

Chapitre I

*Etat de l'art sur la
conversion de l'énergie
éolienne*

I.1 Introduction

La première partie de ce chapitre, décrit une étude technique sur l'énergie éolienne qui comprend son l'historique, ses avantages et ses inconvénants.

Nous décrivons aussi les différents aérogénérateurs et un aperçu plus détaillé de l'aérogénérateur à axe horizontal.

Dans la dernière partie du chapitre nous présenterons les différentes technologies des systèmes éoliennes tout en soulignant leurs avantages et leurs inconvénients.

I.2 Aperçu sur l'énergie éolienne

I.2.1 Historique

Selon la divinité de la Grèce antique, le nom d'éolienne est extrait du mot Éole qui signifie dieu du vent. L'énergie du vent est l'une des premières formes d'énergie employée par l'homme, qui remonte à 2000 ans avant J-C. Les Babyloniens avaient conçu à cette époque un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance provenant du vent. Elle fut utilisée, par la suite, pour la propulsion des navires. Au moyen âge, elle était utilisée par les européens pour répondre à des besoins en énergie mécanique dans des moulins de blé et dans l'assèchement des terres inondées au Pays-Bas (pompage d'eau).[5]

L'association d'une turbine éolienne à une génératrice a été mise au point par Poul Lacour en 1891. Cette application a évolué en termes de puissance et de rendement durant tout le 20^{ème} et jusqu'au début du 21^{ème} siècle. Son utilisation s'est élargie à travers le monde notamment dans les zones isolées telles que les îles du pacifique. Les Pays-Bas sont les premiers pays dans la construction des éoliennes (50% des éoliennes dans le monde sont fabriquées en Hollande). Dans les années 40, au Danemark, 1300 éoliennes ont été fabriquées.

Dans les années 60, environ 1 million d'aérogénérateurs fonctionnait dans le monde. Au début du siècle dernier, les aérogénérateurs ont fait une apparition massive (6 millions de pièces fabriquées aux Etats-Unis où ils étaient le seul moyen d'obtenir de l'énergie électrique dans les campagnes isolées [6].

La crise pétrolière de 1973 a alerté les états producteurs et consommateurs d'énergie fossile sur la nécessité de la réalisation et du développement de centrales éoliennes. A la fin des années 80, le nombre d'éoliennes installées a augmenté de façon considérable. L'Algérie

a décidé en 2006 de se doter de la technologie éolienne en implantant la première ferme éolienne à Tindouf d'une puissance de 50 MW. Elle envisage en perspective de recouvrir 5% de ses besoins en électricité par les énergies renouvelables dont l'énergie éolienne [7].

I.3. Présentation du système éolien

I.3.1 Définition du système éolien

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. Cette conversion se fait en deux étapes :

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit de l'énergie mécanique et la converti en énergie électrique qui la transmet ensuite sur les réseaux électriques.

I.3.2 Les différents types d'éoliennes

Les turbines éoliennes sont classées selon leurs axes de rotation en deux catégories :

- ✓ Éoliennes à axe horizontal.
- ✓ Éoliennes à axe vertical

I.3.2-a) Les éoliennes à axe vertical

Ces types d'éoliennes sont les premières à être utilisés dans la conversion d'énergie éolienne.

Leur rotor est monté verticalement par rapport à la terre. Leur fonctionnement est basé sur la poussée axiale du vent et son incidence sur l'arbre du système. Cette catégorie d'éolienne a vu plusieurs prototypes, mais deux seulement ont atteint l'étape d'industrialisation [8].

➤ Rotor de Savonius :

Inventé par le finlandais Sigurd Savonius en 1924, ce rotor est basé sur le principe de "traînée différentielle" utilisé dans les anémomètres: les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. L'effet est ici renforcé par la circulation d'air entre deux demi-cylindres qui augmente le couple moteur (Figure I.1).

De ce fait, l'aérogénérateur à rotor de Savonius est complètement insensible à la direction du vent dans un plan horizontal. La valeur de la vitesse réduite peu élevée environ 8 fois moins que pour les tripales classiques offre des caractéristiques intéressantes du point de vue de l'acoustique et de la sécurité, cet aspect étant fortement lié à la vitesse linéaire en bout de pales. Toutefois, ces propriétés impliquent l'usage d'une génératrice à grand nombre de pôles et très souvent des machines sur mesure.

Le démarrage à faible vitesse de vent est également un point fort. Ainsi, malgré une certaine faiblesse du coefficient de puissance (0.15 à 0.2), les avantages précédents auxquels s'ajoute une "certaine" esthétique en font une solution bien adaptée aux sites urbains.

Les dimensions géométriques d'une telle voilure sont limitées. En effet, vu les efforts mécaniques devant être supportés par le mat, les éoliennes de type Savonius ne peuvent pas être de taille trop imposantes. C'est pour cette raison qu'elles sont utilisées dans l'éolien de petite puissance.[9].

