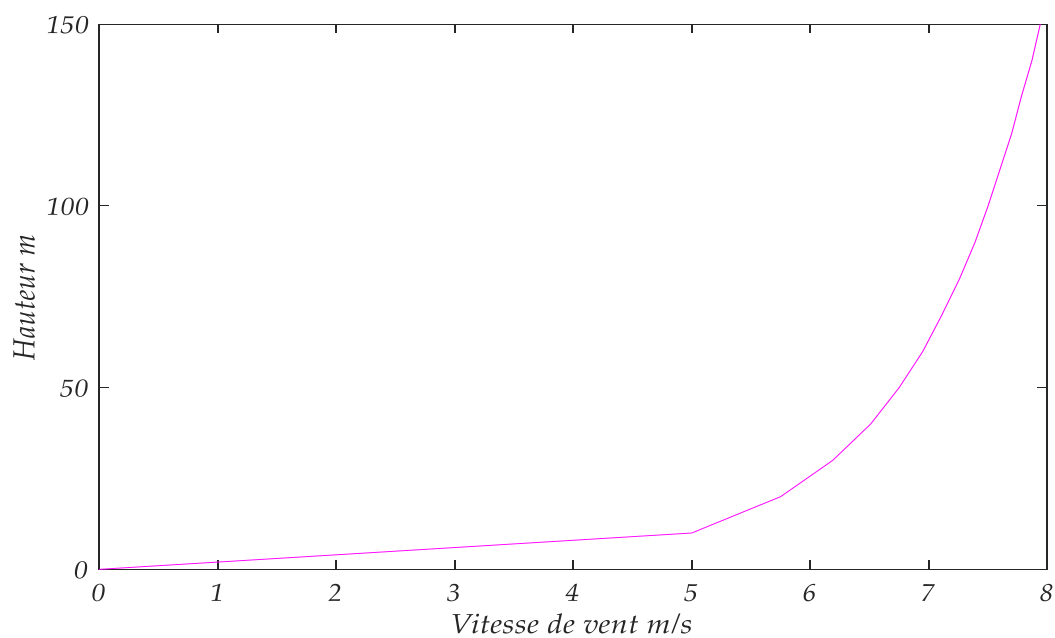


Figure 1-2 : Vitesse de vent

Chapitre II

Les systèmes de conversion éolienne (SCE)

- Définitions,
- Types d'éoliennes (Autonomes, connectés aux réseaux),
- Architecture,
- Partie mécanique de la turbine

II.1 Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est définie comme l'énergie obtenue à partir du vent à l'aide d'un dispositif aérogénérateur tel qu'une éolienne ou un moulin à vent. Une éolienne est un mécanisme qui convertit une fraction de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique utilisable sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique grâce à une génératrice. L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable qui n'est pas sujette à la dégradation. De surcroît, il s'agit d'une source d'énergie renouvelable qui n'émet aucun polluant atmosphérique ni déchet radioactif.

Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Il peut être utilisé directement pour l'entraînement d'une pompe de relevage d'eau, par exemple.
- Afin de mettre en marche un générateur électrique.

En ce qui concerne la production d'énergie électrique, il est possible d'identifier deux types de configurations :

- L'énergie est emmagasinée dans des accumulateurs en vue de sa future utilisation.
- L'énergie est directement injectée dans un réseau de distribution.

Dans la seconde configuration, l'éolienne peut opérer de manière autonome ou en conjonction avec une autre source d'électricité. Le générateur isolé a généralement une puissance relativement faible, allant jusqu'à 20 kW. Pour assurer une intégration efficace avec d'autres sources d'énergie électrique,

il est essentiel de prendre en compte des puissances beaucoup plus élevées (100 kW et plus). L'objectif principal est de minimiser le coût de production par kilowattheure, ce qui influencera la conception, la sélection et l'agencement des divers composants.

En fonction de la plage de puissance générée par l'aérogénérateur, on identifie les différentes catégories d'éoliennes suivantes :

- Eoliennes de petite puissance : couvre la gamme de puissance de 20W à 50kW réparties en trois catégories : micro éoliennes, 100W maximum, mini éoliennes de 100W à 10kW et petites éoliennes de 10 à 50KW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 50Kw à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

II.2 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est une forme d'énergie renouvelable. Elle possède de nombreux avantages, ce qui lui confèrera un rôle crucial à l'avenir ; néanmoins, sa technologie comporte également quelques inconvénients.

I.2.1 Avantages

L'énergie éolienne est connue par ses nombreux avantages, tels que :

- L'énergie éolienne est une source d'énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique et inépuisable. Il s'agit d'une source d'énergie respectueuse de l'environnement qui permettra aux générations futures d'en profiter ;
- L'exploitation de l'énergie éolienne non pas dans le but de substituer les ressources conventionnelles, mais en tant qu'énergie complémentaire aux sources d'énergie traditionnelles ;
- L'énergie éolienne est considérée comme une source d'énergie à faible risque par rapport à l'énergie nucléaire, car elle ne génère pas de déchets radioactifs ;
- L'énergie éolienne permet d'éviter le rejet de 6,3 millions de tonnes de **CO₂**, 21 millions de tonnes de **SO₂** et 17,5 mille tonnes de **NO₂**, des gaz principalement responsables de l'acidification des pluies ;
- La mise en place des éoliennes est relativement aisée en comparaison avec celle des centrales utilisant des sources d'énergie traditionnelles ;
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un processus continu en raison de la possibilité d'arrêter facilement les éoliennes.
- La durée de fonctionnement des éoliennes contemporaines peut s'étendre jusqu'à 25 ans, ce qui est similaire à celle des autres installations de production d'énergie conventionnelles ;
- Les parcs éoliens peuvent être démantelés de manière aisée et sans laisser de résidus.
- Il s'agit d'une source d'énergie universelle car elle ne se limite pas à certains pays, contrairement à l'énergie pétrolière.
- Il s'agit d'une source d'énergie plus économique par rapport aux autres formes d'énergies

renouvelables.

- Cette énergie est intéressante pour les pays en voie de développement puisqu'elle se développe et s'intègre facilement dans un système électrique existant.

II.2.2 Inconvénients

L'énergie éolienne présente également des inconvénients qu'il convient de mentionner :

- L'aspect aléatoire, soumis aux fluctuations des vitesses de vent,
- Le caractère aléatoire du vent à un impact sur la qualité de l'énergie électrique générée, ce qui constitue une contrainte pour les gestionnaires de réseaux ;
- Les éoliennes produisent des sons mécaniques (provenant des multiplicateurs) et aérodynamiques (liés à la vitesse de rotation du rotor) pouvant atteindre un niveau sonore de 55 dB ;
- Les éoliennes peuvent engendrer des incidents en cas de vents violents susceptibles de causer des dommages aux composants de l'installation ;
- Les parcs éoliens peuvent entraver la propagation et la réception des ondes hertziennes ;
- La pollution visuelle et sonore est un problème majeur dans les zones urbaines denses. Les interférences des ondes électromagnétiques provenant de dispositifs tels que la télévision, la radio et les téléphones portables représentent un frein à l'implantation des éoliennes à proximité des zones résidentielles, contraignant ainsi à les installer à distance des habitations ;
- L'intégration des éoliennes dans les réseaux électriques présente des défis et des contraintes particuliers qui nécessitent une attention particulière de la part des opérateurs de réseau. Ces derniers doivent veiller à respecter les exigences de couplage afin de maintenir la qualité de la tension sur les réseaux ;
- Le bruit généré par les pales constitue une nuisance sonore.

II.2.3 Application des éoliennes

Un système éolien peut être employé dans trois applications différentes :

- Systèmes isolés ;
- Systèmes hybrides ;
- Systèmes reliés au réseau ;

II.2.3.1 Systèmes Isolés

L'énergie éolienne est également exploitée pour approvisionner en énergie des sites éloignés, tels que la production d'électricité sur les îles, le pompage d'eau dans les champs, ou encore l'alimentation en électricité de voiliers, de phares et de balises.

En règle générale, les systèmes isolés recourent à diverses formes de stockage d'énergie. Le stockage peut être réalisé à l'aide de batteries, nécessitant ainsi un dispositif de gestion de la charge et de la décharge de la batterie. L'objectif principal du contrôleur de charge est de prévenir tout dommage au

système de batterie causé par des surcharges ou des décharges profondes. L'utilisation d'un onduleur est indispensable pour alimenter un équipement fonctionnant sur un réseau alternatif.

II.2.3.2 Systèmes Hybrides

Un système hybride est un système qui incorpore plusieurs sources d'énergie, notamment des générateurs diesel, des turbines éoliennes et des modules photovoltaïques. La complexité du système est exacerbée par l'utilisation de plusieurs méthodes de production d'énergie électrique, ce qui nécessite l'optimisation de chaque source. Afin d'optimiser la fourniture d'énergie à l'utilisateur, il est nécessaire de réguler toutes les sources de ces systèmes.

II.2.3.3 Systèmes Liés au Réseau

Les grands réseaux électriques sont connectés à plus de 95 % de la capacité éolienne mondiale. Cette situation s'explique par les nombreux avantages que présente l'exploitation d'installations éoliennes sur les réseaux :

- L'énergie éolienne peut être gérée indépendamment des besoins immédiats d'un consommateur particulier ;
- Les centrales électriques conventionnelles sont utilisées pour compenser le déficit de puissance généré par les éoliennes. Par conséquent, le fonctionnement technique des éoliennes connectées à l'infrastructure est moins complexe que celui d'une application individuelle isolée.

II.3 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes sont classées en deux catégories principales : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.

II.3.1 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical ont été parmi les premières structures conçues pour la production d'électricité, malgré leur différence avec les moulins à vent traditionnels à axe horizontal. Elles présentent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur situés au niveau du sol, ce qui les rend facilement accessibles. De nombreuses variantes ont été expérimentées depuis les années vingt, certaines sans succès, cependant deux structures ont atteint le stade de l'industrialisation:

Le rotor de Savonius : (du nom de son inventeur, breveté en 1925) Le mécanisme repose sur le concept de "traînée différentielle" tel qu'utilisé dans les anémomètres : les forces du vent agissant sur les différentes faces d'un objet creux sont inégales, ce qui engendre un couple moteur provoquant la rotation de l'objet.

L'effet est amplifié par la circulation d'air entre deux demi-cylindres, ce qui entraîne une augmentation du couple moteur (Figure 2-1). Le dispositif atteint son rendement optimal lorsque le rapport e/d est de $1/6$ et que le coefficient C_p maximal peut atteindre **0.3**. Le démarrage du rotor de

Savonius requiert un couple initial élevé.

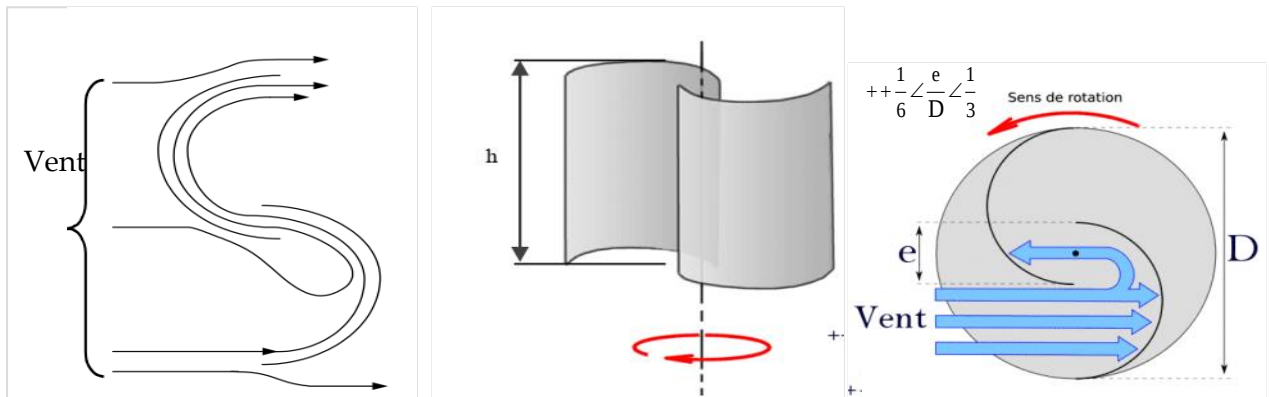


Figure 2-1 : Principe du rotor de *Savonius* et de l'incidence variable.

- **Rotor de Darrieus :** Il est composé de plusieurs pales biconvexes, généralement au nombre de deux ou trois, disposées symétriquement et solidement reliées les unes aux autres, pivotant autour d'un axe vertical. Leur mécanisme repose sur le phénomène selon lequel un profil exposé à un écoulement d'air sous divers angles (voir Figure II.2) subit des forces de magnitude et de direction changeantes. En conséquence, la combinaison de ces forces engendre un couple moteur qui provoque la rotation du dispositif. Ces forces sont engendrées par la conjonction de la vitesse intrinsèque de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Cela implique que la rotation du dispositif ne peut pas être initiée de manière autonome. Afin de démarrer, l'éolienne doit être activée par un mécanisme supplémentaire lorsqu'elle est immobile, tel que l'installation d'une éolienne *Savonius* sur le même rotor ou l'utilisation de la génératrice comme moteur.

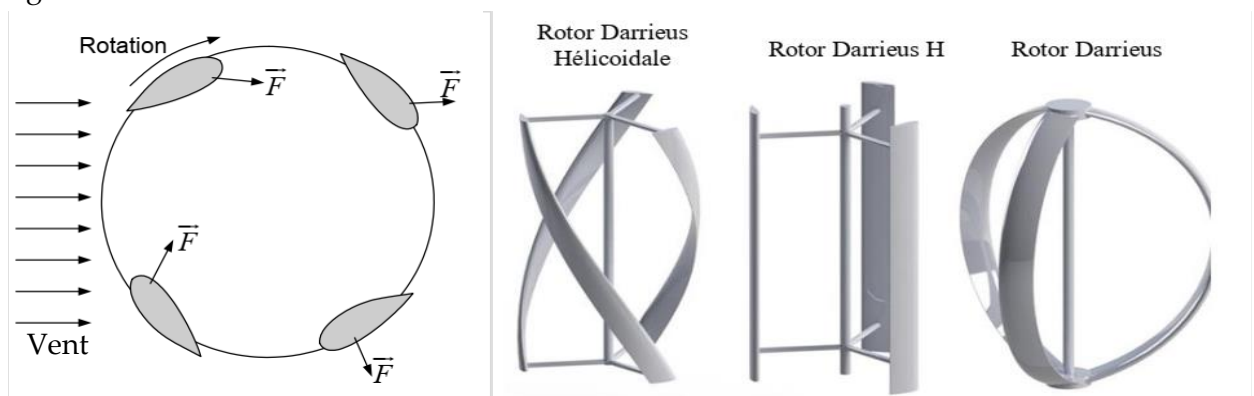


Figure 2-2 : Principe du rotor de *Darrieus* et de l'incidence variable.

Bien que certains grands projets industriels aient été concrétisés, les éoliennes à axe vertical demeurent néanmoins marginales, peu exploitées voire même actuellement délaissées. En effet, la proximité du capteur d'énergie avec le sol le rend vulnérable aux turbulences et au gradient de vent, ce qui diminue sa performance. Elles sont également sujettes à des problèmes d'aéroélasticité en raison des contraintes élevées auxquelles elles sont soumises. En outre, l'emprise au sol revêt une importance considérable pour les puissances élevées.

▪ *Avantages d'une éolienne à axe vertical*

Les principaux avantages des éoliennes à axes verticales sont:

- La conception verticale présente l'avantage de positionner le multiplicateur, la génératrice et les dispositifs de commande directement au niveau du sol ;
 - Simplicité de conception ;
 - L'absence d'un système d'orientation du rotor permet au vent de faire tourner la structure indépendamment de sa direction ;
 - Son design est simple, robuste et demande peu de maintenance ;
 - Le système génère un faible niveau sonore en raison de la rotation à basse vitesse des composantes.
- ### ▪ *Inconvénients d'une éolienne à axe vertical*
- Un faible rendement et des variations significatives de la puissance produite ;
 - Leur performance est inférieure à celle des éoliennes à axe horizontal ;
 - Occupation significative du territoire par les grandes puissances ;
 - La conception verticale de ce modèle d'éolienne nécessite qu'elle soit exposée à des vents de faible intensité, qui sont ralentis par le relief proche du sol ;
 - Le démarrage de l'éolienne n'est pas automatique. Cependant, dans le cas d'une éolienne connectée au réseau, ce problème n'est qu'un inconvénient mineur, car il est envisageable d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant le courant du réseau afin d'amorcer l'éolienne.

I.3.2 Eoliennes à axe horizontal

Une turbine à axe horizontal reste orientée vers le vent, à l'instar des hélices des avions et des éoliennes. Elle est positionnée en haut d'une tour, ce qui lui permet de recueillir une quantité accrue d'énergie éolienne. Il s'agit des éoliennes les plus couramment utilisées à l'heure actuelle en raison de leur rendement très satisfaisant. Elles se trouvent à deux, trois ou à plusieurs pales selon la figure (2-3). Cependant, les configurations les plus fréquentes se composent de trois pales. Une éolienne à axe horizontal se compose d'une hélice positionnée perpendiculairement au vent, installée sur un mât dont les pales sont profilées de manière aérodynamique, similaire à une aile d'avion. Ainsi, il est impératif d'aligner ce genre de turbines en direction du vent. En comparaison avec la turbine à axe vertical, les éoliennes à axe horizontal sont en mesure de générer davantage d'énergie pour une vitesse de vent équivalente, en raison d'un coefficient de puissance plus efficace. De plus, ces solutions présentent un coût réduit et une efficacité accrue en raison de leur élévation à plusieurs dizaines de mètres au-dessus du sol.

La turbine peut être située à l'avant ou à l'arrière de la nacelle : du côté du vent (up wind) ou du côté opposé au vent (down wind). L'un des avantages des dispositifs situés du côté du vent est leur capacité à s'orienter automatiquement en direction du vent. Cela permet, en particulier pour les installations de forte puissance, d'éviter le recours à un système mécanique d'orientation, qui est à la fois complexe, lourd et onéreux. Le principal désavantage réside dans une fatigue plus importante

causée par les oscillations fréquentes résultant des changements de direction du vent. Le procédé "sous le vent ou aval" demeure peu fréquemment employé en comparaison avec le procédé "au vent ou amont". Figure (2-4).



Figure 2-3 : Les éoliennes à axe horizontal.

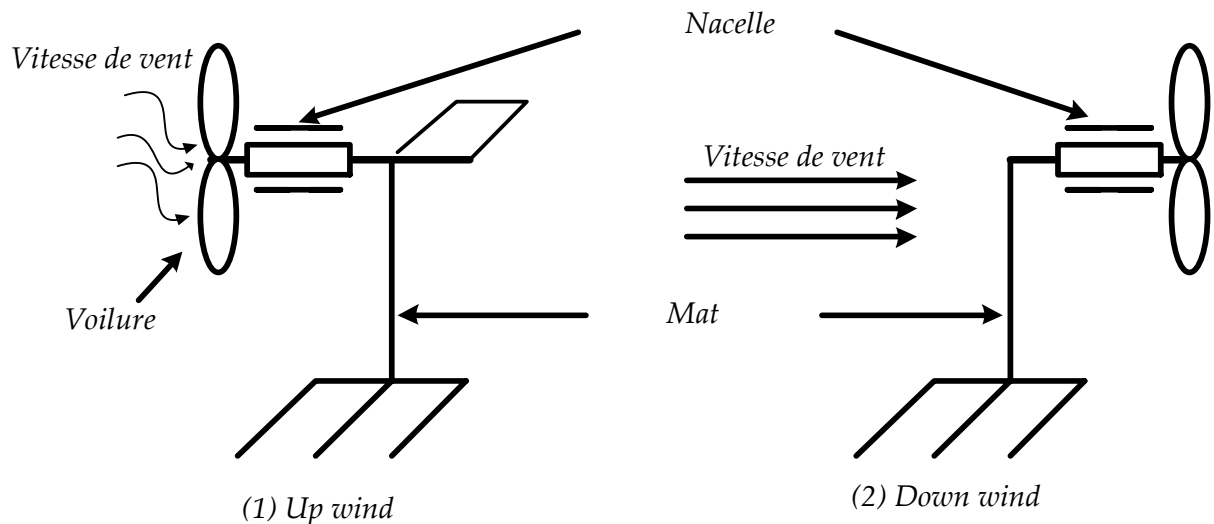


Figure 2-4 : Type de montage d'une voilure à axe horizontal.

Il y a quatre méthodes principales pour contrôler la production d'énergie éolienne en cas de vents forts. La première méthode, connue sous le nom de système à pas variable (*pitch*), est une technique active coûteuse et complexe. Elle est principalement employée sur les systèmes à vitesse variable de puissance moyenne à élevée, généralement de l'ordre de quelques centaines de kilowatts. Il s'agit de régler la position angulaire des pales sur leur axe de manière mécanique, ce qui entraîne un décalage dynamique de la courbe du coefficient de puissance de la voilure.

La deuxième technique, connue sous le nom de "*stall*" est de nature passive et implique la conception des pales de manière à provoquer un décrochage dynamique du flux d'air à des vitesses de vent élevées. Il est également possible de combiner les deux technologies mentionnées précédemment.

Une troisième méthode pour limiter la puissance consiste à dévier l'axe du rotor dans le plan vertical (en basculant la nacelle) ou dans le plan horizontal (en faisant pivoter l'axe du mât). Par

conséquent, la turbine n'est plus alignée avec la direction du vent, ce qui entraîne une réduction de la surface active de l'éolienne.

La dernière catégorie de dispositifs permettant de réguler la puissance éolienne implique la modulation de la vitesse de rotation à travers un mécanisme électrique. Grâce à la génératrice couplée à une chaîne de conversion statique commandée pour réguler le transfert d'énergie, il est possible de contrôler la vitesse de rotation en fonction du point de fonctionnement désiré. Généralement, dans les turbines classiques à axe horizontal, le système de contrôle de la fréquence est souvent combiné à un mécanisme de réglage (*pitch ou stall*).

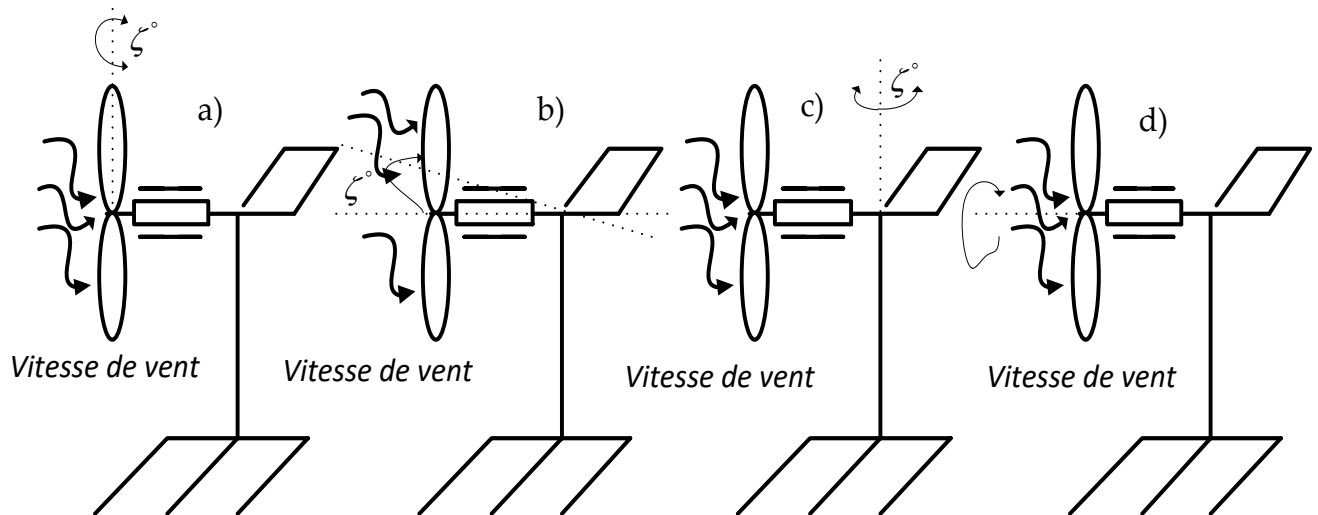


Figure 2-5 : Limitation de puissance éolienne a) pitch, b) déviation verticale de l'axe de rotation, c) rotation horizontale de l'axe de rotation, d) vitesse de rotation continuellement variable.

▪ *Avantages d'une éolienne à axe horizontal*

Les principaux avantages des éoliennes à axe horizontal sont:

- Les éoliennes sont positionnées en hauteur pour capter un vent moins perturbé par le relief terrestre, ce qui favorise une meilleure exploitation de l'énergie éolienne. À dimension d'hélice égale, cette structure permet de générer davantage de puissance que les éoliennes à axe vertical ;
- Une empreinte au sol très réduite par rapport à celle de l'éolienne à axe vertical ;
- Le générateur ainsi que les dispositifs de commande se trouvent dans la nacelle située en haut de la tour. Par conséquent, il n'est pas indispensable d'ajouter une salle dédiée à l'installation de l'équipement ;
- Donc, pas besoin d'ajouter un local pour l'appareillage ;
- Il est envisageable de réguler la vitesse afin d'optimiser la production maximale d'énergie ;
- Elles ne requièrent pas l'utilisation d'un dispositif auxiliaire pour le démarrage ;
- Ces solutions se révèlent efficaces et présentent un rendement satisfaisant.

▪ *Inconvénients d'une éolienne à axe horizontal*

Les principaux inconvénients des éoliennes à axe horizontal sont :

- La complexité de l'intervention pour la maintenance des équipements situés au sommet de la tour ;

- L'impératif d'un dispositif d'orientation des pales ;
- L'équipement est situé en haut de la tour, ce qui entrave l'intervention en cas d'incident.

La plupart des éoliennes en service actuellement sont de conception à axe horizontal. Ces éoliennes peuvent être regroupées en trois catégories en fonction de leur puissance de sortie et de la longueur de leurs pales, comme illustré dans le tableau ci-dessous :

Echelle	Diamètre de l'hélice	Puissance délivrée
Petite	moins de 12 m	Moins de 40 kW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 kW à 1 MW
Grande	46m et plus	1 MW et plus

Tableau 2.1 Classification des turbines éoliennes

II.4 La turbine éolienne

Une éolienne est un équipement qui convertit une fraction de l'énergie cinétique du vent (un fluide en mouvement) en énergie mécanique utilisable sur un arbre de transmission, puis en énergie électrique grâce à une génératrice.

II.4.1 principaux composants des aérogénérateurs a axe horizontal

Une éolienne à grande vitesse se compose principalement de trois éléments : le mât, la génératrice et les pales.

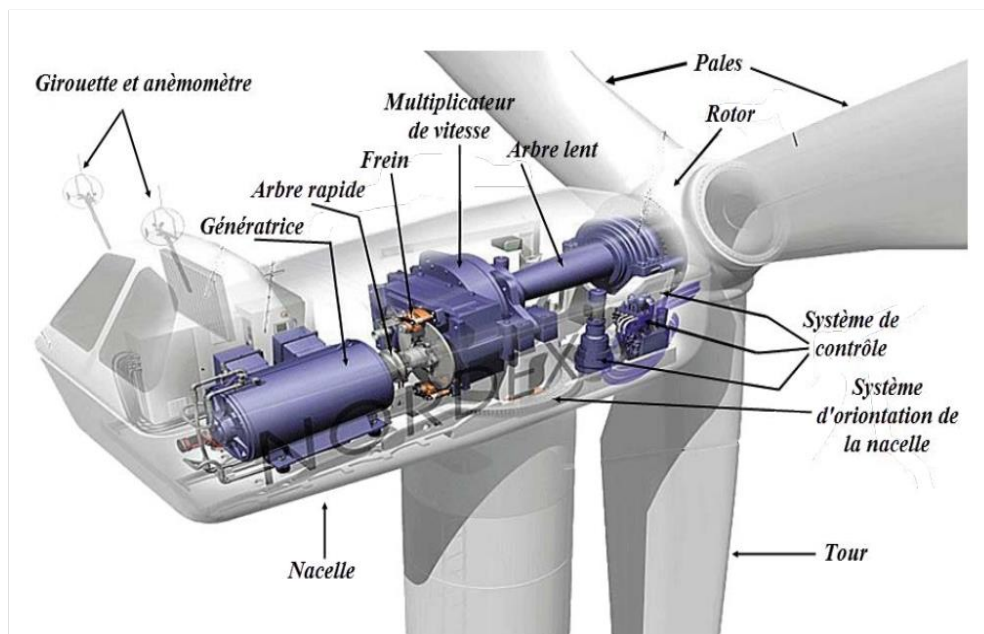
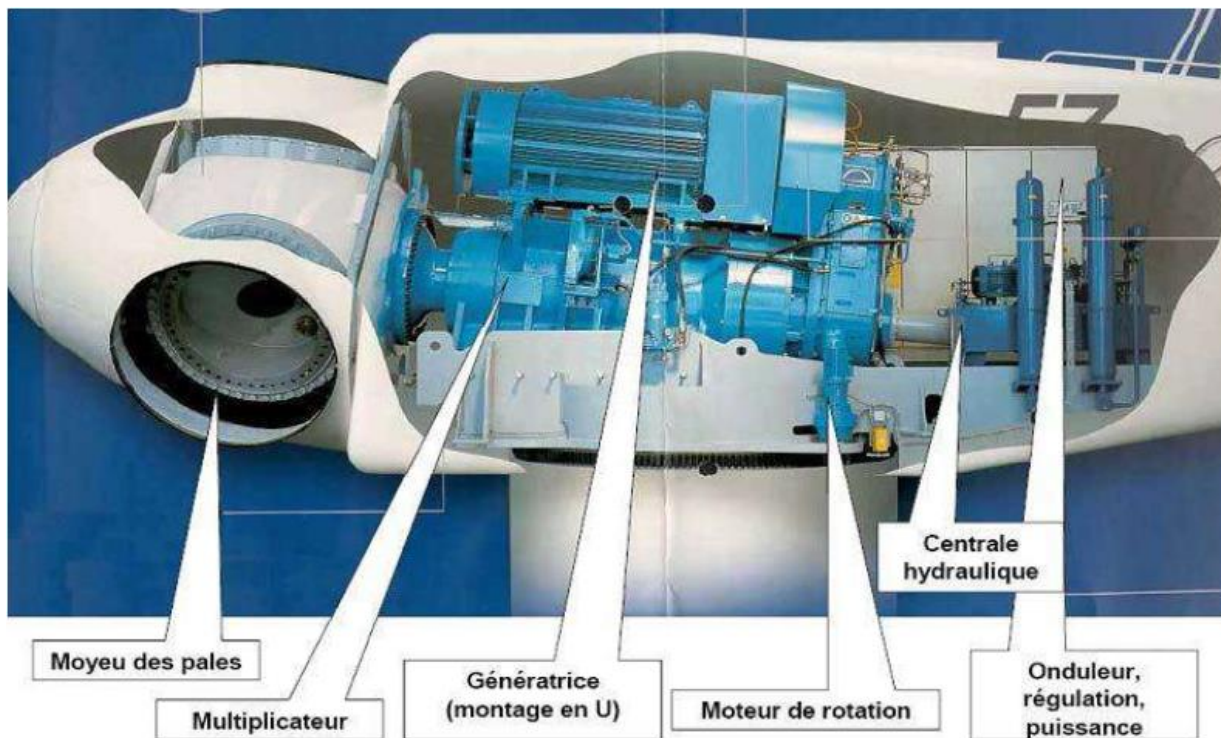


Figure 2-6 : Principaux composants de l'éolienne moderne.

Il est impératif d'analyser en détail chacune de ces composantes et de les modéliser avec précision afin d'améliorer l'efficacité et la fiabilité du système, tout en minimisant les coûts d'investissement.

Le schéma (Figure 2.6) illustre les divers composants d'une éolienne **Nordex N60** à axe horizontal d'une puissance de 1300 kW.



II.4.1.1 Les pales

Ces éoliennes sont soumises directement aux fluctuations du vent, ce qui entraîne leur rotation.

Elle achemine l'énergie cinétique du vent vers le moyeu du rotor. La vitesse peut s'étendre de 8 mètres pour les plus lentes à 30 mètres pour les plus rapides.



Figure 2-7 : Une pale d'un aérogénérateur.

Le contrôle de la puissance extraite des éoliennes s'effectue de deux manières :

- La régulation de la surface exposée au vent est effectuée à l'aide de la méthode du *PITCH*, qui

- implique l'ajustement de l'angle d'exposition des pales à l'écoulement du vent incident ;
- La régulation de cette surface par la technique du STALL implique la modification de l'angle d'incidence de la pale, provoquant ainsi un décrochage aérodynamique et un ralentissement des pales.

II.4.1.2 La tour ou le mât

En règle générale, la tour se présente sous une forme conique ou tubulaire et est équipée d'une échelle intérieure permettant d'accéder à la nacelle pour les opérations d'entretien. La structure de la tour est conçue pour élever le rotor à une altitude adéquate afin de faciliter son mouvement, requis pour les éoliennes à axe horizontal, ou pour le positionner à une hauteur propice à une exposition à des vents plus puissants et constants par rapport au niveau du sol. En règle générale, le mât sert de logement à certains éléments électriques et électroniques tels que le modulateur, la commande, le multiplicateur, le générateur, etc.

II.4.1.3 Le rotor

Il s'agit de la partie rotative d'une éolienne. Il capte l'énergie éolienne et la convertit en énergie mécanique. Il se compose de pales (dont le nombre peut varier) et de l'arbre primaire, leur liaison étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre principal en rotation à basse vitesse est équipé d'un mécanisme permettant le passage de conduites hydrauliques entre la nacelle et le moyeu. Cette installation hydraulique est principalement employée pour réguler le fonctionnement de la machine, notamment en ce qui concerne les pales variables et le freinage du rotor.

II.4.1.4 Le moyeu

Il soutient les pales et assure la liaison entre le rotor et la nacelle. Il ajuste simultanément l'angle d'attaque des pales.



II.4.1.5 La nacelle

La nacelle, installée en haut du mât, renferme les éléments mécaniques, pneumatiques, ainsi que certains composants électriques et électroniques indispensables au bon fonctionnement de la machine. Elle inclut :

- *Le multiplicateur de vitesse*

Le multiplicateur de vitesse est utilisé pour augmenter la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui actionne la génératrice électrique. En réalité, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne serait pas suffisante pour produire de l'électricité de manière

optimale en utilisant des générateurs de courant conventionnels.

- ***L'arbre secondaire***

En général, il est équipé d'un frein mécanique pour immobiliser le rotor pendant les opérations de maintenance et prévenir tout emballement de la machine.

- ***La génératrice***

Elle est responsable de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique.

- ***Contrôleur électronique - girouette – anémomètre***

Le dispositif électronique a pour mission de surveiller le bon fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en réalité d'un système informatique capable de superviser le démarrage de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est adéquate, de contrôler l'angle des pales, de réguler le freinage de l'éolienne et d'ajuster l'orientation du rotor et de la nacelle par rapport au vent. Pour accomplir ces diverses missions, l'opérateur se sert des informations provenant d'un anémomètre (dispositif mesurant la vitesse du vent) et d'une girouette (dispositif indiquant la direction du vent), généralement installés à l'arrière de la nacelle. En outre, le contrôleur est également chargé de la gestion des diverses défaillances susceptibles de se produire.



- ***Divers dispositifs de refroidissement***

Le système de refroidissement des composants internes de la nacelle est assuré par des ventilateurs ou des radiateurs à eau ou à huile.

- ***Le dispositif d'orientation de la nacelle***

Il autorise la rotation de la nacelle située à l'extrémité supérieure de la tour autour de l'axe vertical. Généralement, l'orientation est effectuée à l'aide de moteurs électriques qui actionnent une couronne dentée. Un grand nombre d'éoliennes sont équipées d'un dispositif de verrouillage mécanique permettant de maintenir la nacelle dans une orientation spécifique, facilitant ainsi l'immobilisation de l'éolienne lors des travaux de maintenance.

- ***Le dispositif d'orientation des pales***

Il permet de réguler la portance des pales en fonction de la vitesse du vent afin de maintenir une puissance relativement constante en cas de vent fort (pour les turbines à vitesse variable) ou de maintenir une vitesse de rotation constante indépendamment de la vitesse du vent (pour les turbines à vitesse fixe).

❖ Le fonctionnement d'un aérogénérateur :

L'aérogénérateur exploite l'énergie cinétique du vent afin de mettre en mouvement l'arbre de son rotor. Cette énergie est ensuite convertie en énergie mécanique, laquelle est à son tour transformée en énergie électrique par le biais d'une génératrice électromagnétique connectée à la turbine éolienne.

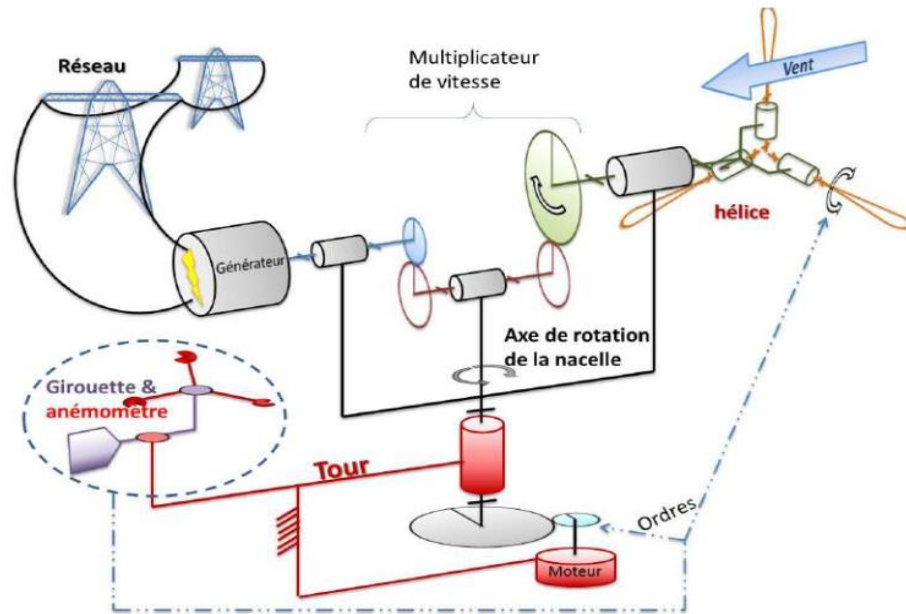


Schéma synoptique du fonctionnement d'un aérogénérateur

II.4.2 Conception des pales

Les éoliennes à axe horizontal sont largement répandues en raison de leur haut rendement. De nos jours, les ingénieurs préfèrent éviter la construction de grandes éoliennes équipées d'un nombre pair de pales, principalement en raison de considérations de stabilité. En cas d'éolienne à structure rigide, des problèmes de stabilité peuvent survenir lorsque le rotor est équipé d'un nombre pair de pales. Lorsque la pale supérieure fléchit légèrement vers l'arrière pour capter la puissance maximale du vent, la pale inférieure traverse la zone d'abri formée juste devant la tour, ce qui peut compromettre la stabilité du système.

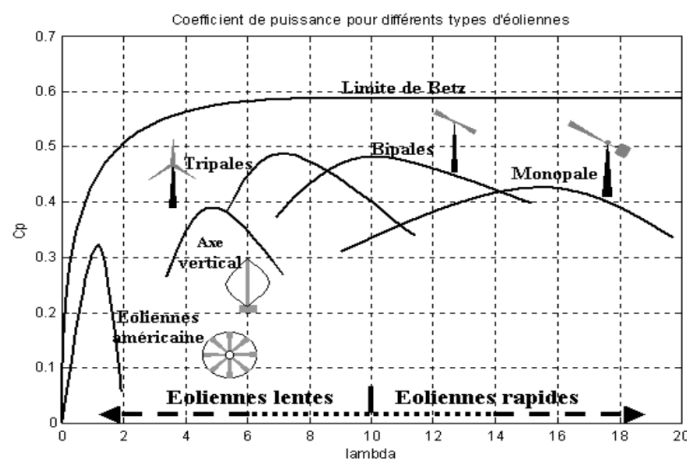


Figure 2-8 : Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes

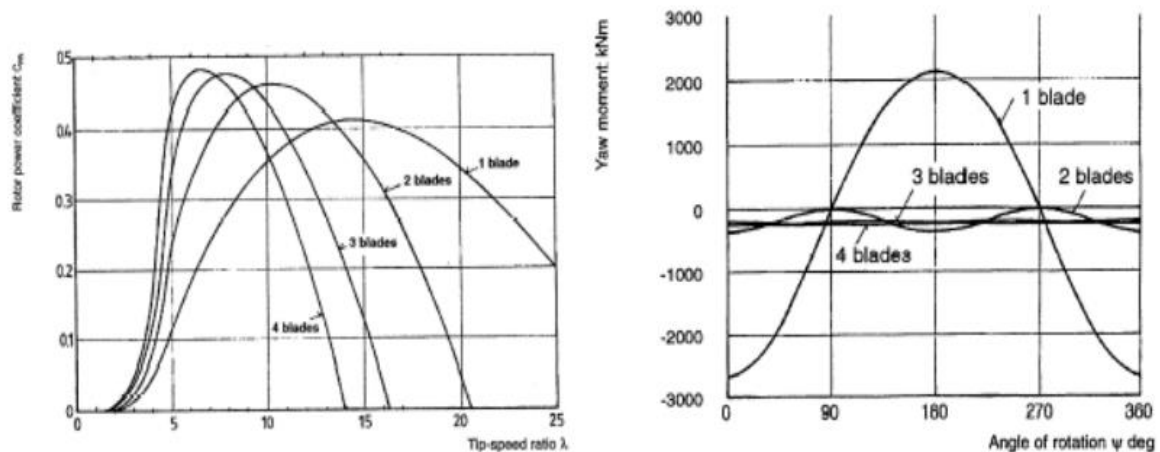


Figure 2-9 : Allure des coefficients de puissance et de couple

Les éoliennes à vitesse réduite sont équipées d'un nombre élevé de pales, généralement entre 20 et 40, et leur grande inertie conduit souvent à une restriction du diamètre à environ 8 mètres. Leurs coefficients de puissance augmentent rapidement pour atteindre leur valeur maximale pendant l'accélération, mais diminuent également rapidement par la suite. Les éoliennes à grande vitesse sont largement utilisées dans la production d'électricité et sont généralement équipées de 1 à 3 pales.