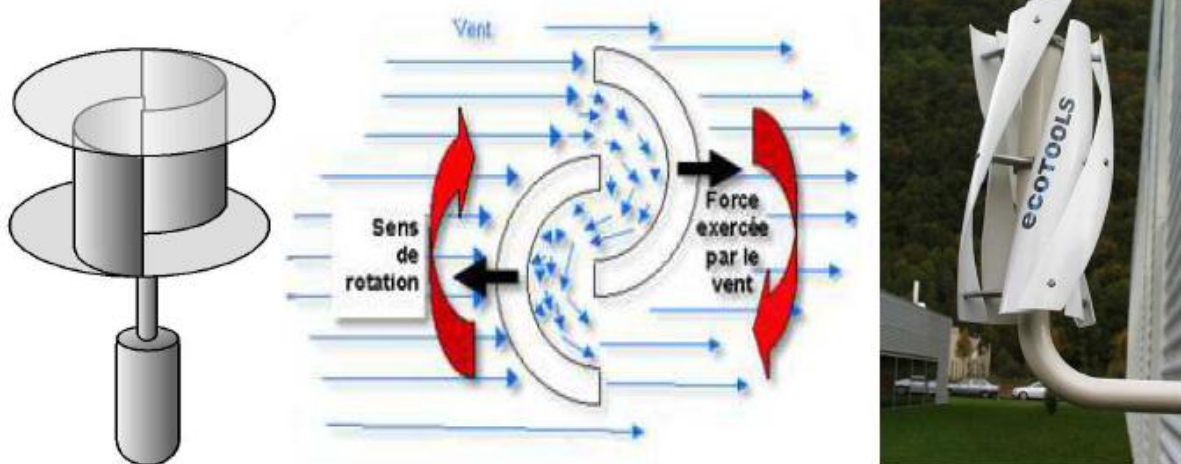


Figure I.1 : Éolienne de Savonius.

➤ **Rotor de Darrieus :**

Conçue par l'ingénieur français George Darrieus en 1931, il est constitué de plusieurs pales biconvexes, en générale deux ou trois montées symétriquement et liées rigidement entre elles, tournant autour d'un axe vertical. Les formes utilisées pour les surfaces décrites par les pales sont cylindriques, tronconiques ou paraboliques. La rotation du système est basée sur le principe de variation cyclique du vent, le rotor est soumis à des forces de direction et intensité variables selon l'orientation de ce profil [10].

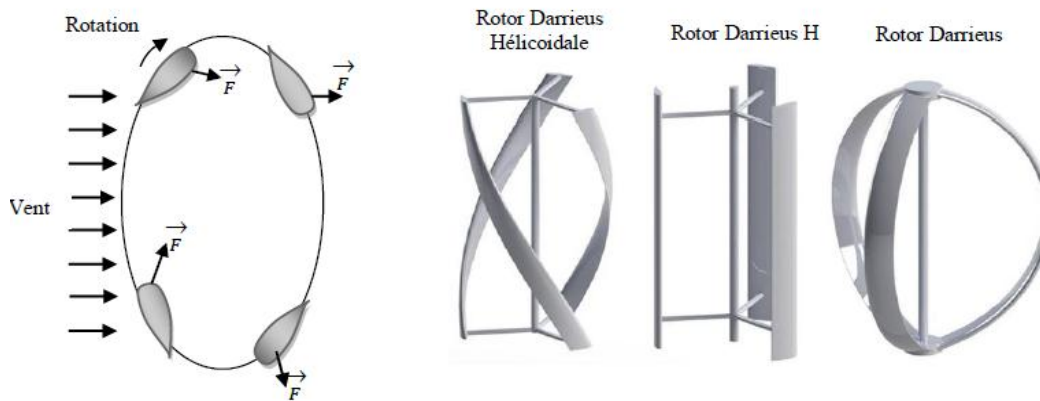


Figure I.2: Structure de Darrieus.

Les principaux avantages des éoliennes à axes verticales sont [11], [10]:

- ☞ Simplicité de conception.
- ☞ Facilité d'entretien et de maintenance de la génératrice et du multiplicateur qui sont posés directement au sol.
- ☞ Absence d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction.
- ☞ Faible bruit du système puisqu'elles tournent à faible vitesse.

Ce type d'éolienne a été abandonné à cause des inconvénients suivants [11], [12]:

- ☞ Faible rendement et variations importantes de la puissance produite.
- ☞ Occupation importante du terrain pour les puissances élevées.
- ☞ Faible vitesse du vent à proximité du sol.
- ☞ Nécessité d'un dispositif auxiliaire de démarrage.

I.3.2-b) Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les structures les plus répandues et sont largement utilisées dans les systèmes de conversion de l'énergie éolienne grâce aux avantages qu'elles apportent. Suivant leur orientation en fonction du vent, les éoliennes à axes horizontal sont dites en « amont » ou en « aval » (figure I.3).

Les forces aérodynamiques appliquées sur les pales créent un couple moteur qui entraîne la rotation du rotor de ce dispositif [13].

Les aérogénérateurs à axe horizontal utilisés pour la production d'énergie électrique sont à trois pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Cependant, il existe d'autres structures à une ou deux pales [14].

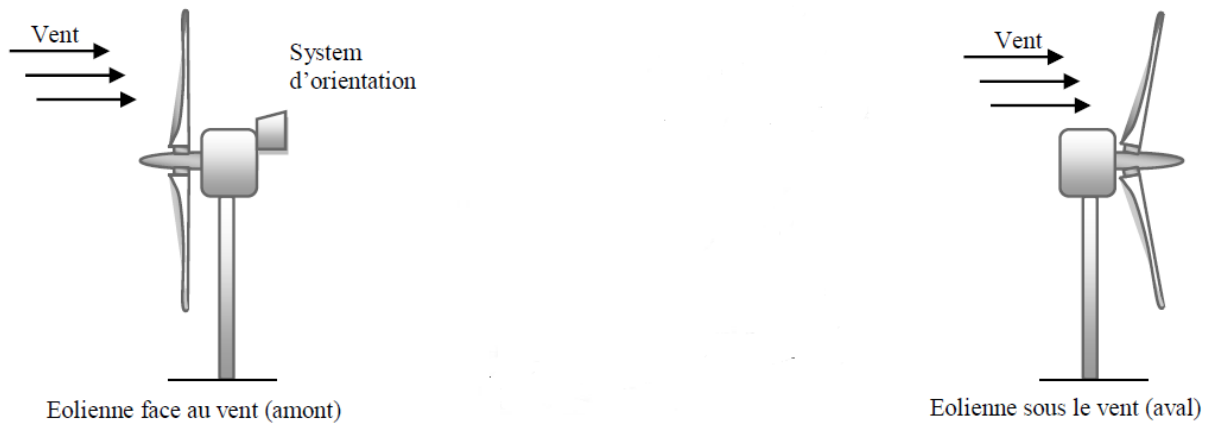


Figure.1.3 : Exemples des éoliennes à axe horizontales.

Les principaux avantages des éoliennes à axe horizontal sont [15] :

- 👉 Une faible occupation du sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- 👉 Cette structure capte le vent en hauteur mieux qu'au voisinage du sol ce qui permet d'obtenir une plus grande vitesse de rotation.
- 👉 Possibilité du contrôle de la vitesse pour avoir le maximum de la puissance générée.
- 👉 Elles ne nécessitent pas de dispositif auxiliaire de démarrage.
- 👉 Elles sont efficaces et possèdent un bon rendement.
- 👉 Le générateur et le système de commande sont inclus dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage

Les principaux inconvénients des éoliennes à axe horizontal sont [16]:

- 👉 Le coût de construction très élevé.
- 👉 La difficulté d'intervention pour la maintenance des appareils qui se trouvent au sommet de la tour.
- 👉 La nécessité d'un système d'orientation des pales.

I.4. Principales composantes d'une éolienne à axe horizontal

Comme l'aérogénérateur à axe horizontal est le plus répandu dans les systèmes de conversion d'énergie éolienne, ce présent travail portera sur l'étude et le fonctionnement de ce type d'aérogénérateurs. Ces principaux constituants sont : la tour, la nacelle et le rotor.

I.4.1 La tour

C'est un pylône qui supporte la nacelle et le rotor de l'éolienne. Généralement elle a la forme d'un tube en acier conique, cylindrique, ou d'un treillis métallique. Elle doit être élevée en hauteur pour capter le maximum d'énergie cinétique du vent et éviter les perturbations près du sol ce qui permettra aussi d'utiliser des pales plus longues. A l'intérieur se trouvent les câbles de transport de l'énergie électrique, les éléments de contrôle, l'appareillage de connexion au réseau de distribution et l'échelle d'accès à la nacelle.



Figure.I.4 : La tour éolienne et ses composants électroniques à l'intérieur.

I.4.2 La nacelle

Regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique : arbres lent et rapide, multiplicateur. Le frein qui permet d'arrêter le système en cas de surcharge. Le générateur qui est généralement une machine synchrone ou asynchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales (frein aérodynamique) et de la nacelle (nécessaire pour garder la surface balayée par l'aérogénérateur perpendiculaire à la direction du vent). A cela viennent s'ajouter le système de refroidissement par air ou par eau [17].



Figure.1.5 : Vue aérienne de la nacelle pendant l'assemblage d'une turbine éolienne.

I.4.3 Le rotor

C'est un ensemble constitué d'un jusqu'à trois pales fixées à un moyeu raccordé à l'arbre primaire de la turbine. Son rôle est de capter et de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Le système à trois pales est le plus utilisé car il procure un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation captée. De plus, il limite les vibrations et le bruit, et permet ainsi une stabilité du mécanisme et une augmentation de la durée de vie du rotor [12].



Figure.1.6 : Transport de pale d'une turbine éolienne.

I.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Les objectifs de la régulation sont d'assurer la sécurité de l'éolienne par vents forts et de limiter la puissance.

Une turbine éolienne est conçue pour développer une puissance nominale P_n à partir d'une vitesse de vent nominale V_n . Pour des vitesses de vents supérieures à V_n , la turbine éolienne doit modifier ses paramètres aérodynamiques afin d'éviter les surcharges mécaniques (turbines, mat et structure), de sorte que la puissance récupérée par la turbine ne dépasse pas la puissance nominale de l'éolienne.