A. Conception tripale

L'utilisation de rotors à trois pales prédomine dans la majorité des machines de moyenne et grande puissance en service ou en cours de construction à l'échelle mondiale, représentant environ 80 % du marché. Cela est dû à leur stabilité dynamique et à leur impact visuel, en plus de leur coefficient de puissance élevé qui diminue progressivement avec l'augmentation de la vitesse.

B. Conception bipale

Les éoliennes bipales présentent divers inconvénients, notamment la nécessité d'une vitesse de rotation plus élevée pour générer la même quantité d'énergie qu'une éolienne tripale. De plus, des vibrations cycliques significatives peuvent survenir lorsque la nacelle tente de s'aligner avec la direction du vent et que les pales sont horizontales. Pour pallier à ce problème, une conception complexe est requise, impliquant l'intégration d'un rotor basculant afin d'atténuer ces chocs.

C. Conception monopale

Les éoliennes à une pale sont relativement peu courantes, les difficultés rencontrées étant encore plus marquées que pour les éoliennes à deux pales. En plus d'une vitesse de rotation accrue et de problèmes de bruit et d'esthétique, un inconvénient associé à ce modèle d'éolienne est la présence d'un couple de torsion significatif exercé sur l'arbre. Afin de contrebalancer le rotor, il sera nécessaire d'installer un balancier du côté du moyeu opposé à la pale.

❖ Matériaux de la pale

La majorité des pales actuelles des éoliennes de grande taille sont conçues à partir de matériaux composites tels que le plastique (polyester ou époxy) renforcé de fibres de verre. L'emploi de fibres de carbone ou d'aramide en tant que matériaux de renforcement représente une alternative supplémentaire. Cependant, de manière générale, une telle option s'avérera onéreuse pour les éoliennes de grande taille.

Les matériaux composites tels que le bois, le bois époxy ou le bois fibres époxy n'ont pas encore été largement adoptés sur le marché des pales, même si des recherches continuent d'être menées sur leur potentiel pour la fabrication de ces dernières. Les alliages constitués d'acier et d'aluminium présentent des problématiques liées à la masse et à la fatigue du matériau, respectivement. Ainsi, ces alliages sont actuellement exclusivement employés pour les pales de petite taille.

II.4.3 Bilan des forces sur une pale

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de pale de largeur dr et de longueur de corde l une distance r de l'axe de rotation une force résultante $d\vec{F}$.

L'influence du vent relatif sur un profil aérodynamique provoque, sur la section de pale de largeur dr et de longueur de corde l , située à une distance r de l'axe de rotation, l'apparition d'une force résultante $d\vec{F}$.

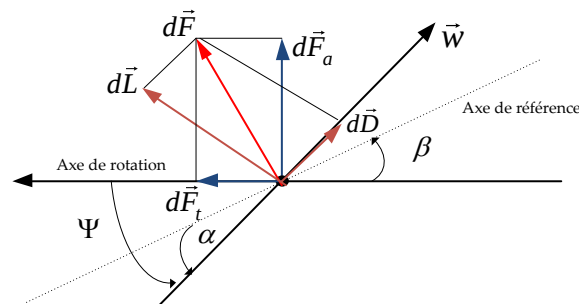


Figure 2-9 : Forces appliquées sur un élément de pale.

On peut décomposer la force résultante $d\vec{F}$ de la manière suivante :

- la portance $d\vec{L}$, normale à la direction du vent apparent ;
- La force de $d\vec{D}$, parallèle à la direction du vent ;

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

- La pousse axiale $d\vec{F}_a$, perpendiculaire au plan de rotation ;
- La pousse tangentielle $d\vec{F}_t$, dans la direction de rotation ;

Les modules des forces dD, dL s'expriment en fonction de deux coefficients, le coefficient de portance

C_L et le coefficient de traînée C_D .

La force de portance :

$$L = \frac{1}{2} \rho w^2 dA C_L$$

La force de traînée :

$$D = \frac{1}{2} \rho w^2 dA C_D$$

La poussée axiale :

$$F_t = \frac{1}{2} \rho w^2 C_z S$$

La poussée de rotation:

$$F_a = \frac{1}{2} \rho w^2 C_x S$$

Avec

$dA = l(r).dr$: Surface du tronçon 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) ;

C_z : Coefficient de portance suivant le plan de rotation

C_x : Coefficient de poussée ;

w : Module du vent apparent.

Ces coefficients C_L et C_D dépendent du profil de la pale et de l'angle d'incidence α . Dans l'analyse du fonctionnement des turbines éoliennes on utilise le diagramme du rapport C_x/C_z en fonction de l'angle d'incidence α . Ce rapport reflète le rendement de conversion de l'énergie éolienne.

Chapitre III

Conversion de l'énergie du vent

- Transformation de l'énergie cinétique en énergie mécanique,
- Vitesse spécifique (TSR), ...
- Coefficient de puissance,
- Limite de Betz.

III.1 Conversion de l'énergie éolienne

III.1.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

La turbine éolienne est un équipement qui convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx , de section S , de masse volumique ρ , se déplaçant à une vitesse v , peut être exprimée comme suit (voir figure III.1) :

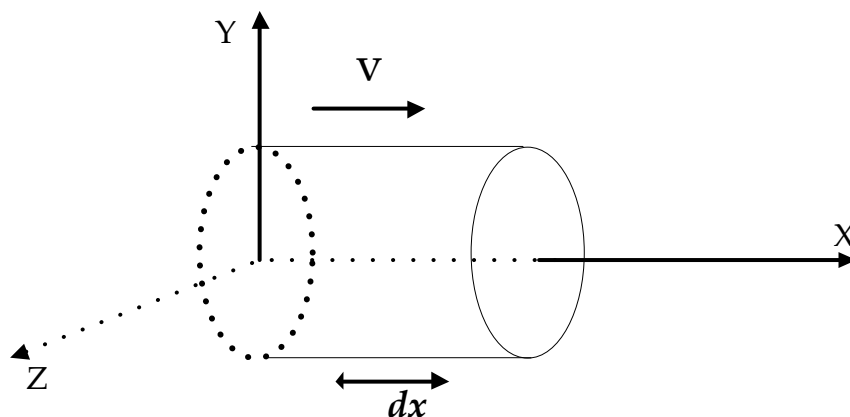


Figure III.1 colonne d'air animée d'une vitesse v

La puissance P_m obtenue à partir du flux d'air en mouvement correspond à la dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps.

En supposant $dx = vdt$, on déduit l'expression de P_{vent}

$$P_{vent} = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \rho S v_{vent}^3$$

ρ : Masse volumique de l'air (en Kg/m³).

v_{vent} : vitesse instantanée du vent (en m/s).

E_c : En joules.

III.2 La vitesse spécifique ou normalisée (Tip-Speed-Ratio)

La vitesse spécifique ou normalisée, notée λ , est définie comme le rapport entre la vitesse linéaire à l'extrémité des pales de la turbine $\Omega_t R_t$ et la vitesse instantanée du vent v_{vent} (voir figure 3-2). Cette grandeur est exprimée par l'équation suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v_{vent}}$$

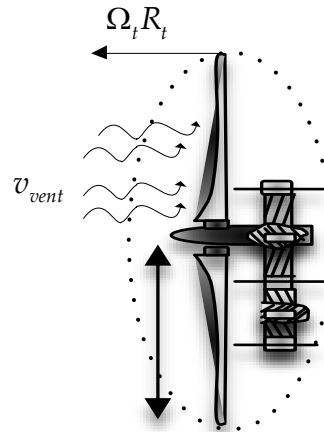


Figure 3-2 : Vitesse de vent v_{vent} et vitesse tangentielle de l'aube $\Omega_t R_t$

R_t : Rayon de la surface balayée en m ;

Ω_t : Vitesse angulaire de rotation des pâles (rad/s).

III.3 Coefficient de puissance

Cependant, il n'est pas possible de capter toute l'énergie, car la vitesse du vent ne retombe pas à zéro après avoir traversé l'éolienne. On présente ainsi un coefficient nommé coefficient C_p de performance ou de puissance, lequel est fonction des propriétés aérodynamiques des pales.

Le coefficient de puissance est défini comme le rapport entre la puissance récupérée du vent et la puissance totale théoriquement disponible.

$$C_p = \frac{P_t}{P_{vent}}$$

Le coefficient C_p est une grandeur variable qui dépend de plusieurs paramètres, tels que la vitesse du vent, la vitesse de rotation de la turbine Ω_t , ainsi que des caractéristiques des pales de la turbine, notamment l'angle d'incidence et l'angle de calage. Il est couramment représenté en fonction du coefficient de vitesse spécifique λ .

III.4 Loi de Betz

Selon la loi de Betz, il est établi qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de 16/27 (soit 59%) de l'énergie cinétique présente dans le vent. C'est l'ingénieur allemand Albert Betz qui, en 1929, énonça pour la première fois ce qui est connu aujourd'hui sous le nom de loi de Betz.

Démonstration de la limite de BETZ

Examinons le système éolien à axe horizontal représenté à la figure 3-3, où la vitesse du vent V_1 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval de l'aérogénérateur ont été représentées graphiquement.

La vitesse du vent en amont V_1 et en aval V_2 de l'aérogénérateur a été reportée sur le système éolien à axe horizontal illustré à la figure 3-3.

L'air est déterminé par sa masse volumique ρ en Kg.m^{-3} , la surface balayée par les pales est S en m^2 .

L'air est généralement modélisé comme un fluide parfait, homogène et incompressible de masse volumique ρ constante.

Le mouvement de l'air est supposé être symétrique de rotation et stationnaire autour de l'axe de rotation de l'hélice.

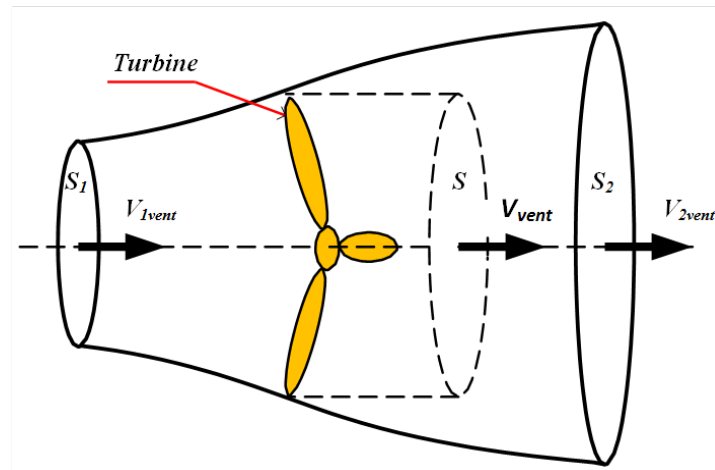


Figure 3-3 : Tube de courant d'air autour d'une éolienne

Energie cinétique :

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2$$

Puissance de l'éolienne :

$$P = \frac{E_{cin}}{dt} = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} v^2 = \frac{1}{2} \rho S \dot{v} v^2$$

Puissance en amont :

$$P_{\text{amont}} = \frac{1}{2} \rho S v_1^3$$

Puissance à l'entrée : En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est équivalente à la moyenne de la vitesse du vent non perturbée à l'avant de l'éolienne v_1 et de la vitesse du vent après avoir traversé le rotor v_2 , représentée par $v_1 + v_2/2$

$$P_1 = \frac{1}{2} \rho S v_1^2 \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} = \frac{1}{2} \rho S \frac{v_1 + v_2}{2} v_1^2$$

Puissance à la sortie :

$$P_2 = \frac{1}{2} \rho S v_2^2 = \frac{1}{2} \rho S \frac{v_1 + v_2}{2} v_2^2$$

Puissance de l'éolienne : La variation d'énergie cinétique par unité de temps de la masse d'air traversant le rotor est donc équivalente à (en remplaçant la densité de l'air par sa valeur moyenne) :

$$P_t = P_1 - P_2 = \frac{1}{4} \rho S (v_1 + v_2)(v_1^2 - v_2^2)$$

On pose $v_2 = x v_1$

$$P(x) = \frac{1}{4} \rho S v_1^3 (1+x)(1-x^2) = \frac{1}{4} \rho S v_1^3 (1-x^2+x-x^3)$$

$P(x)$ Prend sa valeur maximale si $\dot{P}(x) = 0$ donc ; $\begin{cases} x_1 = -1 & \text{rejetée} \\ x = \frac{1}{3} \end{cases}$

$P(x)$ Est maximal pour $x = \frac{1}{3}$ c'est-à-dire pour $v_2 = \frac{1}{3} v_1$

On a alors $P_t = P\left(\frac{1}{3}\right) = \frac{1}{4} \rho S v_1^2 \left(1 + \frac{1}{3}\right)^2 \cdot v_1 \left(1 - \frac{1}{3}\right) = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \cdot \frac{16}{27}$

$$P_t = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \cdot \frac{16}{27}$$

La puissance contenue dans la veine de vent est donnée par :

$$P_{\text{amont}} = \frac{1}{2} \rho S v_1^3 \quad \text{Si } v_2 = 0$$

Le quotient entre P_t et P_{amont} : $\frac{P_{mt}}{P_{\text{amont}}} = \frac{16}{27} = 0.593$

La limite de **Betz**, qui représente la valeur maximale théorique du coefficient de puissance, est de $\frac{16}{27}$

Soit 0.593.

La limite **Betz** n'est jamais atteinte et les dispositifs bipales ou tripales à axe horizontal les plus efficaces se situent à 60-65% de la limite. Au total, seulement 40 % de l'énergie générée par le vent est récupérée. L'efficacité aérodynamique peut être déterminée comme suit :

$$\eta = \frac{16}{27} C_{p \max}$$

$C_{p \max}$ La capacité maximale de production. Le coefficient de puissance C_p atteint sa valeur maximale. Cette valeur est liée à une vitesse spécifique nominale λ_{opt} , pour laquelle la turbine a été conçue en fonction d'une vitesse de vent nominale v_n et d'une vitesse de rotation nominale Ω_{tn} .

III.5 Coefficient de couple

Cependant, il n'est pas possible de capturer toute l'énergie, car la vitesse du vent n'est pas réduite à zéro après avoir traversé l'éolienne. On introduit ainsi un coefficient C_p , également connu sous le nom de coefficient de performance ou de puissance, lequel est fonction des propriétés aérodynamiques des pales. Ce coefficient représente l'efficacité du rotor de l'éolienne. L'expression de la puissance sur l'arbre du rotor, ou puissance aérodynamique P_t au niveau du rotor de la turbine, est la suivante :

$$P_t = C_p P_v = \frac{1}{2} \rho \pi R_t^2 v_1^3 C_p(\lambda, \beta)$$

Le coefficient de couple C_m est étroitement lié au coefficient de puissance C_p . Il est très utile d'évaluer la valeur des couples à divers points de fonctionnement, en particulier lorsque la vitesse de rotation Ω_t est égale à zéro, ce qui entraîne un coefficient de puissance C_p nul pour une valeur non nulle.

D'où l'expression du couple est la suivante :

$$C_t = \frac{P_m}{\Omega_t} = \frac{R_t P_m}{\lambda v} = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} \cdot \frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v_1^2$$

La formule suivante permet de déterminer la valeur du coefficient de couple :

$$C_m = \frac{C_p(\lambda, \beta)}{\lambda} = \frac{C_t}{\frac{1}{2} \rho \pi R_t^3 v_1^2}$$

C_t : Couple de la turbine éolienne.

Le coefficient de puissance C_p , dont le calcul repose sur une approximation empirique pour une éolienne exploitant une génératrice de tel type, est défini de la manière suivante :

$$C_p(\lambda, \beta) = 0.5 \left[116 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) - 0.4\beta - 5 \right] \exp \left[-21 \left(\frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1} \right) \right] + 0.0068\lambda$$

III.6 Courbes caractéristiques des turbines éoliennes

Les caractéristiques fondamentales des turbines éoliennes sont définies par les coefficients de puissance C_p et de couple C_m en relation avec la vitesse spécifique λ .

De manière générale, les turbines sont équipées d'un mécanisme permettant d'ajuster l'angle des pales afin de contrôler la vitesse de rotation. Ainsi, les valeurs des coefficients C_p et C_m varient pour chaque angle d'incidence β , comme illustré dans la figure 3-4.

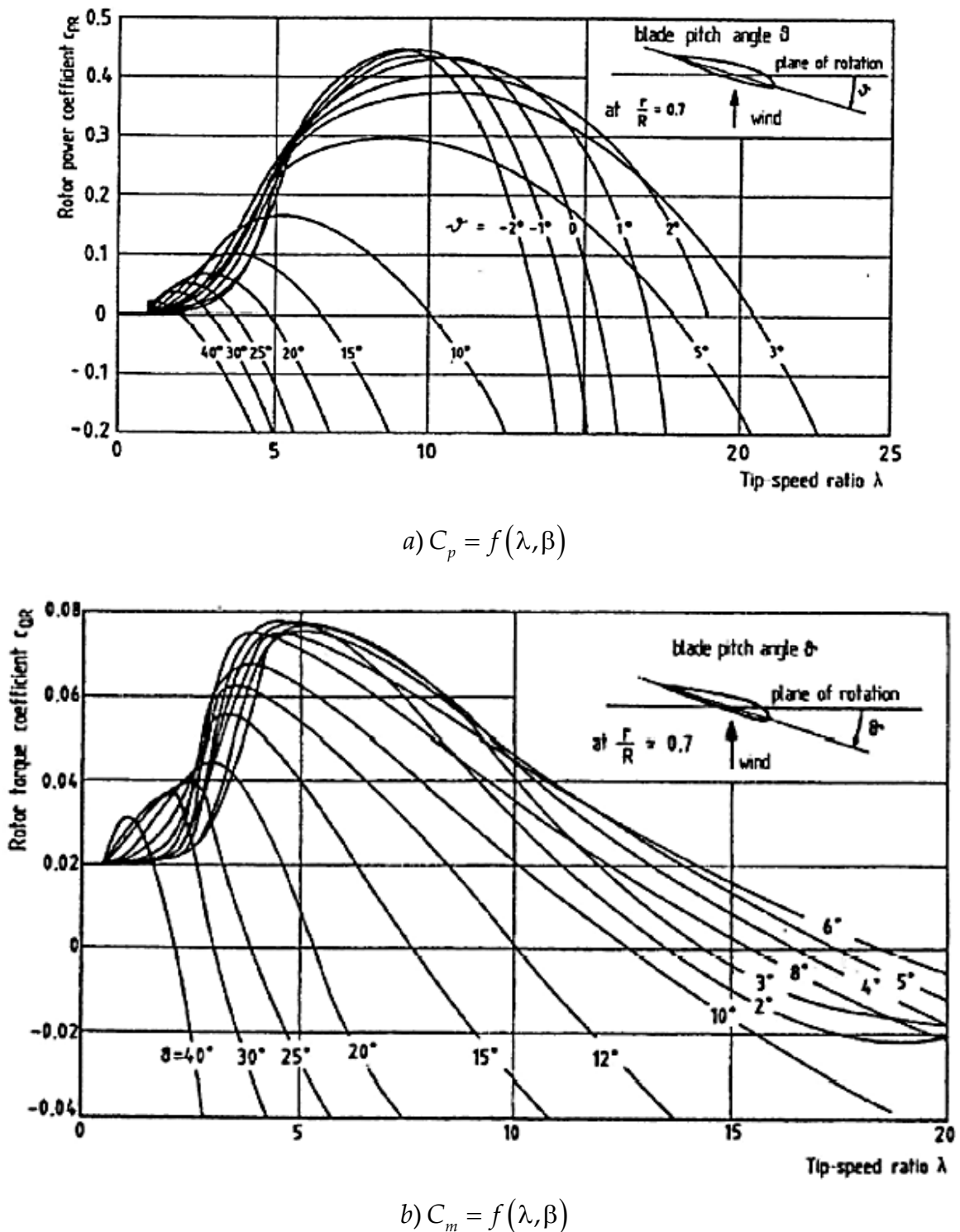


Figure 3-4 : Allures des coefficients C_p et C_m en fonction de la vitesse spécifique λ et l'angle de calage.

III.7 Production d'énergie mécanique

En prenant en considération le rapport du multiplicateur G , et en se basant sur les équations de la vitesse spécifique et de la puissance mécanique, on peut formuler l'expression de la puissance mécanique disponible sur l'arbre du générateur de la manière suivante :

$$P_m = \frac{1}{2} C_p \left(\frac{\Omega_t}{G v_1} \right) \rho \pi R_t^2 v_1^3$$

Cette expression permet de tracer un ensemble de courbes représentant la puissance en fonction de la vitesse de rotation pour diverses vitesses de vent (voir figure 3-5).