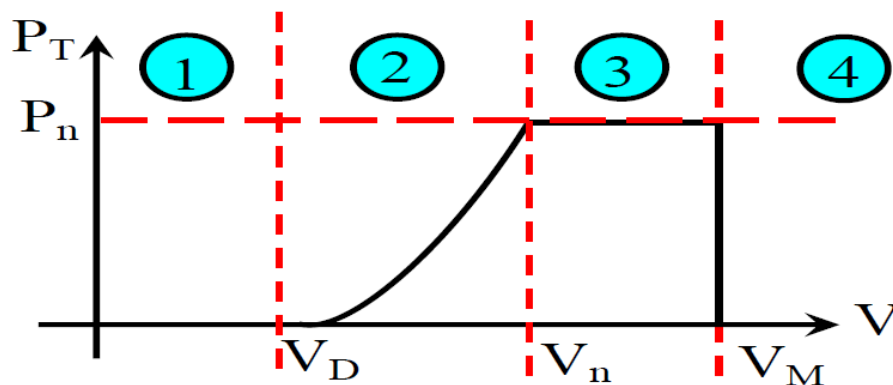


Figure I.7 : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre de la turbine en fonction de la vitesse du vent.

Avec :

V_D : La vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne commence à fournir de l'énergie.

V_M : La vitesse maximale de vent au-delà de laquelle l'éolienne doit être stoppée pour des raisons de sûreté de fonctionnement.

On observe quatre zones de fonctionnement [18]:

Zone I : Elle correspond aux vitesses de vent très faibles, insuffisantes pour entraîner la rotation de l'éolienne, donc $P_{turbine} = 0$ (la turbine ne fournit pas de puissance).

Zone II : Dans cette zone la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent.

Zone III : Elle correspond aux vitesses de vent élevées pour lesquelles la vitesse de rotation de l'éolienne est limitée à une valeur maximale afin de ne pas subir de dégâts.

Zone IV : Dans cette zone le système de sûreté du fonctionnement arrête la rotation et le transfert de l'énergie.

La plupart des grandes turbines éoliennes utilisent trois principes de contrôle aérodynamique pour limiter la puissance extraite à la valeur de la puissance nominale de la génératrice.

I.5.1 Contrôle à calage variable de pale

Sur une éolienne contrôlée à calage variable, le contrôleur électronique vérifie plusieurs fois par seconde la puissance de sortie de l'éolienne. En cas de puissance de sortie trop élevée, les pales pivotent légèrement sur le côté hors du vent. Inversement, les pales seront pivotées de manière à pouvoir mieux capter de nouveau l'énergie du vent, dès que le vent aura baissé d'intensité.

I.5.2 Régulation par décrochage aérodynamique

Ce système est plus léger et moins coûteux que le système précédent, à cause de l'absence du système de contrôle de l'angle de calage; comme il est simple et robuste, du fait qu'il ne dispose d'aucun système mécanique ou électrique auxiliaire. L'angle de calage est fixe, alors que l'angle d'incidence varie avec la vitesse du vent incident, et son augmentation entraîne une augmentation de la traînée, un décrochage progressif des pales et un maintien de la vitesse de rotation de la turbine constante.

Cependant, l'utilisation de cette technique exige une conception rigoureuse de la géométrie des pales et un choix très précis de la vitesse de rotation de la turbine. Aussi, il faut s'assurer que pour une certaine vitesse du vent, l'augmentation de la puissance soit effectivement empêchée [19].

I.5.3 Régulation active par décrochage aérodynamique

Le système "stall actif" est la combinaison des deux systèmes décrits précédemment, il est utilisé pour les machines de très forte puissance. Le décrochage aérodynamique est obtenu progressivement grâce à un dispositif permettant un débattement des pales contre le vent.

L'orientation des pâles étant très réduite, le dispositif mécanique est technologiquement plus simple et moins coûteux [20].

I.6. Technologies des systèmes éoliens

I.6.1 Eoliennes à vitesse fixe

Ces éoliennes sont les premières à avoir reçu une technologie développée. La génératrice qui est généralement une machine asynchrone à cage d'écureuil fonctionnant en hyper-

synchronisme 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 [21].

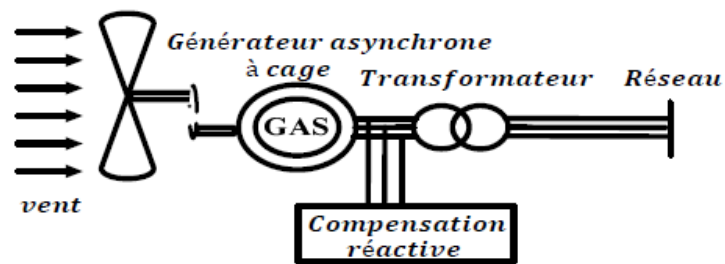


Figure I.8 : Eolienne à vitesse fixe à base de la machine asynchrone à cage.

I.6.1.1 Les avantages de l'éolienne à vitesse fixe

Les principaux avantages de ce type d'éoliennes sont : [22]

- ↳ La simplicité d'implantation
- ↳ L'absence de convertisseurs de puissance pour la commande.
- ↳ Une grande fiabilité.
- ↳ Un faible coût
- ↳ La simplicité d'implantation

I.6.1.2 Les inconvénients de l'éolienne à vitesse fixe.

Ce système possède beaucoup d'inconvénients lors de l'exploitation de l'énergie extraite à savoir [22] :

- ↳ Une puissance extraite non optimisée.
- ↳ Un rendement très faible pour les vents faibles et moyens.
- ↳ Une nécessité de maintenance périodique de la boîte de vitesse.
- ↳ La perte du contrôle de la puissance réactive.