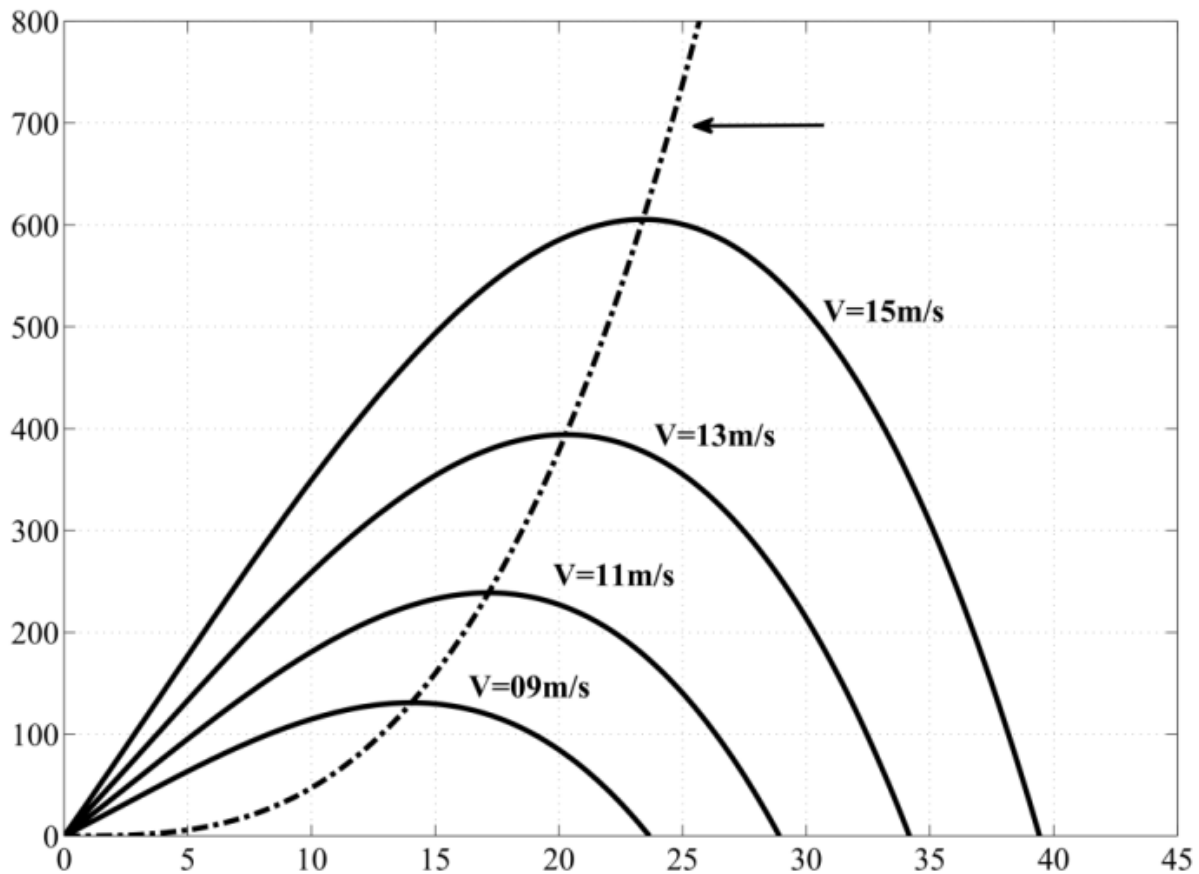


Figure 3-5 : puissance théorique disponible en fonction de la vitesse de vent (Turbine réelle de type Savanius)

En observant la courbe reliant les points de puissance maximale, il est évident que pour maximiser le transfert de puissance à chaque vitesse du vent, il sera nécessaire que l'éolienne puisse opérer à des vitesses variables.

III.8 Caractéristique d'une éolienne en fonction de la vitesse du vent

Il convient de souligner que les éoliennes ne peuvent pas être exploitées à des vitesses de vent faibles. Le démarrage de la rotation de l'éolienne se produit à partir d'une vitesse minimale appelée "vitesse seuil" (3 à 5 m/s), et dès que la vitesse maximale est atteinte, l'éolienne doit s'arrêter. La vitesse maximale est d'environ 25 m/s pour les petites éoliennes et de 30 m/s pour les autres. La puissance de la turbine est proportionnelle à la puissance aérodynamique $P_{vent} \approx k \cdot v_{vent}^3$, avec un coefficient multiplicatif. Cette

relation implique une augmentation cubique de la vitesse du vent jusqu'à ce que la puissance nominale soit atteinte, après quoi elle demeure constante.

La Figure 3-6 illustre l'évolution de la puissance aérodynamique et de la puissance de la turbine en fonction de la vitesse du vent.

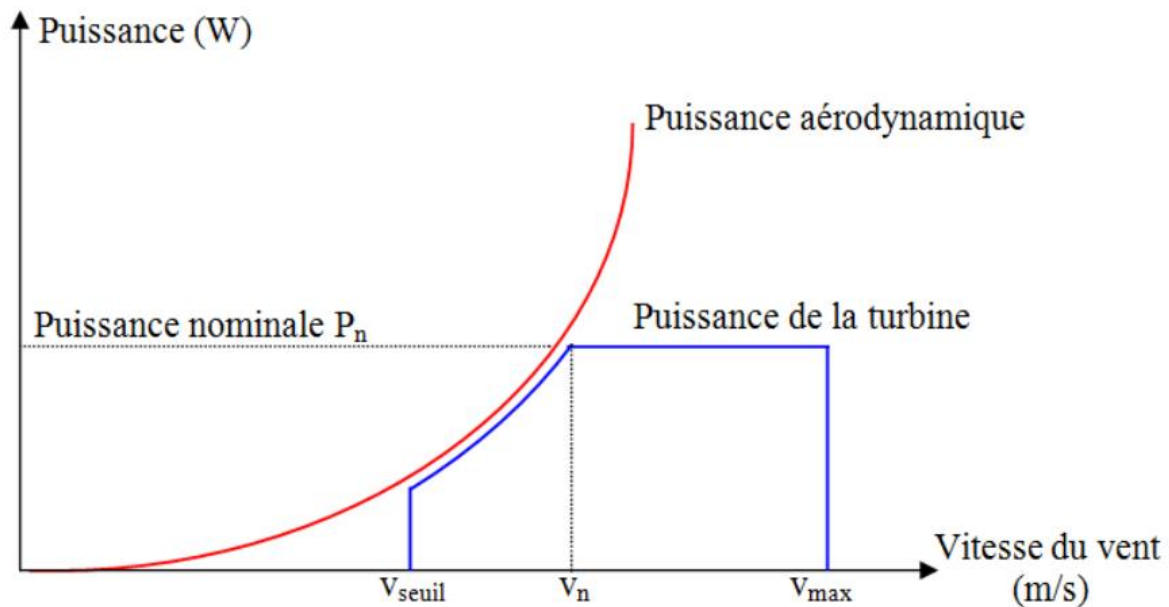


Figure III.6 : La courbe idéale de la puissance de la turbine éolienne

Une éolienne est spécifiquement conçue pour produire une puissance nominale P_n sur son arbre. La puissance P_n est calculée à partir de la vitesse du vent v_n , appelée vitesse nominale. Lorsque les vitesses du vent dépassent la vitesse nominale v_n , il est impératif de dissiper l'excès d'énergie éolienne pour prévenir tout dommage à la turbine, garantissant ainsi le maintien de sa vitesse de rotation quasi constante.

A côté de la vitesse nominale v_n , on spécifie aussi :

- La vitesse de démarrage ou la vitesse seuil, v_{seuil} , à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.
- La vitesse maximale du vent, v_{max} , pour laquelle la turbine ne convertit plus l'énergie, pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

Chapitre IV

Modélisation et simulation du système mécanique de l'éolien

- Conversion électrodynamique,
- Modèle de la turbine,
- Caractéristique de puissance,
- Techniques d'extraction de maximum de puissance avec et sans asservissement de la vitesse,
- Limitation de puissance dans la zone de survitesse (Pitch contrôle).

IV.1 Conversion de l'énergie éolienne

IV.1.1 Conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique

Le système de conversion de l'énergie éolienne est complexe en raison de la présence de nombreux domaines, notamment aérodynamique, mécanique et électrique. En outre, la puissance mécanique est déterminée par des facteurs tels que la taille et la forme de l'éolienne, ainsi que la vitesse du vent.

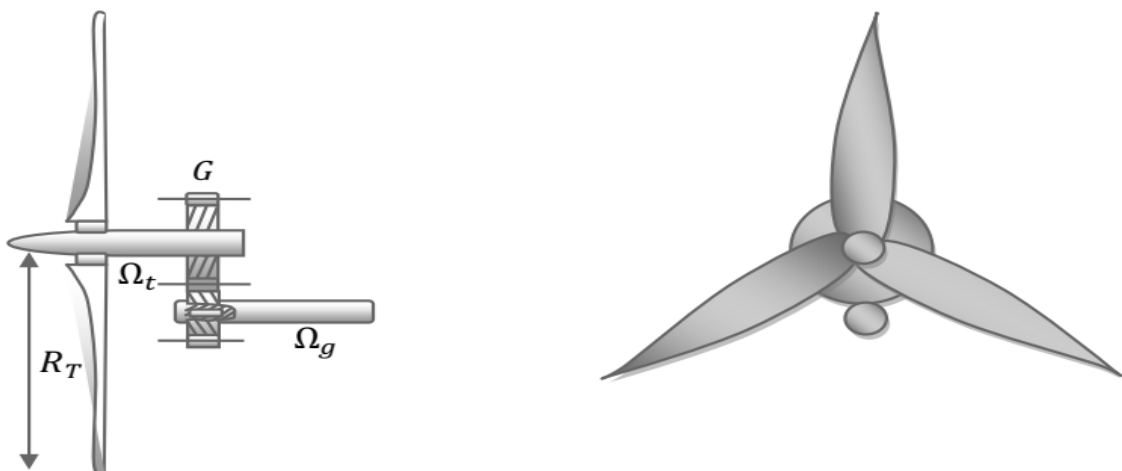


Figure 4-1 : Schéma de la turbine éolienne.

La turbine convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Elle est composée de trois pales identiques d'une longueur de R_t qui sont reliées à un arbre d'entraînement relié à un multiplicateur de vitesse avec un rapport de réduction de G . Le moteur de la génératrice électrique est ensuite entraîné par ce multiplicateur (figure 4-1).

Le comportement de la turbine peut être compris en utilisant un modèle dynamique qui intègre tous ces paramètres. L'utilisation de la modélisation est devenue essentielle pour réguler cette performance et atteindre les caractéristiques opérationnelles prévues.

Le système mécanique de l'éolienne est composé de quatre éléments, comme le montre la figure (4-2).

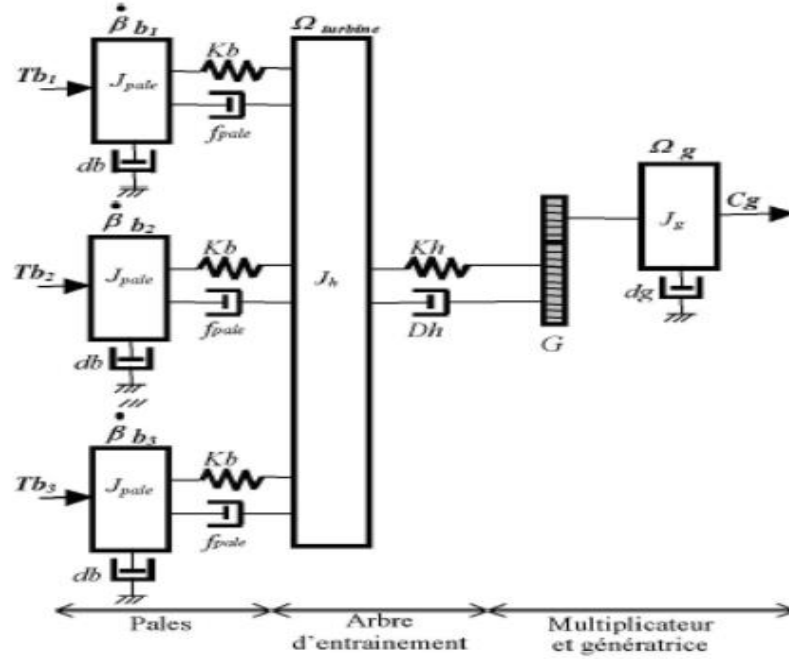


Figure 4-2 : Représentation du système éolien

1. Trois pales de conception identique, avec les mêmes paramètres, notamment l'inertie J_{pale} , l'élasticité K_b et le coefficient de frottement db . Toutes ces pales sont orientables et possèdent le même coefficient de frottement par rapport au support à f_{pale} . Les vitesses d'orientation de chaque pale sont représentées par les nombres $\dot{\beta}b_1, \dot{\beta}b_2, \dot{\beta}b_3$. Les forces Tb_1, Tb_2, Tb_3 sont appliquées à chaque pale en fonction de la vitesse du vent.
2. L'arbre d'entraînement des pales est caractérisé par :
 - son inertie J_h
 - son élasticité K_h
 - son coefficient de frottement par rapport au multiplicateur D_h
3. le multiplicateur de vitesse, de gain G .
4. Le rotor de la génératrice possède :
 - une inertie J_g
 - un coefficient de frottement d_g

Ce rotor transmet un couple C_g à la génératrice électrique et tourne à une vitesse Ω_{mec}

Le modèle de masse équivalente de cette chaîne se compose de trois masses :

- La masse importante du rotor de l'éolienne, qui représente 90 % du moment d'inertie total.
- La masse du multiplicateur, qui représente 2 à 4 % du moment d'inertie total.
- La masse du générateur représente environ 6 à 8 % du moment d'inertie total.

IV.2 Hypothèses utilisées pour simplifier la modélisation mécanique de la turbine

Les modèles les plus fréquemment rencontrés dans les études électromécaniques sont relativement simples et respectent les hypothèses simplificatrices suivantes :

- On considère que les trois pales, chacune d'une longueur de R_t , sont identiques et ont une masse unique avec une inertie J_t de un.
- La vitesse du vent est supposée avoir une distribution homogène sur toutes les pales, ce qui nous permet de considérer toutes les pales comme un système mécanique unique représenté par la somme de tous les systèmes mécaniques.
- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable par rapport à celle du rotor de la turbine et de la génératrice. Par conséquent, il peut être considéré comme un gain de couple égal à $1/G$ ou un gain de vitesse égal à G .
- Le coefficient de frottement des pales avec l'air (db) est négligeable et peut être ignoré.
- Les arbres de transmission à la fois lents et rapides sont totalement inflexibles.
- Par rapport aux pertes par frottement du côté du générateur, les pertes par frottement du rotor de la turbine sont considérées comme négligeables.

Le modèle mécanique de la turbine éolienne on peut représenter par la figure (figure 4-3).

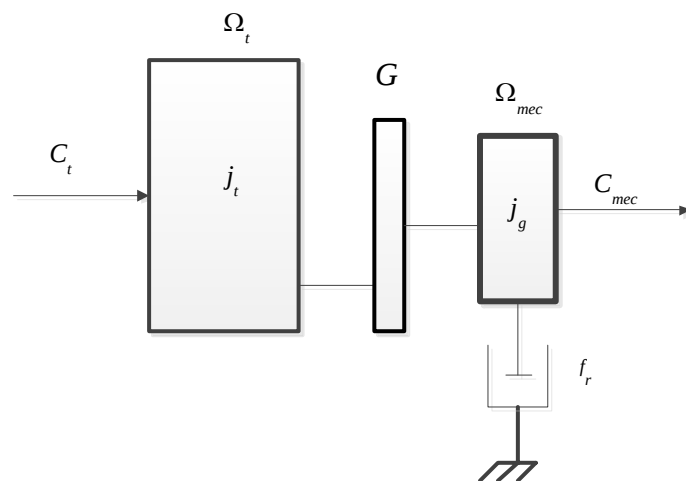


Figure (4-3) : Modèle mécanique de la turbine éolienne.

IV.3 Modèle de la turbine

Les paramètres d'entrée et de sortie de l'éolienne peuvent être synthétisés de la manière suivante :

1. La vitesse du vent est responsable de l'énergie initiale à l'entrée de la turbine.
2. Les quantités spécifiques de la machine dépendent principalement de la géométrie du rotor et

de la surface balayée par les pales de la turbine.

3. Les paramètres à prendre en compte sont la vitesse de rotation de la turbine, l'angle d'inclinaison des pales et l'angle de calage.

Les sorties de la turbine se réfèrent à la puissance ou au couple, des paramètres qui peuvent être ajustés en modifiant les entrées correspondantes.

IV.4 Modèle du multiplicateur

En générale, la turbine éolienne fonctionne à une vitesse nominale comprise entre 25 et 40 (tr/mn). Le multiplicateur convertit la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique de la turbine en couple d'entraînement de la génératrice, comme indiqué par les expressions suivantes :

$$G = \frac{C_t}{C_{mec}}$$

Et

$$G = \frac{\Omega_{mec}}{\Omega_t}$$

Avec :

C_{mec} : Couple mécanique sur l'arbre de la génératrice ;

Ω_{mec} : Vitesse de rotation (mécanique) de la génératrice [rad/s] ;

C_t : Couple de la turbine (aérodynamique) [rad/s] ;

Ω_t : Vitesse de la turbine [rad/s].

IV.5 Equation dynamique de l'arbre de transmission

En utilisant l'équation fondamentale de la dynamique, il est possible de calculer l'évolution de la vitesse mécanique en utilisant le couple mécanique total C_{mec} appliqué au rotor.

$$j \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} = C_t - C_{mec}$$

j : L'inertie globale ramenée à l'arbre de la génératrice, incluant l'inertie de la turbine, de la génératrice, des deux arbres et du multiplicateur.

f : Le coefficient de frottement total du couplage mécanique.

De cette représentation simplifiée, on déduit le couple mécanique qui est la somme de tous les couples appliqués sur le rotor :

$$C_{mec} = C_g - C_{em} - C_f$$

C_{em} : Le couple électromagnétique produit par la génératrice ;

C_g : Le couple issu du multiplicateur.

C_f : Le couple résistant dû aux frottements est modélisé par un coefficient de frottements visqueux

f_{mec} tel que : $C_f = f_{mec} \Omega_{mec}$

Ainsi, l'arbre de transmission utilise deux variables d'entrée : le couple obtenu par le multiplicateur C_g et le couple électromagnétique C_{em} .

On peut représenter l'organigramme de simulation de la turbine de la manière suivante :

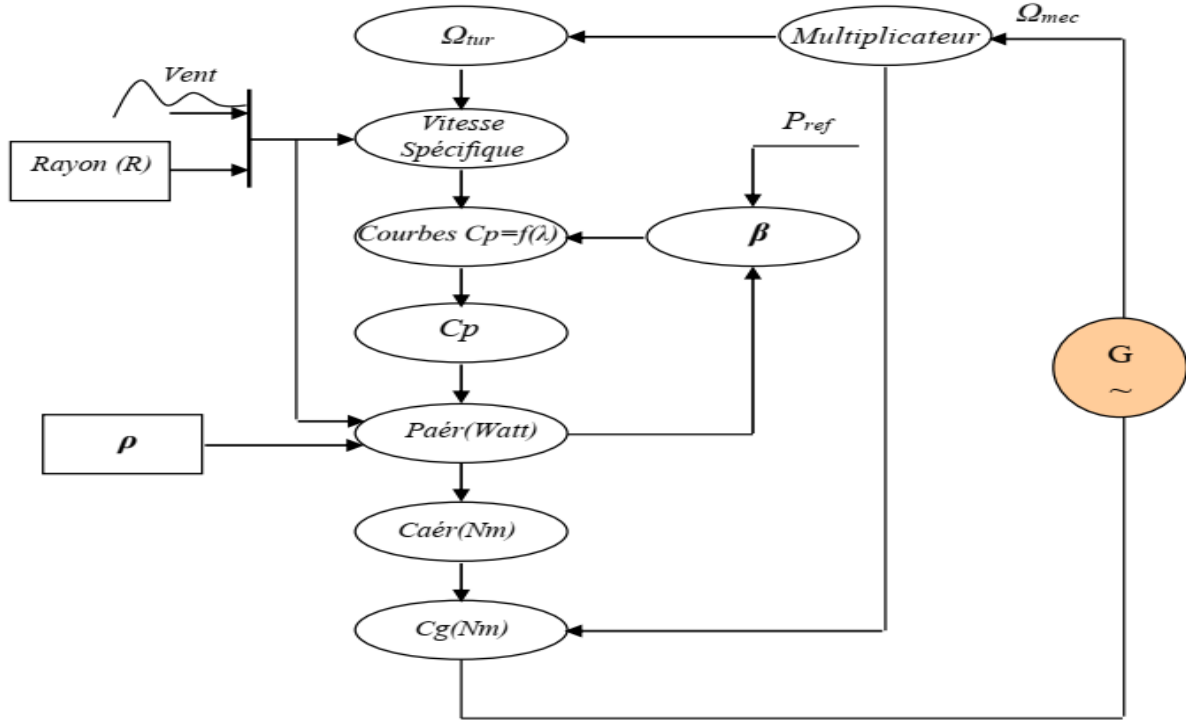


Figure 4-4 : organigramme de simulation de la turbine éolienne

Le schéma bloc illustré dans la figure (4-5) représente les modèles aérodynamique et mécanique de la turbine éolienne. Ce schéma bloc illustre que la vitesse de rotation Ω_{mec} de la génératrice, et donc de la turbine, peut être régulée en agissant soit sur l'angle de calage des pales β , soit sur le couple électromagnétique C_{em} du générateur. La vitesse du vent v_w est perçue comme une perturbation entrant dans le système.