- ☞ L'absence de contrôle du système de magnétisation de la génératrice

I.6.2. Intérêt de la vitesse variable

Si on considère les courbes du coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique, il apparaît clairement l'importance d'un réglage de vitesse. En effet, si la génératrice électrique est de type synchrone ou asynchrone directement couplée au réseau, la vitesse est sensiblement constante et le rendement aérodynamique ne peut être maximal que pour une seule vitesse de vent (λ_{opt}). Un système à deux vitesses de rotation est possible mais la vitesse variable électronique apporte beaucoup plus en terme énergétique [9]. La figure(I.10) montre que la position du maximum de la courbe de puissance en fonction de la vitesse de rotation, change avec la vitesse du vent. Typiquement, un réglage direct ou indirect de vitesse est nécessaire pour bien optimiser les transferts énergétiques [24].

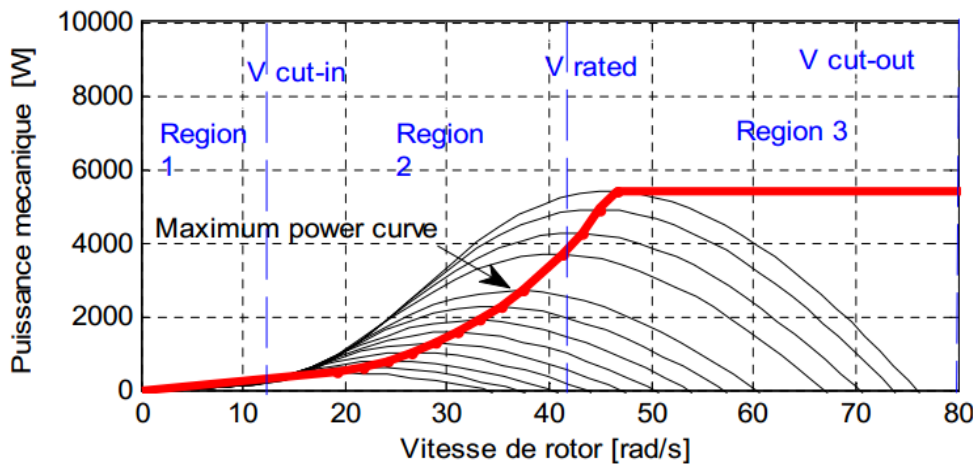


Figure.I.9. Variation de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent.

I.6.3. Eoliennes 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.

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.

I.6.2.1 Systèmes utilisant la machine asynchrone à cage

La génératrice asynchrone à cage peut fonctionner à vitesse variable grâce à l'emploi des convertisseurs de puissance, et peut générer une production de puissance électrique sur une vaste gamme de vitesse de vent figure I. [25].

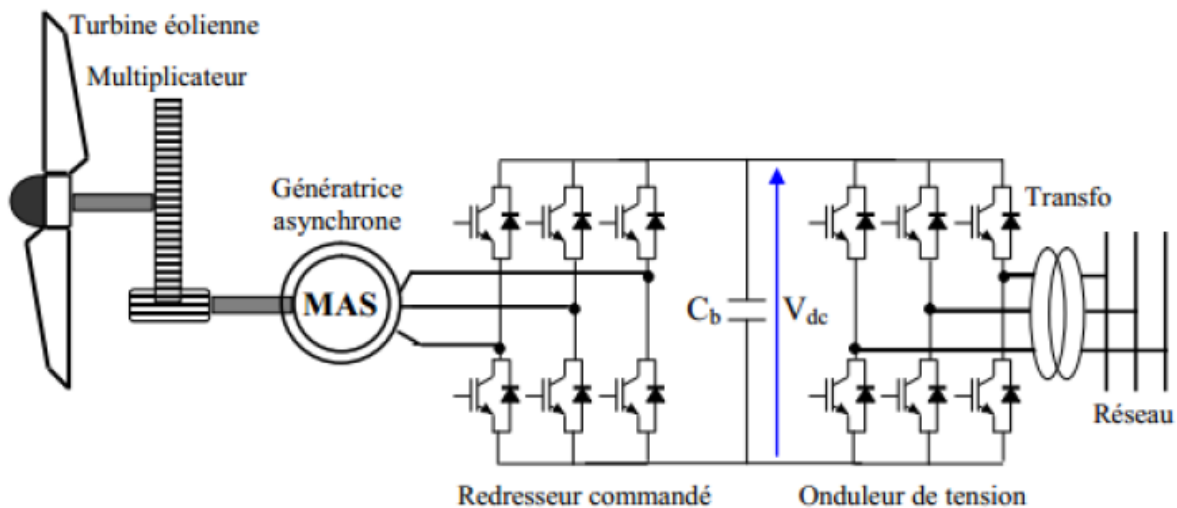


Figure I.10 : Système éolien à base d'une machine asynchrone à cage à vitesse.

La génératrice fournit alors de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance entre celle-ci et le réseau. Cette interface est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue. L'onduleur coté réseau est alors découplé de la machine via le bus continu et il n'y a pas de lien direct entre la fréquence du réseau et celle délivrée par la machine. Un tel dispositif doit cependant être conçu et commandé de façon à limiter les perturbations qu'il est susceptible de générer sur le réseau. En effet, la tension délivrée n'est pas sinusoïdale et peut contenir des harmoniques indésirables. De plus, les convertisseurs sont dimensionnés pour faire transiter la totalité de la puissance échangée entre la génératrice et le réseau, ils représentent par conséquent un investissement financier et conduisent à des pertes non négligeables [26]. Le tableau II.2 présente les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à cage à vitesse variable.