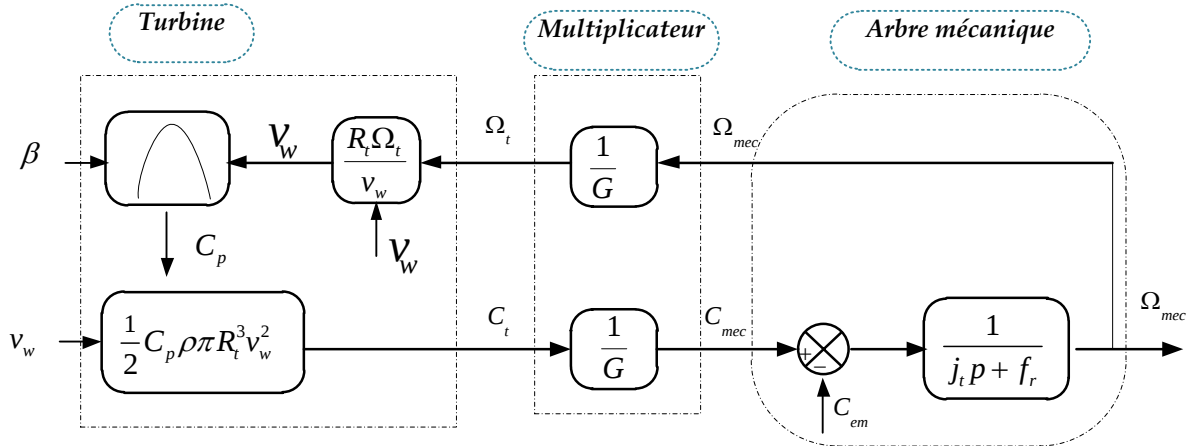


Figure (4-5) : Modélisation de la partie mécanique de l'éolienne.

IV.6 Techniques de commandes de la turbine éolienne

Deux méthodes de contrôle seront mises en œuvre :

- Une des méthodes vise à optimiser la capture de puissance lorsque la vitesse du vent est insuffisante pour atteindre le niveau de puissance nominale de la turbine.
- l'autre afin de restreindre la puissance générée à une valeur équivalente à la puissance nominale lors des vents à forte vitesse.

IV.6.1 Caractéristique de puissance

Dans le domaine de la production d'énergie éolienne, chaque turbine est habituellement représentée par une courbe qui représente la puissance convertie en fonction de la vitesse et qui représente les différentes zones de fonctionnement afin de satisfaire aux commandes.

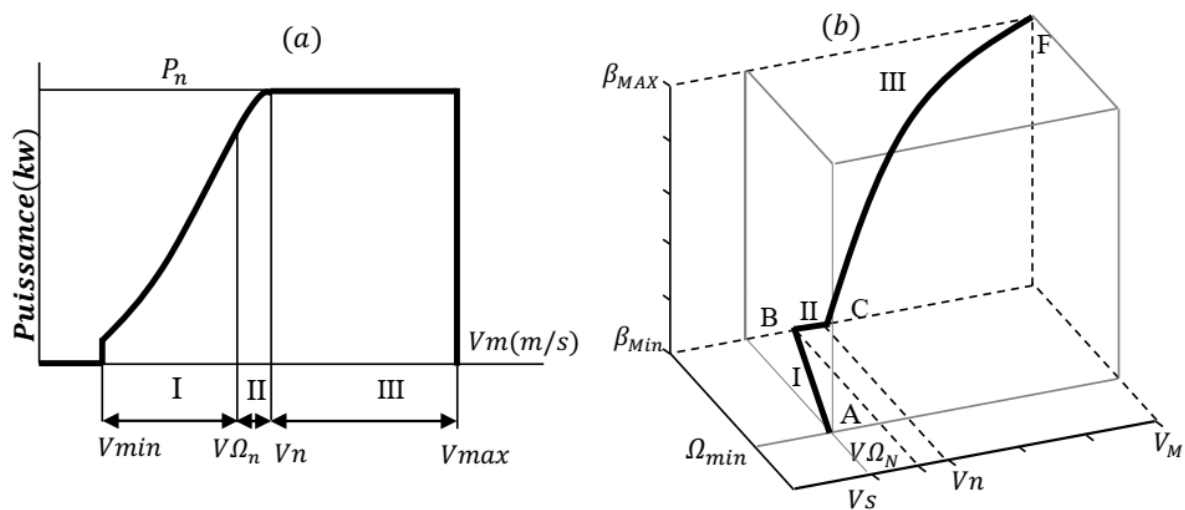


Figure 4-6 : caractéristique idéale d'une éolienne à vitesse variable.

(a). dans le plan (V, P) (b). Dans le plan (V, Ω, β)

Dans notre situation, la courbe de la figure (II-8) illustre la caractéristique de la turbine, qui représente trois zones de fonctionnement pour trois vitesses différentes nécessitant des commandes différentes.

- **Zone I :** correspond aux vitesses de vent faibles. La puissance disponible dans cette zone est moindre que la puissance nominale de la turbine. Le but dans cette zone est de maximiser l'exploitation de l'énergie éolienne en utilisant les techniques de contrôle connues sous le nom de *Maximum Power Point Tracking* (suivi du point de puissance maximale).
- **Zone II :** constitue une zone intermédiaire située entre la **Zone I**, où la charge est partielle, et la **Zone III**, où la charge est nominale. Dans cette région, la vitesse de rotation demeure constante en raison de contraintes mécaniques (liées aux pales) et acoustiques (liées aux bruits produits), ce qui dispense de toute intervention de commande.
- **Zone III :** correspond aux vents à forte vitesse. Dans cette zone, l'objectif est de restreindre et de maintenir la vitesse de la turbine à une vitesse qui garantit une puissance équivalente à la puissance nominale de l'éolienne, afin d'éviter les surcharges. On effectue la commande nécessaire en agissant sur l'angle de calage des pales (*Pitch Control*).

IV.6.2 Système de contrôle de l'aéroturbine

Deux boucles de régulation, fortement liées, assurent le contrôle de l'aéroturbine :

1. Boucle de contrôle de la vitesse ;
2. Boucle de contrôle de la puissance.

Dans la stratégie d'optimisation de la puissance, la première boucle joue un rôle essentiel en contrôlant la vitesse de rotation grâce au couple électromagnétique. Les deux boucles de régulation sont utilisées dans la stratégie de limitation de puissance.

Lorsque la vitesse du vent est plus faible que la vitesse nominale, l'angle de calage est maintenu constant à une valeur optimale β_{opt} , tandis que la vitesse de rotation est réglée par la boucle de régulation de vitesse afin d'extraire le maximum de la puissance du vent. La vitesse de rotation augmentera lors d'une rafale de vent et peut dépasser la vitesse nominale en raison de la lenteur du système d'orientation des pales, qui a une dynamique plus lente que celle de la machine. Dans cette situation, la boucle de vitesse réagit en augmentant la puissance de référence de la génératrice et prépare l'action du dispositif d'orientation des pales en ajustant le couple électromagnétique afin de réguler la vitesse de rotation dans la zone 3.

IV.6.3 Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La puissance optimale d'une éolienne présente une caractéristique très non linéaire et en forme de "cloche". Le système doit trouver la puissance maximale à chaque vitesse de vent, ce qui correspond à la recherche de la vitesse de rotation optimale.

Le diagramme de la figure (4-7) présente les courbes caractéristiques de l'éolienne dans le domaine de la puissance et de la vitesse de rotation de la turbine. Chaque courbe en pointillé représente une vitesse de vent V_v spécifique.

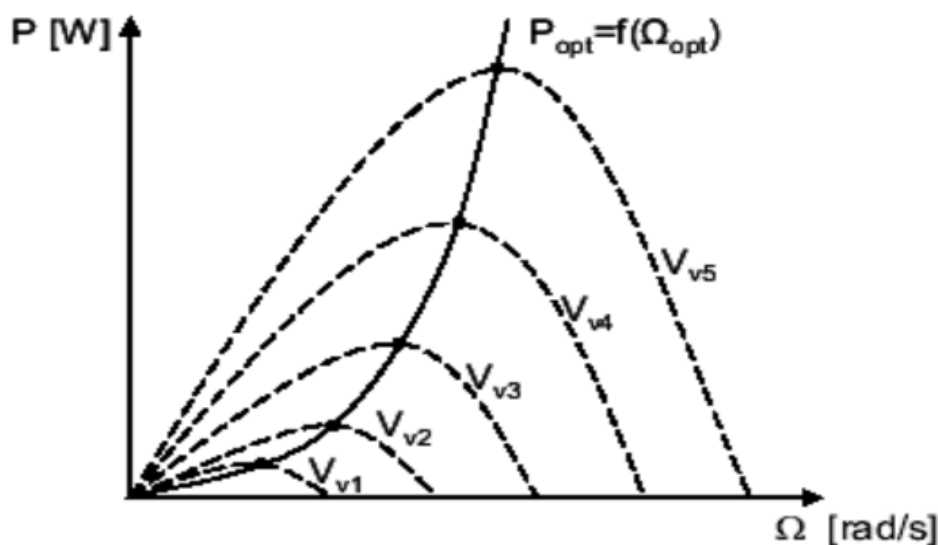


Figure 4-7 : caractéristiques de l'éolienne dans le plan puissance, vitesse de rotation

Tous les points présentant ces caractéristiques, qui représentent les sommets recherchés, déterminent

une courbe appelée courbe de puissance optimale définie par l'équation : $P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3$

Un bon fonctionnement du système éolien requiert une surveillance rigoureuse de cette courbe. Afin d'atteindre cet objectif, il est recommandé d'utiliser une commande particulière appelée Maximum Power Point Tracking (**MPPT**) dans la zone 2. La stratégie opérationnelle de cette directive vise à superviser le couple électromagnétique pour ajuster la vitesse mécanique de façon à optimiser la production de puissance électrique. Il existe deux approches distinctes qui peuvent être envisagées :

1. La première méthode, la plus traditionnelle, estime que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ n'est pas connue.
2. La deuxième méthode, qui reçoit davantage de réponses, suppose que la caractéristique $C_p = f(\lambda)$ est déterminée. Il vous suffit de suivre la courbe de puissance optimale afin de maintenir l'éolienne dans les conditions optimales.

IV.6.3.1 MPPT avec la connaissance de la courbe caractéristique de la turbine éolienne

Le constructeur de l'éolienne doit effectuer des essais de caractérisation (soufflerie) ou des simulations du profil des pales pour cette méthode de procédés. Une telle description permet de rendre l'algorithme de recherche de puissance maximale beaucoup plus simple et d'utiliser des convertisseurs plus simples et moins onéreux.

A. Asservissement de la vitesse pour maximiser la puissance.

Les variations imprévisibles du vent entraînent des perturbations dans le fonctionnement du système de conversion éolienne, ce qui se traduit par des fluctuations constantes de la puissance produite. Ainsi, il est présumé que le couple électromagnétique produit par l'appareil est équivalent à sa valeur de référence, indépendamment de la puissance produite.

$$C_{em} = C_{em-ref}$$

D'après l'équation fondamentale de la dynamique, qui permet de calculer la variation de la vitesse mécanique en fonction du couple mécanique total appliqué au rotor, il est possible d'ajuster cette vitesse à une valeur de référence. Cela est réalisé en mettant en œuvre un asservissement approprié de la vitesse afin d'obtenir un couple électromagnétique de référence.

C_{ass} : Régulateur de vitesse

Ω_{ref} : vitesse de référence

D'après l'équation du couple électromagnétique, la vitesse angulaire de la turbine est donnée par :

$$\Omega_{turbine} = \frac{\lambda v_v}{R_t}$$

La valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{opt} est la vitesse de référence de la turbine, et le coefficient

de puissance maximale $C_{p-\max}$ peut être déduit de l'équation précédente :

$$\Omega_t^{ref} = \frac{\lambda_{opt} V_v}{R_t}$$

L'utilisation exclusive d'un seul anémomètre sur l'éolienne entraîne l'utilisation d'une mesure locale de la vitesse du vent qui ne reflète pas la valeur moyenne de la vitesse du vent rencontrée sur les pales. Par conséquent, une estimation inexacte de la vitesse du vent entraîne une diminution de la puissance générée. C'est pourquoi la majorité des turbines éoliennes installées fonctionnent sans régulation de la vitesse de rotation.

- *Conception du correcteur de vitesse*

Le correcteur de vitesse représente la composante "intelligente" du système de contrôle utilisé dans cette approche de maximisation de la puissance, et sa sélection appropriée contribue aux performances de ce système de contrôle.

Il est tenu d'assurer la réalisation des deux fonctions suivantes:

1. Régler la vitesse mécanique sur sa valeur de référence.
2. Réduire l'effet du couple aérodynamique généré par une perturbation à l'entrée.

Dans l'élaboration du modèle, deux régulateurs ont été employés : un régulateur Proportionnel Intégral (**PI**) avec anticipation, et un régulateur Proportionnel Intégral avec avance de phase.

La figure (4-8) illustre le schéma bloc du modèle de la turbine.

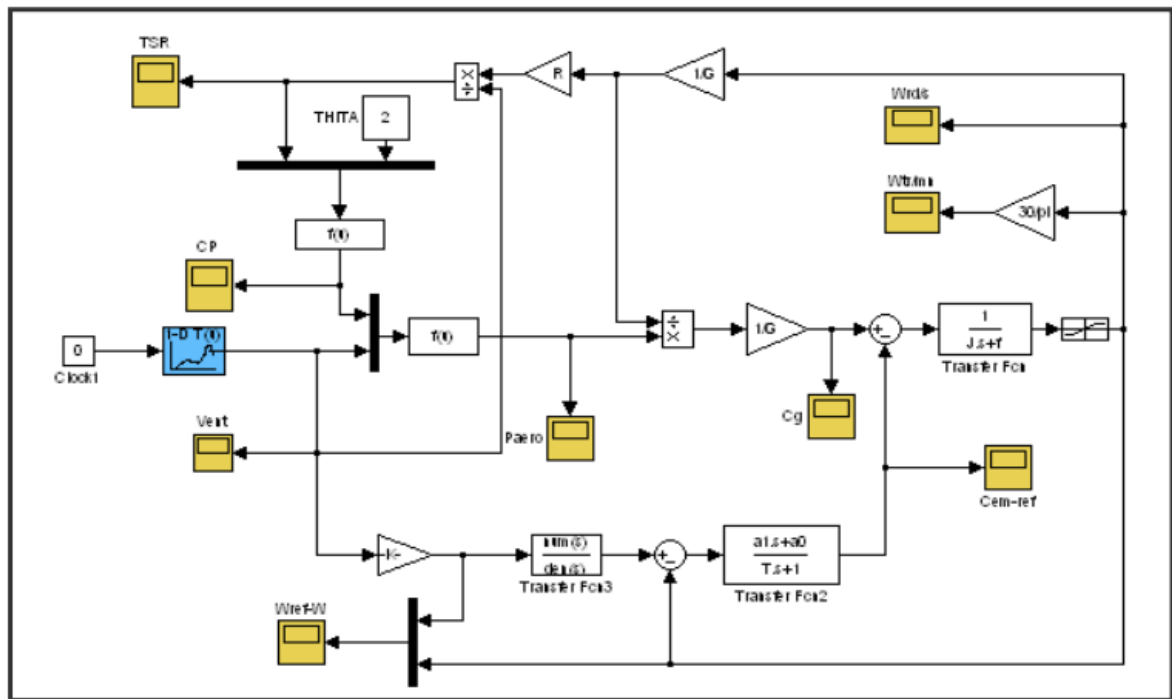


Figure IV-8 : Schéma bloc de la maximisation de puissance avec asservissement de vitesse, « A avance de phase »

B. Maximisation de la puissance sans asservissement de vitesse

Puisque la méthode de maximisation de puissance précédente repose sur une connaissance précise de la vitesse du vent, le réglage de la vitesse de rotation de la turbine est relativement complexe et entraîne une détérioration des puissances captées en raison de mesures erronées de cette vitesse-là. L'utilisation du contrôle des éoliennes sans limitation de vitesse est devenue indispensable pour la majorité des fabricants.

Cette approche repose sur l'idée que la vitesse du vent, et donc la vitesse de rotation de la turbine, peuvent fluctuer considérablement en régime permanent. Cela nous amène à conclure :

- On considère que le couple mécanique exercé sur l'arbre est nul. $C_{mec} = 0$
- Le couple de résistance dû aux frottements peut être ignoré. $C_f \approx 0$

L'équation statique décrit donc le comportement dynamique de la turbine :

$$C_{mec} = C_g - C_{mec} - C_f = C_g - C_{mec} = 0$$

L'équation de couple donne :

$$C_{mec} = C_g = \frac{C_{aér}}{G}$$

Le couple de référence électromagnétique est calculé en se basant sur une estimation du couple aérodynamique :

$$C_{mec-ref} = \frac{C_{aér-est}}{G}$$

On estime le couple aérodynamique en utilisant l'expression suivante :

$$C_{aér-estimé} = \frac{1}{2} \rho \cdot C_p \cdot S \cdot \frac{1}{\Omega_{turbine-estimé}} V_{estimé}^3$$

$\Omega_{turbine-estimé}$: L'estimation de la vitesse de la turbine est basée sur la mesure de la vitesse mécanique.

$$\Omega_{turbine-estimé} = \frac{\Omega_{mec}}{G}$$

$V_{estimé}$: La valeur estimée de la vitesse du vent peut être exprimée par la formule suivante :

$$V_{estimé} = \frac{\Omega_{turbine-estimé} \cdot R_t}{G}$$

Une expression globale du couple électromagnétique de référence est obtenue à l'aide des formules mentionnées précédemment :

$$C_{cem-ref} = \frac{1}{2\lambda^3} C_p \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3}$$

Afin d'obtenir une puissance extraite optimale, on utilise la grandeur λ pour l'associer. Elle correspond à la valeur maximale du coefficient de puissance C_{p-max} . Le couple électromagnétique de référence est alors ajusté jusqu'à sa valeur maximale :

$$C_{cem-ref} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} C_{p-max} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^5 \frac{\Omega_{mec}^2}{G^3}$$

En mettant :

$$K_{opt} = \frac{1}{2\lambda_{opt}^3} \cdot \rho \cdot \pi \cdot R_t^5 \frac{1}{G^3}$$

Le couple de référence peut être écrit de la manière suivante :

$$C_{cem-ref} = K_{opt} \cdot \Omega_{mec}^2$$

Le couple de référence dans l'étape **K+1** est déterminé par l'algorithme **MPPT** qui utilise la vitesse de rotation mesurée dans l'étape **K**, comme illustré dans la figure (4-9).

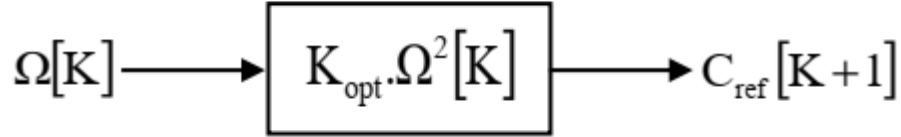


Figure 4-9 : Couple de référence en fonction de la vitesse de rotation

La figure (4-10) présente une représentation graphique de ce mode de contrôle.

- Le couple de référence C_{ref1} appliqué sur l'arbre de mécanique est généré par la mesure de la vitesse Ω_1 .
- Selon l'équation fondamentale de la dynamique, la vitesse de rotation évolue en fonction de ce couple, jusqu'à atteindre la valeur Ω_2 , et la nouvelle consigne de couple sera calculée.
- Après plusieurs cycles, on atteint le point optimal de fonctionnement $(\Omega_{opt}, C_{p-opt})$, qui correspond à la puissance maximale $P_{opt}(\lambda_{opt}, C_{p-opt})$.