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients du Système éolien à base d'une machine asynchrone à cage.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> 👍 Machine standard et robuste. 👍 Puissance extraite optimisée pour 	<ul style="list-style-type: none"> 👎 Electronique de puissance dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominale.

les vents faibles et moyens.	<ul style="list-style-type: none"> ☞ Le coût de l'installation élevé. ☞ L'augmentation des pertes.
------------------------------	--

I.6.2.2. Systèmes utilisant la machine asynchrone à double alimentation

Dans ce cas là, le stator de la génératrice est directement couplé au réseau alors que l'enroulement rotorique triphasé bobiné avec bagues collectrices y est connecté par l'intermédiaire d'une interface d'électronique de puissance [27]. La double alimentation fait référence à la tension du stator prélevée au réseau et à la tension du rotor fournie par le convertisseur. A la place du rotor à cage d'écureuil, ces machines asynchrones ont un rotor bobiné dont le réglage électronique assure la variation du glissement.

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, Nordex...) utilisent ce type de machine (Figure I.11)[23].

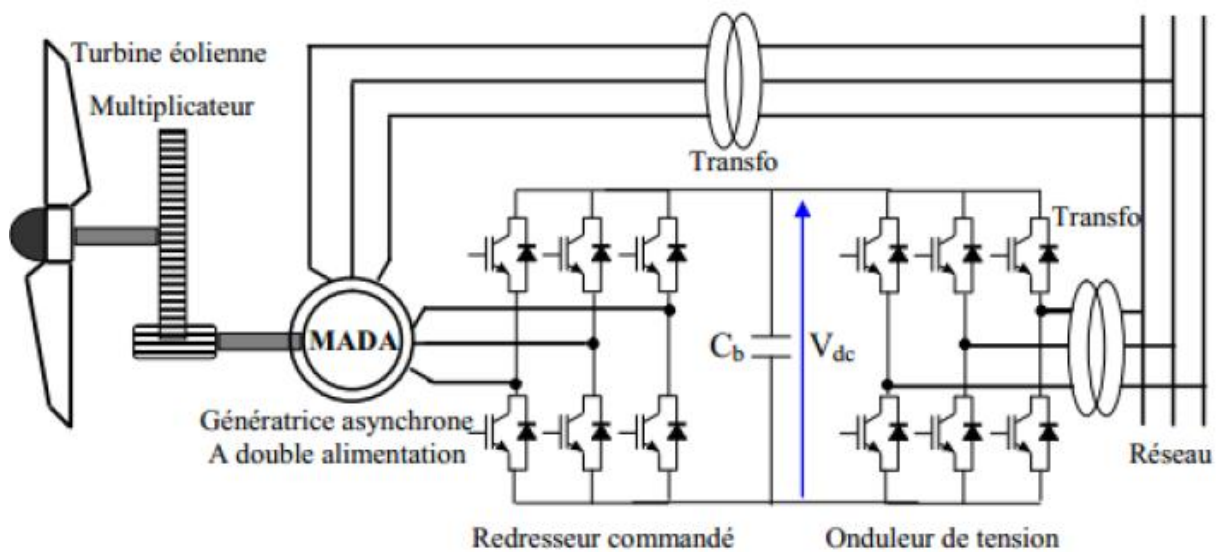


Figure I.11 : Système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation.

Les convertisseurs d'électronique de puissance offrent des possibilités de contrôle extrêmement utiles au pilotage de l'ensemble : contrôle de la qualité des courants et des puissances active et réactive injectés au réseau. La commande de l'onduleur côté rotor permet le contrôle de la puissance convertie. Il s'agit en fait de contrôler le couple du générateur afin d'obtenir la vitesse de rotation souhaitée. La commande de l'onduleur côté réseau permet le contrôle du transfert de puissance. Il s'agit d'assurer le transfert de la puissance rotorique en

contrôlant le niveau de la tension du bus continu à une valeur garantissant un fonctionnement correct de l'onduleur. L'objectif est atteint par le contrôle du courant continu dans l'onduleur et des courants triphasés. Le contrôle de tension fournit une consigne de courant continu d'où l'on déduit des consignes de courants triphasés (ou transformés) fournies aux contrôleurs de courant [29]. Il est donc nécessaire d'insérer des inductances de lissage aux bornes de l'onduleur permettant de réduire significativement les harmoniques de courant [29].

Les convertisseurs de l'électronique de puissance sont ici dimensionnés en fonction du glissement que l'on s'autorise (de l'ordre de $\pm 30\%$ en théorie) donc à 30% de la puissance de la turbine.

Le tableau I.2 présente les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable :

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients Système éolien à base d'une machine asynchrone à double alimentation à vitesse variable.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ☞ Fonctionnement à vitesse variable. ☞ Machine standard. ☞ Connexion de la machine plus facile à gérer. ☞ EP dimensionnée à 30% de puissance nominale. 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ Maintenance de la boîte de vitesse. ☞ Prix de l'électronique de puissance. ☞ Contrôle-commande complexe. ☞ Contact glissant bagues-ballais. ☞ Oscillations mécaniques.

I.6.2.3 Générateur Synchrone à Rotor Bobiné

La connexion directe au réseau de puissance implique que le *GS* tourne à vitesse constante, laquelle est fixée par la fréquence du réseau et le nombre de pôles de la machine. L'excitation est fournie par le système de bagues et balais ou par un système brushless avec un redresseur tournant. La mise en œuvre d'un convertisseur dans un système multipolaire sans engrenages permet un entraînement direct à vitesse variable.

Toutefois, cette solution implique l'utilisation d'un générateur surdimensionné et d'un convertisseur de puissance dimensionné pour la puissance totale du système.[30]

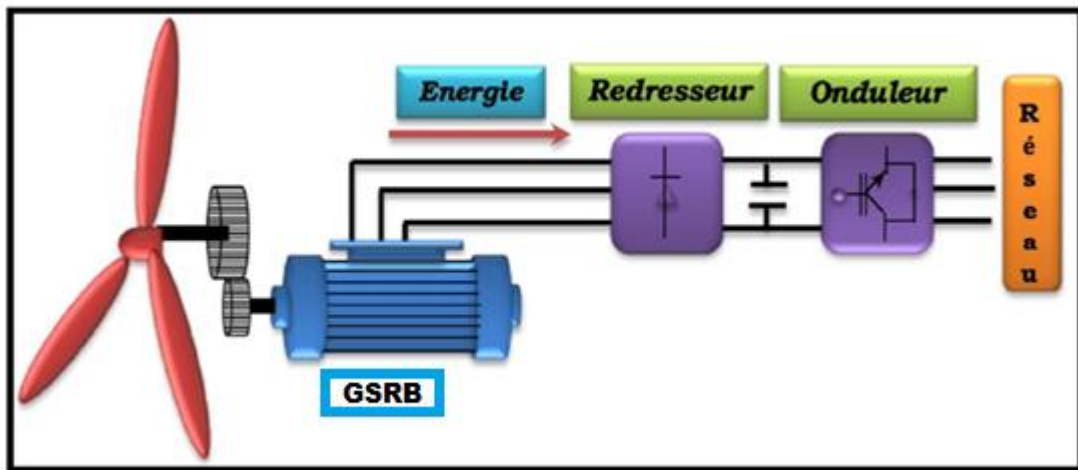


Figure I.12 : Génératrice Synchrone à attaque indirecte à excitation bobinée.

I.6.2.4 Systèmes utilisant la machine synchrone à aimant permanent

Ces dernières années, avec le développement des matériaux magnétiques, la production de machines synchrones à aimants permanents devient compétitive. Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes sans multiplicateur [31].

C'est comme le cas des machines asynchrones à cage, l'interface entre la génératrice et le réseau est généralement constituée d'un redresseur et un onduleur. La meilleure solution et la plus intéressante est consisté à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur figure I.13.

Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau qui assure le transfert de puissance entre la génératrice et le réseau ainsi que l'échange de puissance réactive avec ce dernier. Tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci donc sa vitesse de rotation. Ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau. Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration [32],[33].

Enfin, des structures, interposant un hacheur entre le redresseur et l'onduleur sont également utilisées. La présence d'un hacheur permet alors un contrôle indirect de la

puissance transitée autorisant ainsi un fonctionnement en commande à poursuite du point de puissance maximale « MPPT ».

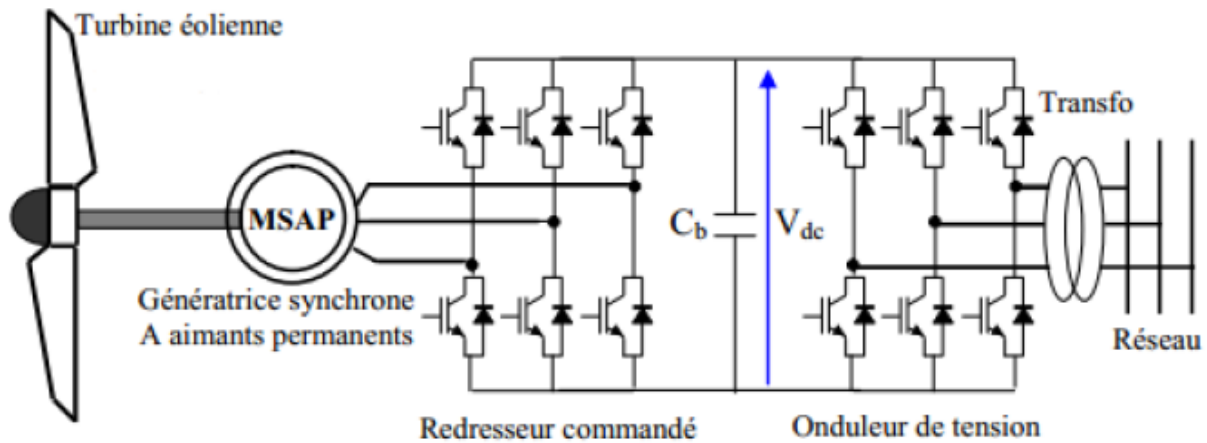


Figure I.13 : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimant permanent à vitesse variable.

Cependant les aimants sont encore chers mais l'extension de leur utilisation dans des domaines très variés (Les micromoteurs aux moteurs de propulsion des navires et aux moteurs de traction ferroviaire) permet d'envisager une rapide réduction des coûts. Les travaux se poursuivent dans ce domaine avec comme principaux objectifs :

- ☞ Réduction des coûts de la machine.
- ☞ Développement de nouvelles technologies permettant une réduction du diamètre.
- ☞ Réduction des coûts des convertisseurs.