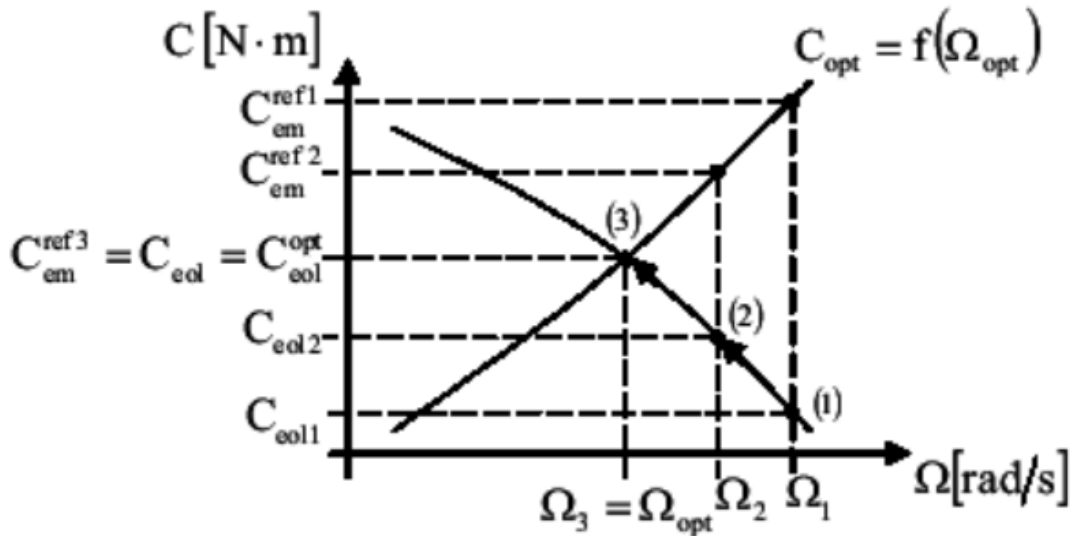


Figure 4-10 : Convergence vers le point optimal

Le principe de la stratégie de contrôle MPPT de la turbine éolienne sans asservissement de la vitesse de rotation est résumé dans le schéma bloc de la figure 4-11.

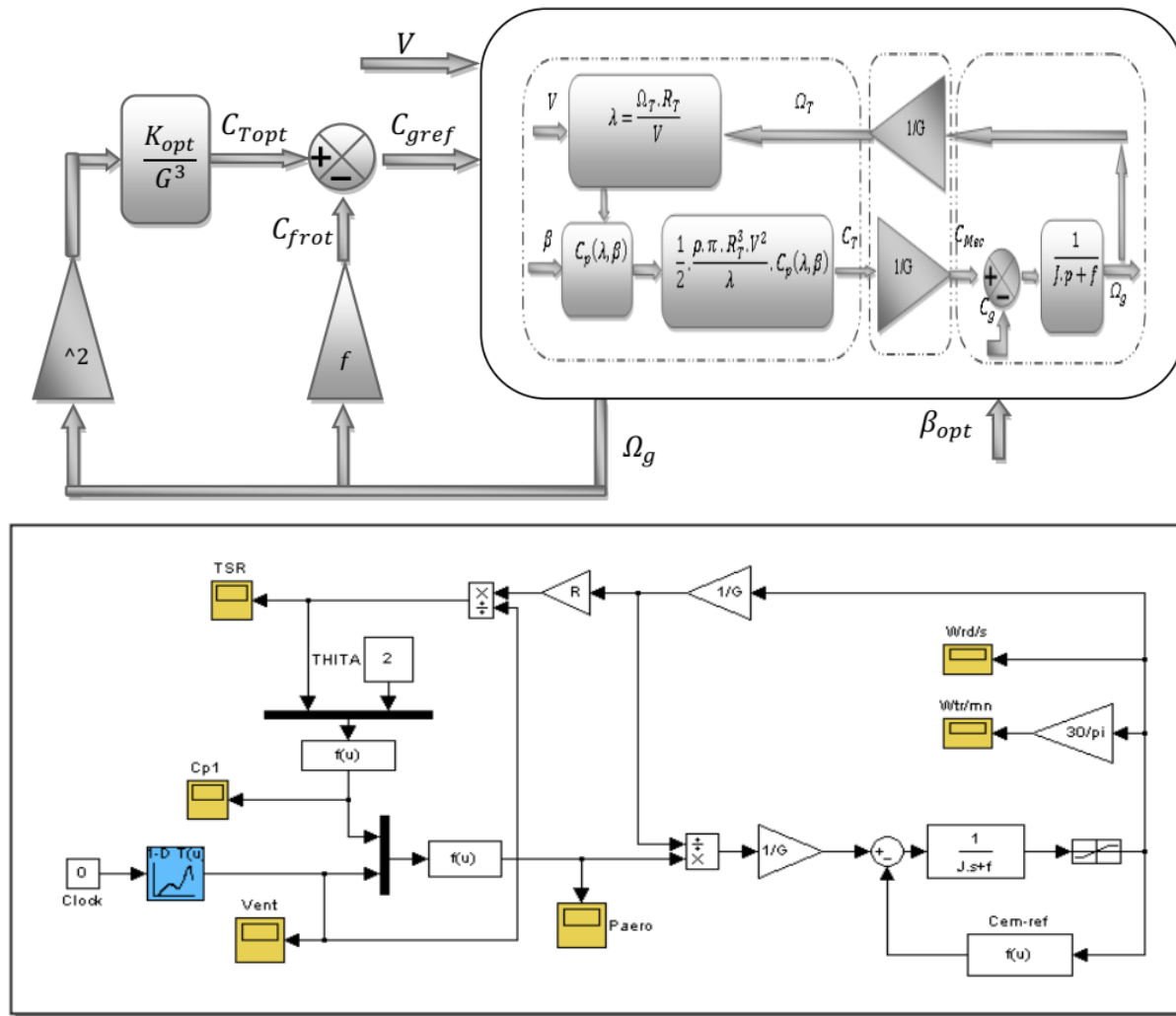


Figure 4-11 : Schéma bloc de la maximisation de puissance sans asservissement de vitesse

IV.6.4 Commande dans la zone III (limitation de la puissance)

Dans cette région, l'objectif de la commande est de restreindre la puissance extraite de la génératrice à sa valeur minimum. Pour cela, il y a deux approches à adopter :

- Le décrochage aérodynamique est un système qui consiste à modifier la forme des pales de manière à augmenter les pertes de portance au-delà d'une vitesse de vent donnée. Cette technologie est employée dans les éoliennes à vitesse fixe de faible puissance.
- Un dispositif d'adaptation des pales qui permet de modifier la portance des pales en fonction de la vitesse du vent afin de maintenir une puissance relativement constante. Il est employé dans les éoliennes à vitesse variable, qu'elles soient de taille moyenne ou grande, et de puissance élevée.

IV.6.4.1 Système d'orientation des pales

Il s'agit d'un système qui utilise l'angle β pour ajuster les pales en fonction d'une valeur de référence β_{ref} désirée. En général, on utilise cet angle pour ajuster la vitesse de la turbine et la puissance

mécanique produite. Différents systèmes permettent de régler l'angle de calage des pales. Ces systèmes peuvent être hydrauliques, comme ceux employés dans les aérogénérateurs de petite puissance, ou électriques, qui requièrent une source d'énergie externe, comme ceux employés dans les aérogénérateurs de grande puissance. Les performances de la turbine sont modifiées en ajustant l'angle d'orientation des pales, plus précisément le coefficient de puissance. Les pales sont positionnées face au vent à une vitesse faible et s'inclinent pour des vitesses élevées afin de réduire le coefficient de puissance.

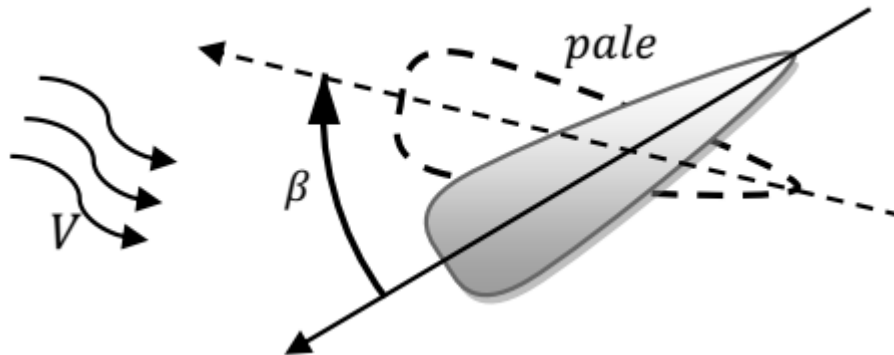


Figure 4-12 : Orientation des pales.

En générale, on utilise une fonction de transfert de premier ordre avec une constante de temps T_β pour approcher le système d'orientation des pales. Il est crucial de prendre en compte la vitesse de variation de l'angle $20^\circ / s$ lors de la modélisation de ce système en cas d'urgence.

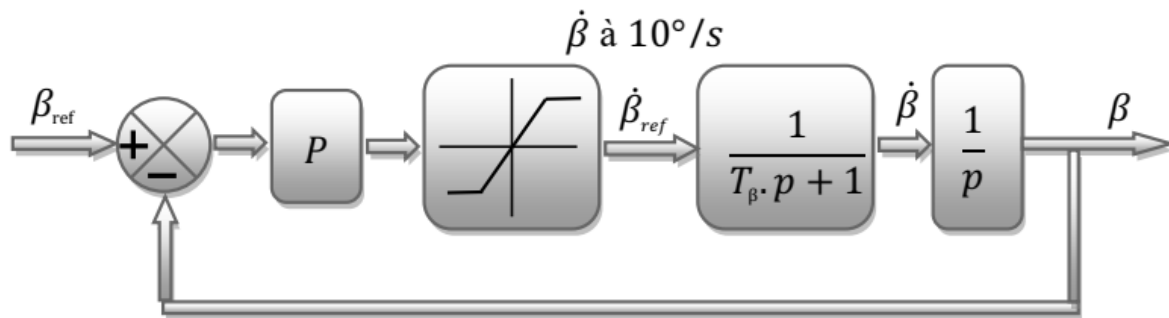


Figure 4-13 : Schémas bloc du système d'orientation des pales.

IV.6.4.2 régulation des systèmes d'orientation des pales « pitch control »

L'objectif est de restreindre la puissance active générée et de la maintenir à sa valeur nominale pour préserver tous les éléments de la chaîne éolienne qui l'entourent. On peut réduire le coefficient de puissance en modifiant l'angle de calage des pales, ce qui limite la puissance convertie.

Afin d'obtenir l'angle de référence β_{ref} , on ajuste la puissance mesurée (générée) $P_{Gén}$ à celle de référence (nominale) P_{nom} en utilisant un correcteur (régulateur) de type PI. Ensuite, pour obtenir la

vitesse de variation de l'angle de référence $\dot{\beta}_{ref}$, on ajuste l'angle de calage β à celui de référence β_{ref} déjà obtenu. Cette vitesse de référence $\dot{\beta}_{ref}$ sera restreinte. L'angle de calage β est obtenu en utilisant un intégrateur, comme illustré dans la figure (V.14).

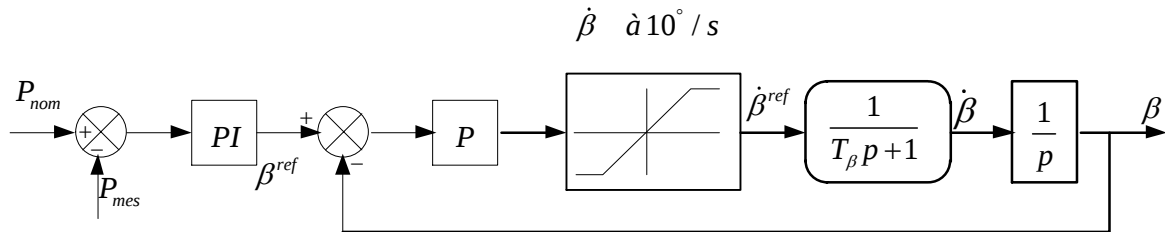


Figure (4.14) : Schémas bloc de la commande de l'angle de calage des pales.

Chapitre V

Topologies des systèmes éoliens

- Etat de l'art des systèmes éoliens,
- Les différentes machines utilisées dans les systèmes de conversion éolienne
- Modélisation et simulation des machines électriques tournantes : MAS, MSAP, MADA, GRV,.....
- Les convertisseurs utilisés dans les systèmes de conversion éolienne (modélisation et simulation) :
 - Convertisseur AC/DC,
 - Convertisseur DC/AC,
 - Convertisseurs DC/DC pour l'adaptation d'impédance,
- Principe de raccordement de la chaîne éolienne au réseau électrique.

V.1 Etat de l'art sur la conversion électromécanique

L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'électricité. Pour cela, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable. Il existe sur le marché plusieurs types de machines électriques qui peuvent jouer le rôle de génératrice dans un système aérogénérateur qui demande des caractéristiques très spécifiques. Le cahier des charges pour une génératrice éolienne varie selon le type et les dimensions géométriques de la voilure. Certaines machines typiquement utilisées dans les constructions éoliennes sont succinctement décrites dans ce paragraphe en tenant compte de leurs spécificités.

Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans ce qui suit. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (< 20 kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2 MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique.

Le fait qu'une éolienne fonctionne à vitesse fixe ou à vitesse variable dépend par exemple de cette configuration. Les avantages et inconvénients de chaque configuration peuvent se résumer comme suit :

V.1.1 Fonctionnement à vitesse fixe

Ces éoliennes sont les premières à avoir reçue une technologie développée. La génératrice qui est généralement une machine asynchrone à cage d'écurueil fonctionnant en hypersynchronisme à une vitesse légèrement supérieure à celle du synchronisme est reliée directement au réseau sans convertisseur de puissance. Sa vitesse mécanique fixe est imposée par la fréquence du réseau et par son nombre de paires de pôles.

Le contrôle de la puissance de ce type de système se fait au niveau de la turbine, soit par décrochage aérodynamique, soit par calage variable des pales de l'aérogénérateur pour s'approcher du fonctionnement synchrone. Il est doté d'un multiplicateur de vitesse pour s'adapter à la vitesse de la turbine et de la génératrice.

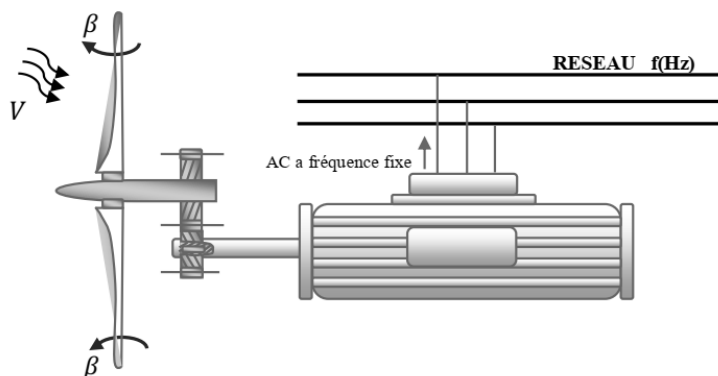


Figure V-1 : Eolienne à vitesse fixe.

Avantage:

Les avantages principaux de ce type :

- La simplicité d'implantation.
- moins cher.
- L'absence de convertisseurs de puissance pour la commande.
- plus fiable (moins d'entretien).

Inconvénients:

Ce système possède beaucoup d'inconvénients lors de l'exploitation de l'énergie extraite à savoir :

- Une puissance extraite non optimisée (On rate les maximas théoriques).
- difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau.
- Un rendement très faible pour les vents faibles et moyens.
- La perte du contrôle de la puissance réactive.
- présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance.

V.1.2 Fonctionnement à vitesse variable

A cause des inconvénients du système éolien à vitesse fixe, les industriels ont développés d'autres systèmes plus performants fonctionnant pour une gamme de vitesse plus large. Ces systèmes sont basés sur l'exploitation optimale de la puissance extraite de l'énergie cinétique du vent en ajustant en permanence la vitesse de la génératrice à celle du vent. Cette technique s'effectue par des commandes sur la chaîne globale du système à savoir : la turbine, le générateur et le convertisseur utilisé qui sert à synchroniser la fréquence et l'amplitude générés par le générateur avec celles du réseau.

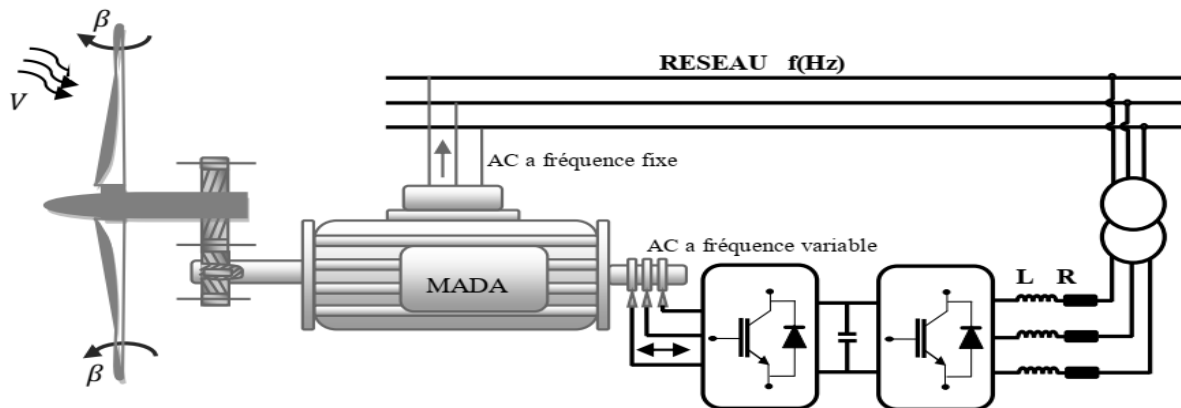


Figure V-2 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MADA.

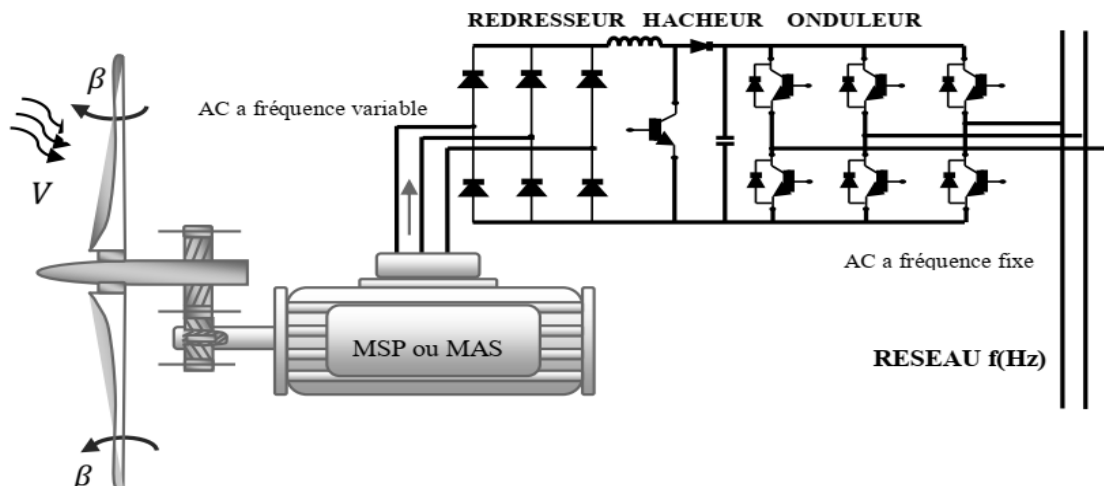


Figure IV-3 : Eolienne à vitesse variable basée sur une MSP ou une MAS.

Avantages principaux de ce type:

- Optimisation de l'énergie captée grâce à la possibilité de contrôler la vitesse du rotor.
- Contrôle du transfert de puissance et énergie propre envoyée au réseau.
- Une possibilité d'augmentation de la vitesse de rotation du rotor lors des rafales.
- Réduction des contraintes mécaniques subites par le train de puissance. Les turbulences et rafales de vent peuvent être absorbées, l'énergie absorbée du vent est donc emmagasinée dans l'inertie mécanique de la turbine, réduisant ainsi les oscillations de couple
- Génération d'une puissance électrique de meilleure qualité.
- Ce type de machines offre une constante de temps plus grande du système de contrôle de l'angle de calage, ce qui réduit sa complexité
- Réduction des bruits acoustiques.

Inconvénients :

- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Une perte d'énergie pendant le processus de conversion.
- Utilisation de machines spéciales.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne.

V.2 Générateurs et topologies

Les deux types de machines utilisées dans les systèmes éoliens sont les machines synchrones et les machines asynchrones sous leurs diverses variantes. On donne dans cette section les topologies importantes et leurs caractéristiques principales.

V.2.1 Générateur Asynchrone

Le générateur à induction est largement utilisé dans les turbines éoliennes de moyenne et grande puissance en raison de sa robustesse, sa simplicité mécanique et son coût réduit. 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. 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.

V.2.1.1 Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil

Les machines électriques asynchrones sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses. Elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle des

puissances. Elles sont aussi les moins exigeantes en termes d'entretien et présentent un taux de défaillance très peu élevé. Dans les aérogénérateurs de dimensions conséquentes (grande puissance et rayon de pales important), la vitesse de rotation est peu élevée.