Le tableau II.4 présente les avantages et les inconvénients de la machine synchrone à aimants permanents à vitesse variable [34] :

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients de la machine synchrone à aimant permanent à vitesse variable.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ☞ Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse. ☞ Puissance extraite optimisée pour les vents faibles et moyens. ☞ Connexion de la machine plus facile à gérer. ☞ Absence de boîte de vitesse. 	<ul style="list-style-type: none"> ☞ Machine spécifique. ☞ Prix de l'EP et de la machine ☞ Grand diamètre de la machine ☞ EP dimensionnée au moins à 100% de la puissance nominales. ☞ Prix relativement élevé des aimants constitués de terres rares.

I.6.2.4 Comparaison entre les différents fonctionnements d'éoliennes

Il y a encore quelques années, pratiquement toutes les éoliennes fonctionnaient à vitesse fixe. Avec la meilleure qualité et la baisse des coûts de l'électronique de puissance, les éoliennes à vitesse variable sont de plus en plus utilisées. Le Tableau I.4 suivant illustre un comparatif simple entre les différents fonctionnements de système éolien [25].

Tableau I.3: Table Comparatif entre la vitesse fixe et la vitesse variable.

Vitesse fixe	Vitesse variable
<ul style="list-style-type: none"> - Simplicité du système électrique - Plus grande fiabilité. - Faible probabilité d'entrée en résonance des éléments de l'éolienne. - Moins cher. - Fonctionnement a vitesse variable ($\pm 30\%$ de la vitesse nominale). 	<ul style="list-style-type: none"> - -Augmentation du rendement énergétique. - Réduction des oscillations du couple dans le train de puissance. - Réduction des efforts subis par le train de puissance. - Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

I.7 Avantages des éoliennes à base des machines synchrones à aimants permanents par rapport aux autres types de machines

L'avantage le plus évident lors de l'utilisation des aimants au niveau de la production du flux est la suppression des pertes par effet joule du système inducteur.

Un autre avantage de l'excitation par aimants, concerne l'amélioration de la sécurité de fonctionnement. Les moteurs synchrones à aimants sont intéressants du point de vue puissance, rendement, facteur de puissance et moment d'inertie pour les gammes accessibles à leurs utilisations (coût et fiabilité) [35].

Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais. Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple), ainsi la présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace [36].

I.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

La croissance de l'énergie éolienne est évidemment liée aux avantages de l'utilisation de ce type d'énergie. Cette source d'énergie a également des désavantages qu'il faut étudier, afin que ceux-ci ne deviennent pas un frein à son développement.

I.8.1 Avantages

- ☞ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable propre, écologique, fiable, économique, et inépuisable, c'est une énergie qui respecte l'environnement [37].
- ☞ Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂ [38].
- ☞ L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas des déchets toxiques ou radioactifs [39].
- ☞ L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires [39].
- ☞ La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à des nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles [33].
- ☞ C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [39].
- ☞ Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique déjà existant [32].

I.8.2 Inconvénients

- ☞ L'impact visuel, ça reste néanmoins un thème subjectif.
- ☞ Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- ☞ L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [25]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être

implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéroturbines [23].

- ☞ La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production.
- ☞ Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources de l'énergie classique bien qu'en terme du coût, l'éolien puisse sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés.

I.9 Exploitation de l'énergie éolienne

L'exploitation de l'énergie électrique produite par une éolienne peut se faire de deux manières, soit pour être injecté au réseau ou bien pour alimenter une charge isolée.

I.9.1 Eolienne connecté au réseau

C'est la méthode la plus utilisée grâce aux avantages qu'elle apporte. Elle permet de compenser le manque de puissance de l'éolienne par la puissance générée par les centrales conventionnelles connectées aux mêmes réseaux. Cette méthode est moins complexe puisqu'elle facilite au système de commande de l'éolienne pour avoir une puissance optimale.

Les éoliennes raccordées au réseau électrique sont généralement regroupées dans un parc éolien d'environ 5 à 50 machines. On peut aussi retrouver des éoliennes isolées connectées au réseau [40].

Le raccordement de l'éolienne au réseau électrique exige la même fréquence et la même tension que celles du réseau quel que soit la vitesse du vent, soit en gardant la vitesse de rotation de la génératrice constante par l'orientation des pales, soit par l'insertion d'un convertisseur statique [41].

I.9.2 Eolienne alimentant une charge isolée

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés comme: l'alimentation des îles par l'énergie électrique, le pompage d'eau pour l'irrigation des champs agricoles, l'alimentation en électricité des voiliers, des phares et des balises [10].

I.10 Conclusion

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

Nous avons abordé aussi les différentes architectures couramment utilisées dans les systèmes éoliens, ainsi que les différentes méthodes de régulation de la puissance mécanique de l'éolienne. Un intérêt particulier est porté à éolienne à axe horizontale qui présente de grands avantages aux niveaux du coût, de la sûreté de fonctionnement et du rendement.

Dans le chapitre suivant, nous allons modéliser notre chaine de conversion constituée d'une turbine éolienne, d'une génératrice synchrone à aimants permanents et du convertisseur de puissance.