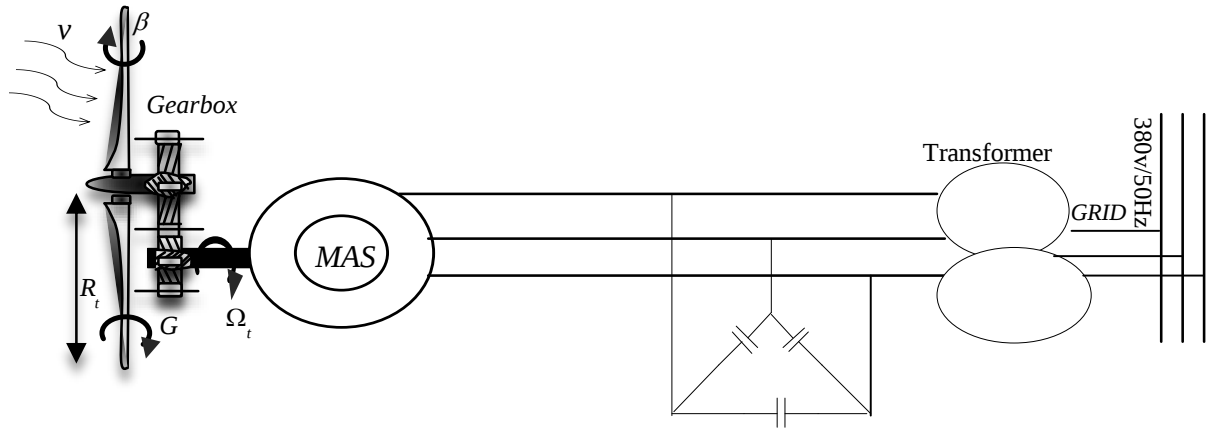


Figure V.4 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage (vitesse de rotation fixe).

Or, il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'insérer entre la turbine et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse. Le changement de la configuration de bobinage du stator (nombres de pôles) et donc l'utilisation des machines de type *Dahlander* est une solution parfois utilisée (Figure V.4), mais là encore le rendement est loin d'être optimal sur toute la plage de vent. Une autre possibilité consiste à utiliser un variateur de fréquence, mais cette solution est globalement coûteuse (variation de fréquence et multiplicateur de vitesse) et donc très rarement exploitée (Figure V.5).

La majorité des applications en éolien (environ 85%) sont donc à vitesse de rotation constante et à connexion directe sur le réseau électrique comme le montre la Figure (V.5). Ces machines peuvent être facilement utilisables dans le petit éolien car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible. Mais, au-delà d'une efficacité énergétique moindre par rapport aux systèmes à fréquence variable, la rigidité de ces chaînes dont on a déjà dit qu'elle occasionne des variations brusques de puissance, ainsi que les problèmes de décrochage du réseau en cas de chute de vent sont leurs principaux inconvénients.

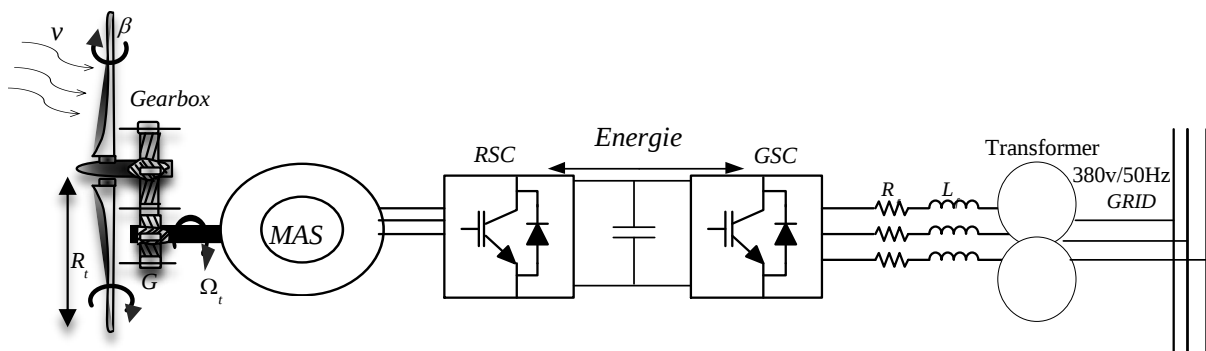


Figure V.5 : Système éolien basé sur la machine asynchrone à cage à fréquence variable

V.2.1.2 Machine asynchrone à double stator

Pour améliorer le rendement du dispositif précédent, certains constructeurs utilisent un système à base de machine asynchrone à double stator (Figure V.6) :

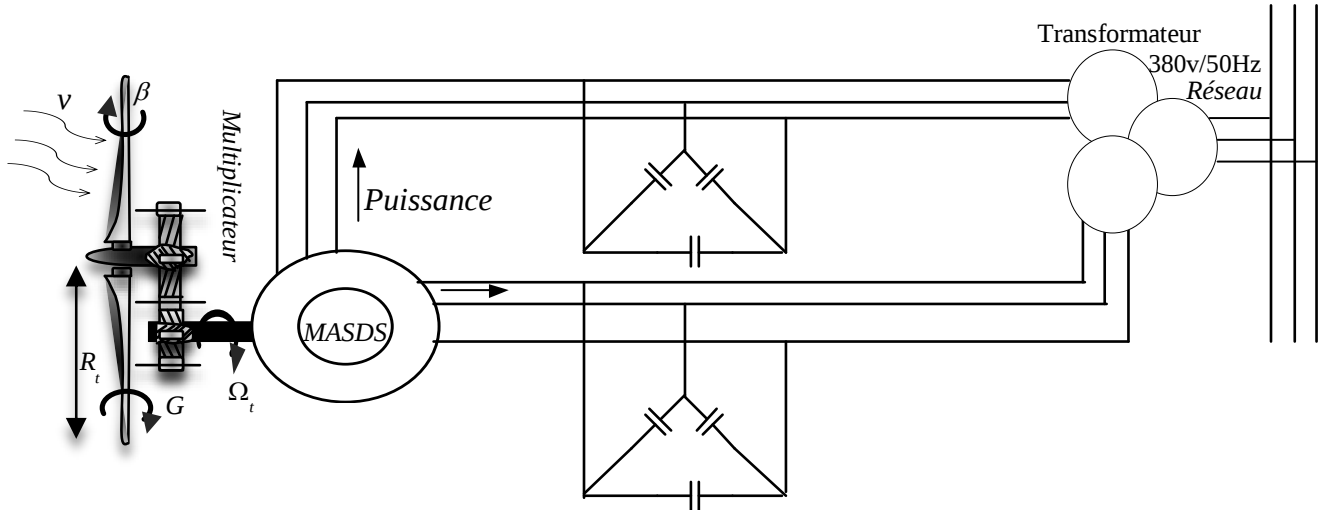


Figure V.6 : Machine asynchrone à double stator dans une chaîne de conversion éolienne.

Un stator de faible puissance à grand nombre de paires de pôles pour les petites vitesses de vent.
Un stator de forte puissance à faible nombre de paires de pôles permettant de fonctionner aux vitesses de vent élevées.

Ce système reste intrinsèquement un dispositif à vitesse fixe mais possède deux points de fonctionnement différents. Le bruit ainsi engendré par l'éolienne est alors plus faible pour les petites vitesses de vent car l'angle de calage nécessaire à l'orientation des pales atteint des valeurs moins élevées. La présence d'un deuxième stator rend la conception de la machine particulière et augmente le coût et le diamètre de façon non négligeable, ce qui représente une augmentation du poids et de l'encombrement de l'ensemble.

V.2.1.3 Machine asynchrone connectée au réseau par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance

Le dispositif de base est représenté sur la Figure (V.7). Cette configuration autorise un fonctionnement à vitesse variable sans limite physique théorique. En effet, quelle que soit la vitesse de rotation de la machine, la tension produite est redressée et transformée en tension continue. Le fonctionnement de l'onduleur est alors classique et une commande adéquate permet de délivrer une tension alternative de fréquence fixe correspondant à celle du réseau avec un facteur de puissance unitaire. La puissance nominale de la génératrice détermine alors la puissance maximale que peut fournir l'éolienne. Les convertisseurs utilisés sont dimensionnés pour la totalité de cette puissance échangée entre la machine et le réseau. Ils représentent donc un coût important, des pertes non négligeables (jusqu'à 3% de la puissance nominale de la machine) et entraînent des perturbations qui nuisent au rendement et à la qualité de l'énergie délivrée. De plus, la présence des capacités est indispensable pour fournir l'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine. Cette énergie ne peut pas être fournie par le réseau car le redresseur est unidirectionnel. Il peut être éventuellement remplacé par un redresseur *MLI* à base *d'IGBT* dont la structure est semblable à celle

de l'onduleur. Dans ce cas, le transfert de puissance réactive est contrôlable et se fait du bus continu vers la machine et le transfert de puissance active est identique au cas du redresseur simple. Cette solution alourdit toutefois le dispositif en termes de coût et de complexité de mise en œuvre, de plus, les enroulements statoriques du moteur sont alors soumis à des dv/dt importants qui peuvent réduire leur durée de vie. L'ensemble de ces inconvénients n'ont pas permis un développement industriel important de ce dispositif.

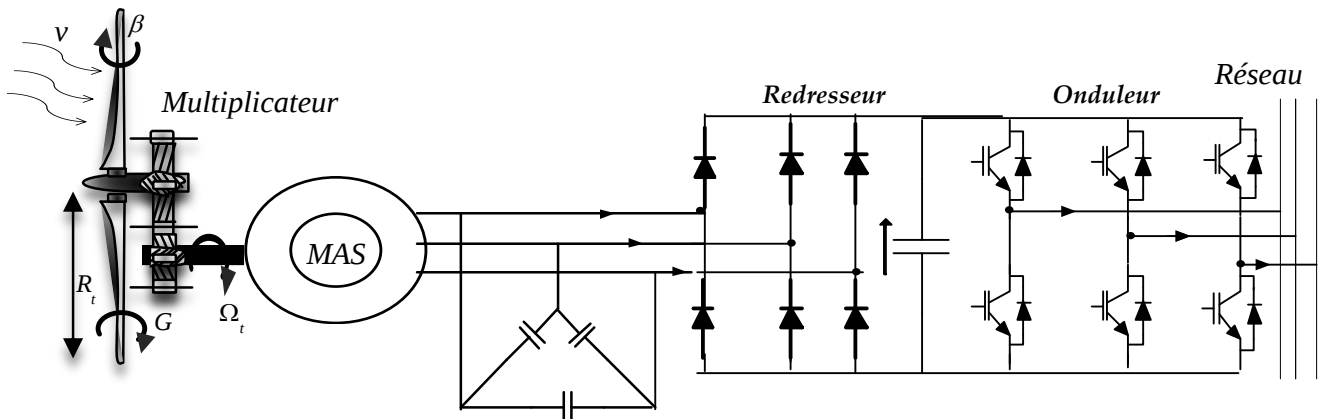


Figure V.7 : Machine asynchrone connectée sur le réseau par l'intermédiaire d'un ensemble redresseur – onduleur

V.2.2 Générateur synchrone

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.

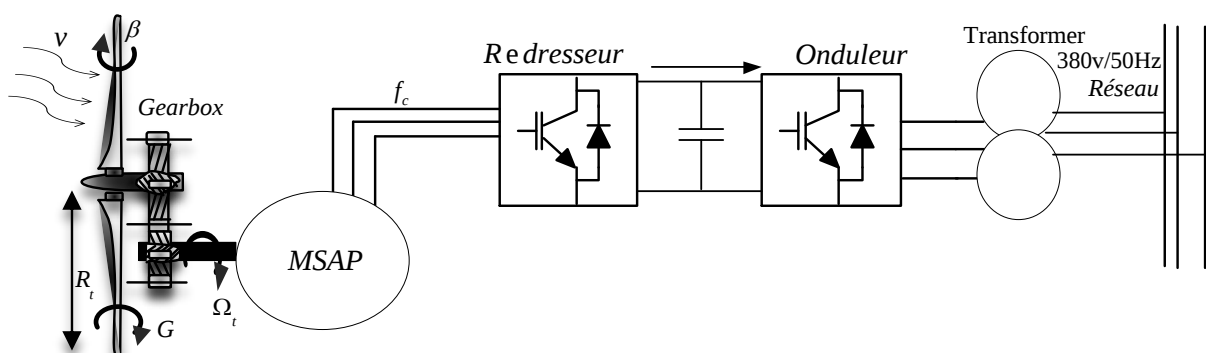


Figure V.8 : Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.

L'avantage du générateur synchrone sur le générateur asynchrone est l'absence de courant réactif de magnétisation. Le champ magnétique du générateur synchrone peut être obtenu par des aimants ou par bobinage d'excitation conventionnel. Si le générateur possède un nombre suffisant de pôles, il peut être utilisé pour les applications d'entraînement direct qui ne nécessitent pas de boîte de vitesse. Le générateur synchrone est toutefois mieux adapté à la connexion indirecte au réseau de puissance à travers un convertisseur statique Figure(V.8), lequel permet un fonctionnement à vitesse variable.

Pour des unités de petite taille, le générateur à aimants permanents est plus simple et moins coûteux. Au-delà de 20KW (environ), le générateur synchrone est plus coûteux et complexe qu'un générateur asynchrone de taille équivalente.

V.2.2.1 Générateur synchrone à rotor bobiné

Les variations importantes des couples électromagnétiques qui peuvent avoir lieu dans un système éolien peuvent causer une démagnétisation des aimants et une diminution de leur durée de vie. A noter que les aimants sont constitués généralement de matériaux à base de terres rares ce qui rend, à travers une opération d'extraction difficile, leur fabrication coûteuse.

Pour limiter cet inconvénient, certains fabricants ont développé des éoliennes basées sur des machines synchrones à rotor bobiné, le champ tournant rotorique est créé par un enroulement alimenté en courant continu (roue polaire) au moyen d'un redresseur connecté au réseau. Ce mode d'excitation exige la présence d'un contact glissant au rotor, ou par un système "Brushless" avec un redresseur tournant.

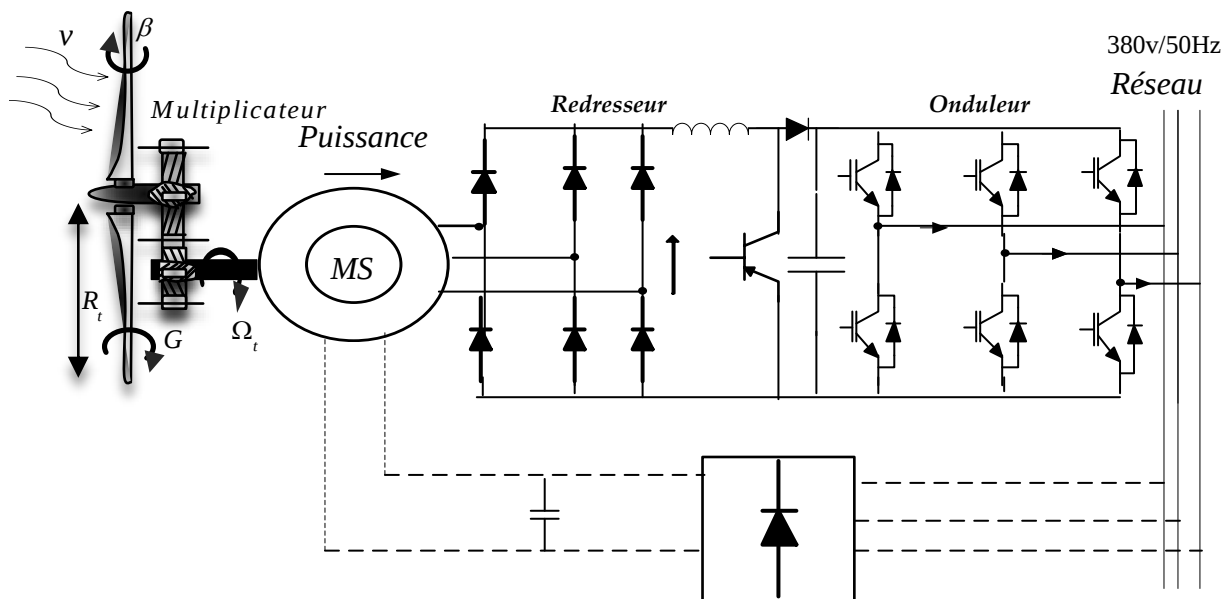


Figure V.9 : Machine synchrone reliée au réseau par un dispositif redresseur – hacheur – onduleur MLI.

V.2.2.2 Générateur synchrone à aimants permanents

La caractéristique d'auto excitation de MSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en fait le moins compétitif.

La suppression du système de balais - bagues et du multiplicateur de l'éolienne a minimisé les frais d'entretien du système. De plus, la machine ne consomme pas d'énergie réactive dans le rotor, ce qui lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement. Il existe plusieurs

types de ces machines destinées aux applications éoliennes comme: les machines de construction standards (radiales), les génératrices discoïdes (champs axial) et les machines à rotor extérieur.

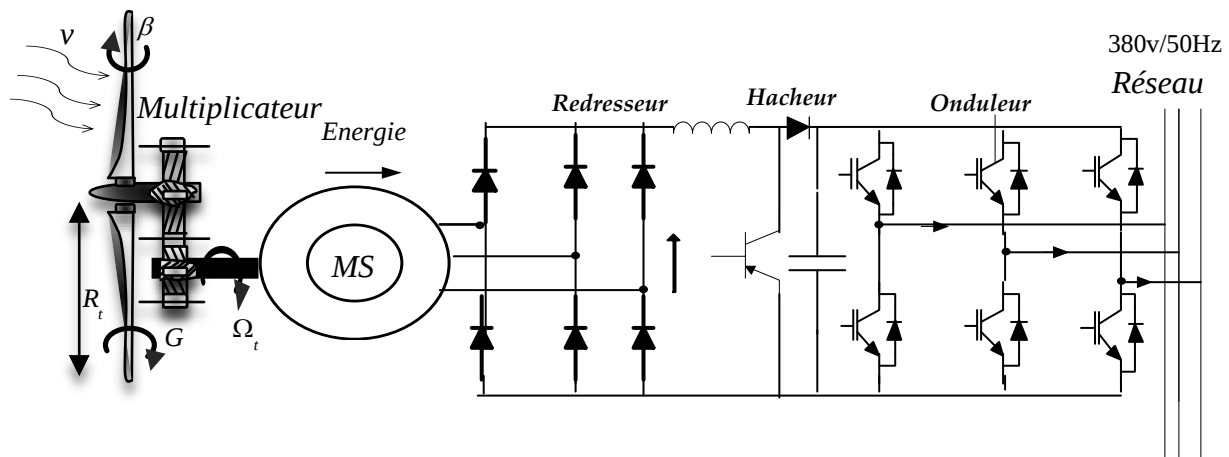


Figure V.10 : Machine synchrone à aimants permanents dans une chaîne de conversion éolienne.

V.2.3 Machines à structures spéciales

Conçues au départ pour produire des courants de fréquence élevée, les machines à réluctance variable (MRV) sont principalement destinées à des applications exigeant de grandes vitesses de rotation ou des entraînements lents à couple élevé. Elles sont également utilisées comme actionneur de positionnement électromécanique tel que les moteurs pas à pas.

On distingue deux types de structures de MRV, les machines à réluctance non-excitées et les machines à réluctances excitées :

- ❖ *Les MRV non-excitées* sont principalement destinées à des fonctionnements à hautes vitesses, ne possèdent pas de contact glissant et sont très robustes. L'inconvénient majeur est qu'elles possèdent un facteur de puissance médiocre.
- ❖ *Les MRV excitées* pallient à ce problème de facteur de puissance en intégrant une excitation constituée d'une alimentation continue et de bobines au d'aimants permanents.

L'application des machines à réluctance dans les systèmes éoliens est plutôt rare, cependant certaines éoliennes intègrent, comme alternateur de moyenne puissance, des machines à réluctances excitées à denture répartie. L'excitation est plus souvent réalisée par des aimants permanents, on parle alors de machines hybrides.

V.2.4 Evolution des systèmes éoliens à vitesse variable vers la double alimentation

La machine asynchrone double alimentation (MADA) joue un très grand rôle dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne. L'utilisation d'une telle machine exige l'insertion d'un convertisseur entre le rotor et le réseau ce qui permet de contrôler le transfert de puissance entre le stator et le réseau. C'est la raison pour laquelle on trouve cette génératrice dans la production d'énergie électrique de grande puissance dans une grande gamme de vitesse du vent.

V.2.4.1 Machine asynchrone à double alimentation type rotor bobiné

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un stator triphasé

identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes décrits ci-dessous. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur.

Cette configuration a l'avantage de réaliser des économies sur les convertisseurs de puissance car la puissance transitée par le circuit rotorique est faible par rapport à la puissance statorique dans la configuration classique.

Ces machines sont un peu plus complexes que des machines asynchrones à cage avec lesquelles elles ont en commun de nécessiter un multiplicateur de vitesse. Leur robustesse est légèrement diminuée par la présence de système à bagues et balais, mais le bénéfice du fonctionnement à vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricants (Vestas, Gamesa,...) utilisent ce type de machines.

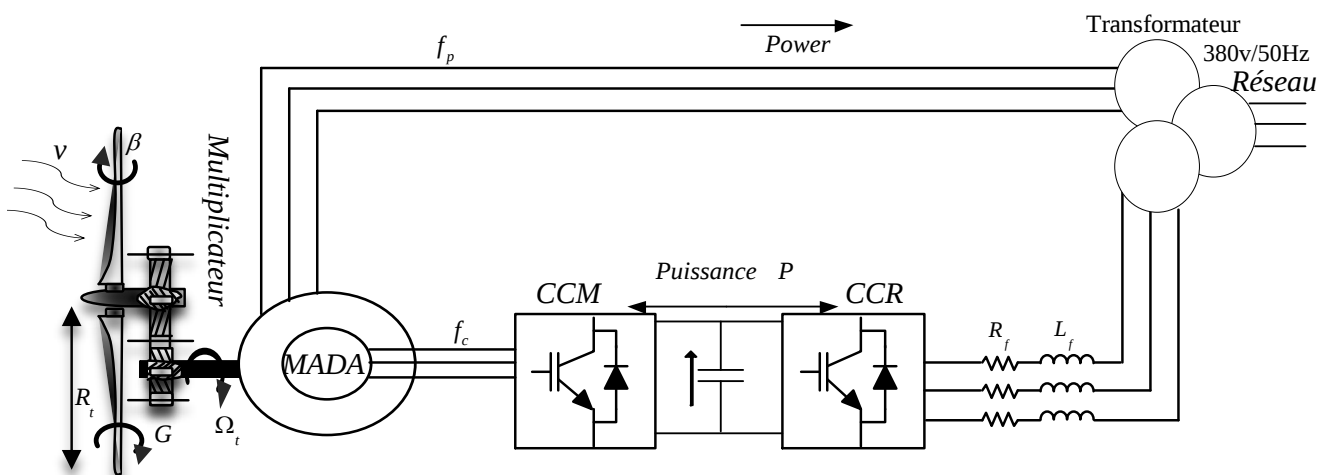


Figure V.11 : Machine asynchrone à double alimentation type rotor bobiné dans une chaîne de conversion éolienne.

Les avantages des génératrices asynchrones double alimentation sont :

- Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens ;
- Sa capacité de commander la puissance réactive et, de cette façon, de découpler la commande des puissances active et réactive.
- Il peut se magnétiser à partir du rotor sans prélever au réseau pour faire la commande de tension ;
- Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale ;
- Fonctionnement à vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse nominale).

Les inconvénients des génératrices asynchrones double alimentation sont :

- Maintenance du multiplicateur ;
- Commande complexe ;
- Oscillations mécaniques ;

- Présence obligatoire de bagues et balais.

Pour remédier au problème de la présence de bague-balais, les chercheurs proposent une autre structure qui s'appelle machine asynchrone à double alimentation sans balais (brushless). On envisage même l'utilisation de deux machines sur le même arbre, l'une servant à la production électrique et l'autre à l'alimentation des enroulements rotoriques.

V.2.4.2 MAS à double alimentation – structure de Scherbius avec cycloconvertisseur

Pour rendre la structure précédente réversible et échanger l'énergie entre le rotor et le réseau, on remplace le redresseur et l'onduleur par un cycloconvertisseur. L'utilisation de ce dernier permet d'avoir une plage de vitesse de rotation variant de $- +30\%$ autour de la vitesse du synchronisme, et le système peut fonctionner ainsi en hypo synchrone ou hyper synchronisme. L'inconvénient de cette structure réside dans la génération des perturbations harmoniques importantes entraînant la diminution du facteur de puissance du dispositif.

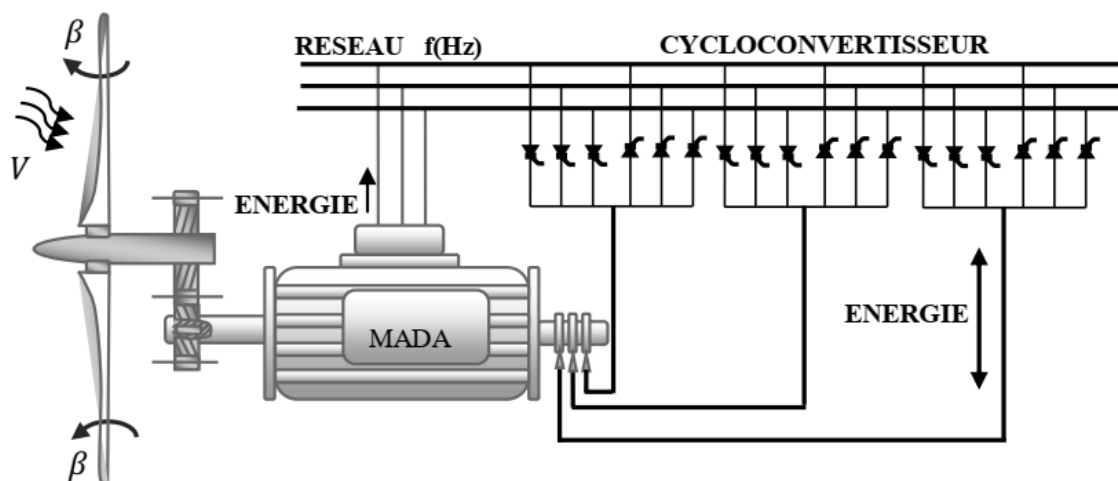


Figure V-12 : Structure de Scherbius avec cycloconvertisseur.

V.2.4.3 Structure de kramer

Pour améliorer le rendement de système et récupérer l'énergie dissipée dans la charge, on remplace le hacheur et la résistance dans la configuration précédente par un onduleur qui renvoie l'énergie de glissement vers le réseau.

Dans cette structure, le convertisseur est réduit par rapport à la puissance nominale de la machine, par contre elle présente des inconvénients tels que l'affectation du facteur de puissance lors de l'utilisation des thyristors dans l'onduleur, et la présence d'un redresseur unidirectionnel (transfert d'énergie uniquement du rotor de la machine vers le réseau).

Ce système ne peut produire de l'énergie que pour des vitesses de rotation supérieures à celle du synchronisme (hyper synchrone).

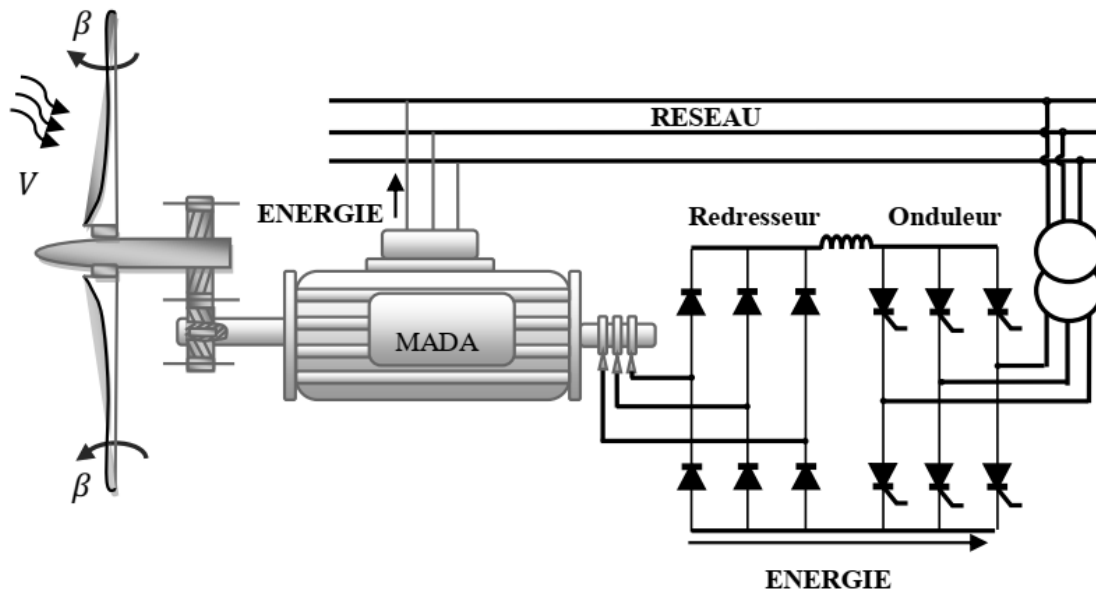


Figure V-13 : MADA à structure de Kramer.

V.2.4.4 Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI

C'est la structure la plus utilisée vu les avantages qu'elle apporte. Elle permet de réduire les harmoniques et d'augmenter la possibilité de commande par rapport à la structure précédente. Elle offre aussi une gestion de puissance très efficace en utilisant une interface d'électronique de puissance dimensionnée pour un tiers de la puissance nominale de la machine, et ces pertes représentent moins de 1% de cette puissance. De plus, la bidirectionnalité de cette interface autorise les fonctionnements hyper et hypo synchrone.

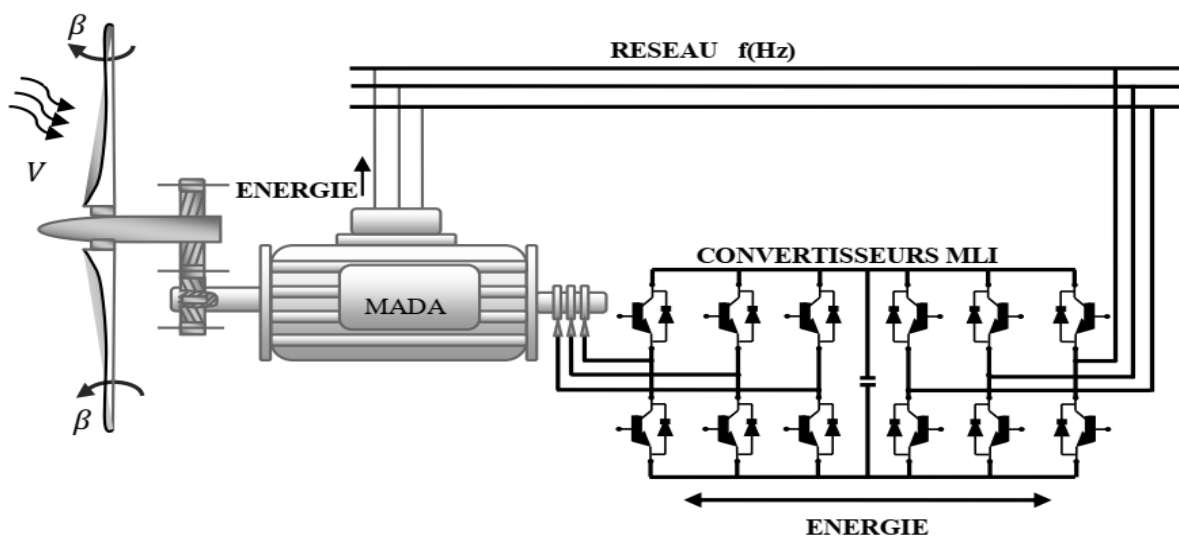


Figure V-14 : Structure de Scherbius avec convertisseurs MLI.

Cette interface est constituée de deux convertisseurs à interrupteurs commandés à l'ouverture et à la fermeture avec une fréquence de commutation importante qui permet de

diminuer les harmoniques et faciliter le filtrage. Le convertisseur côté rotor permet la commande des puissances générées au stator et l'injectées au réseau, l'autre convertisseur permet le contrôle de bus continu et le maintenir constant ce qui rend le facteur de puissance côté réseau unitaire.

V.2.4.5 Machine asynchrone à double alimentation en cascade

Cette configuration de machine essaie d'allier les avantages de la MAS et de la MADA. La structure en cascade (Fig. V.15) peut être considérée comme la première réalisation pratique d'une machine tournante sans balais doublement alimentée. Le générateur à induction à double alimentation en cascade (CDFIG) se compose de deux machines à induction à rotor bobiné identiques ayant leurs rotors couplés mécaniquement et électriquement. Dans CDFIG, les deux stators des machines connectées sont accessibles. Alors que le stator de la première machine est directement connecté au réseau (BP), les courants et tensions du stator de la seconde machine peuvent être manipulés pour répondre aux besoins en matière de production d'énergie.

Un tel agencement de machine à alimentation double conduit à une machine dite à induction à double alimentation en cascade (CDFIM) qui peut fonctionner comme un générateur à induction à double alimentation en cascade (CDFIG).

Les bornes de rotor a_1, b_1, c_1 et a_2, b_2, c_2 des deux machines sont connectées dos à dos dans l'ordre: $a_1 - a_2, b_1 - b_2, c_1 - c_2$ qui garantissent que les couples générés agissent dans le même sens. Pendant que le stator de la première machine est connecté au réseau, le stator de la seconde machine peut être alimenté par le convertisseur de puissance. Nous proposons le logiciel de simulation PSIM [15] pour l'analyse en régime permanent du double stator CDFIM. Le système de base de production d'énergie avec un stator double considéré CDFIG est illustré à la figure I.20.

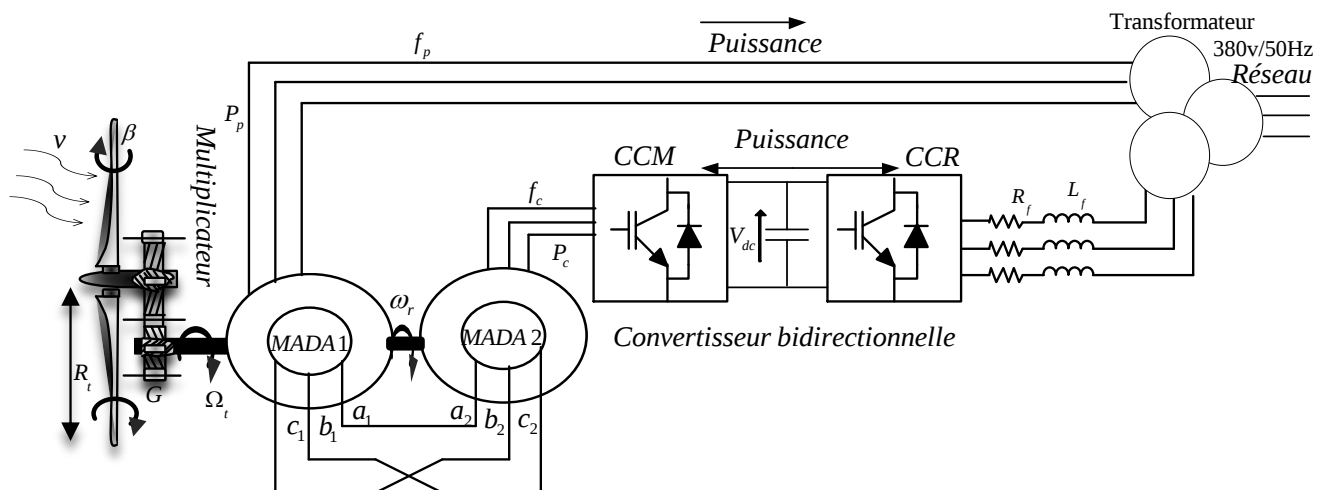


Figure V.15 : Principe de fonctionnement de deux machines asynchrones en cascade.

Pour pouvoir maintenir le principe de fonctionnement de la structure en cascade, il faut respecter certaines conditions:

- Il faut éviter, dans la mesure du possible, le couplage électromagnétique direct (à travers du

noyau magnétique du stator unique) entre les deux bobinages du stator.

- Il faut maximiser le couplage électromagnétique entre le rotor et chacun des bobinages du stator.

Si ces conditions sont accomplies, le principe de fonctionnement en cascade est assuré. Ils existent deux options pour le rotor : un rotor à cage ou un rotor réluctant. Ces deux types de rotor définissent les deux nouveaux types de machines électriques à double alimentation : la BDFM et la BDFRM.

V.2.4.6 Machine asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB)

La MADASB fut proposé par *René Spée* (et autres) de la *Oregon State University* (USA). A partir des premiers résultats de leur recherche ils ont réalisé un brevet sur la conception de la machine et du modèle en régime permanent. Pendant la décade des 90 ils ont publié des études diverses en comprenant la conception, la modélisation in [1] et la commande in [2] de la machine.

Les générateurs à induction à double alimentation Brushless (BDFIG) ont montré des perspectives prometteuses comme alternative au générateur à induction à alimentation double à alimentation conventionnelle (DFIG) dans les applications éoliennes commerciales, en particulier pour les parcs éoliens en mer, car elle ne nécessite ni balais ni bagues, ce qui se traduit par une fiabilité accrue et des opérations de maintenance moins coûteuses.

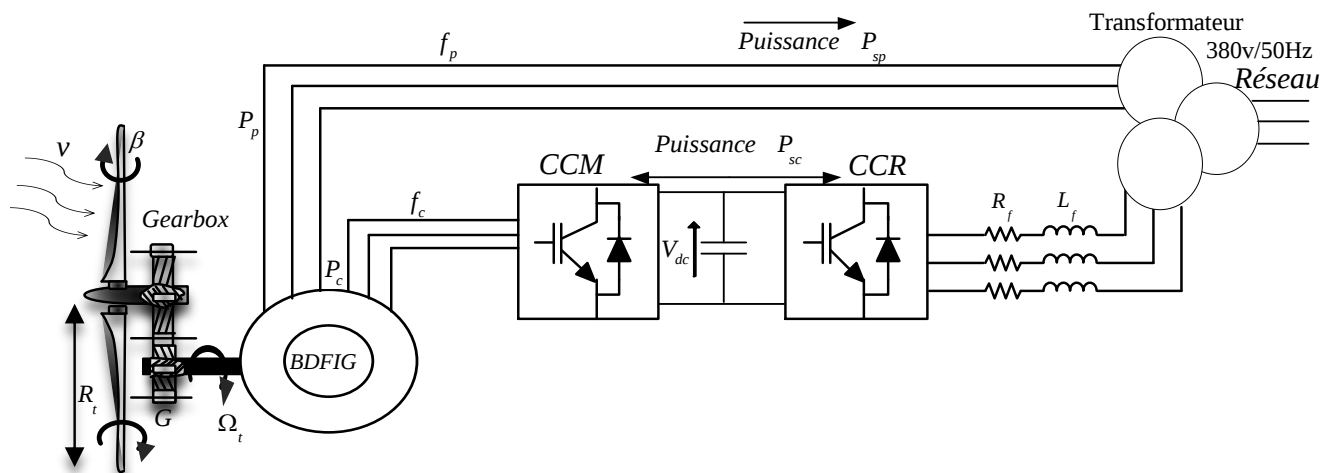


Figure V.16 : Machine asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB).

BDFIG, un autre membre de la famille des machines à double alimentation, hérite de tous les avantages du DFIG conventionnel et a été considéré comme un substitut viable. Le BDFIG avec rotor bobiné à boucle imbriquée se compose d'enroulements statorique, rotor et stator de contrôle, comme illustré à la Fig V.16. L'enroulement de puissance (BP) est directement connecté au réseau, tandis que le bobinage de contrôle (BC) est alimenté par un convertisseur double pont sous-évalué dans une configuration «dos à dos» pour un flux de puissance bidirectionnel.

Dans la conception d'une BDFM il faut garantir un rapport précis entre le nombre de pôles des deux bobinages du stator et le nombre de spires du rotor. Il existe donc une contrainte physique que doivent respecter les machines type BDFM. En même temps l'utilisation d'une BDFM correctement conçue ne garantit pas le fonctionnement de la machine ; il est nécessaire de respecter un rapport

entre la pulsation des deux alimentations du stator et la vitesse du rotor (condition d'alimentation, contrainte similaire à celle de la machine synchrone). La caractéristique principale de la BDFM ; c'est que le bobinage de commande peut modifier le courant du rotor qui a été induit par le bobinage de puissance. De cette manière, on obtient au travers du rotor un couplage magnétique croisé entre les deux bobinages du stator.

Le stator de la BDFM est formé par deux bobinages triphasés équilibrés, et le rotor a une structure à cage spéciale.

Il faut remarquer que pour éviter le couplage magnétique direct non souhaité entre les deux bobinages du stator leur nombre de paires de pôles doit être différent ($p_1 \neq p_2$). Pour que ces deux courants ne soient pas dissociés, ils doivent avoir une même distribution spatiale, ce qui conditionne la structure physique de la machine.

Les avantages potentiels de cette structure sont :

- Dimensionnement du convertisseur à une puissance plus petite que la puissance nominale de génération (avantage équivalent à celui de la MADA) ;
- Coûts d'installation et de maintenance réduits par rapport à la topologie MADA ;
- Elimination des oscillations produites par le rotor bobiné.

Le tableau (V.1) suivant synthétise les caractéristiques principales de chaque structure de conversion :

	01 ^{ère} génération Machine asynchrone à cage (MAS)	02 ^{ème} génération Machine asynchrone à double alimentation (MADA)	03 ^{ème} génération Machine asynchrone à double alimentation sans balais (MADASB)
Limitation de la plage de vitesse	Non	Oui	Oui
Puissance du convertisseur	100% de la P_n	25% de la P_n	25% de la P_n
Distorsion harmonique	Haute	Basse	Basse
Coût de maintenance	Bas	Moyen/haut	Bas
Coût de l'ensemble machine+ convertisseur	Moyen/haut	Moyen	Moyen/bas
Robustesse, fiabilité	Haute	Moyenne	Haute

Tableau (V.1) : Comparaison de différentes machines utilisées dans SCE

- [1] I. Poza, E. Oyarbide, D. Roye and M. Rodriguez, "Unified reference frame dq model of the brushless doubly fed machine", IEE Proc. Elec. Powe. Appl, Vol.153, No. Sem 2006.
- [2] D. Zhou, R. Spée, G.C. Alexander, "Experimental of a rotor flux oriented control algorithm for brushless doubly-fed machines", IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 12. No. 1. Januray. 1997.