

I.1. Introduction

L'énergie éolienne est connue et exploitée depuis longtemps elle fut l'une des premières sources exploitées par l'être humain après l'énergie du bois. Elle a un rôle de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Elle est en partie issue de l'énergie solaire.

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal). Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones.[1][2][3]

Dans ce premier chapitre, présenter les technologies d'éoliennes ainsi que les différents composants constituant l'aérogénérateur seront brièvement présentés.

Ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens.

I.2. La production d'énergie éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié 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. Après avoir pendant longtemps été oublié, cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers

I.2.1. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).

De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchets radioactifs. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [1].

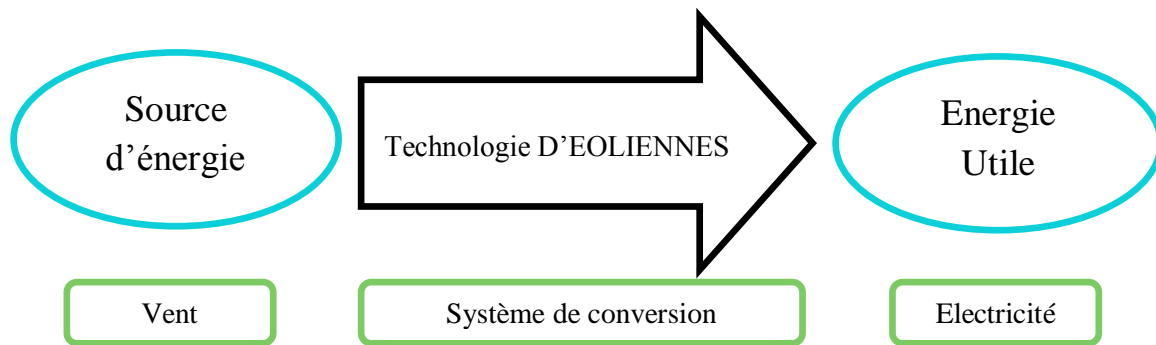


Figure I- 1:Principe d'un système éolien

I.2.2. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

a- Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales. [2].
- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux Energies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier. [2]
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables. [2]
- Ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà [3].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [3].
- Est une énergie abondante, géographiquement diffusée, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). [4]
- L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du Co2. [4]
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours. [5]

b- Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif. [2]
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés.[4]
- 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. [5]
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.[5]
- La rotation de l'hélice peut causer des problèmes particuliers, car elle crée des signaux parasites intermittents qui interfèrent avec les trajectoires des transmissions. [6]

I.2.3. Principaux composants d'une éolienne :

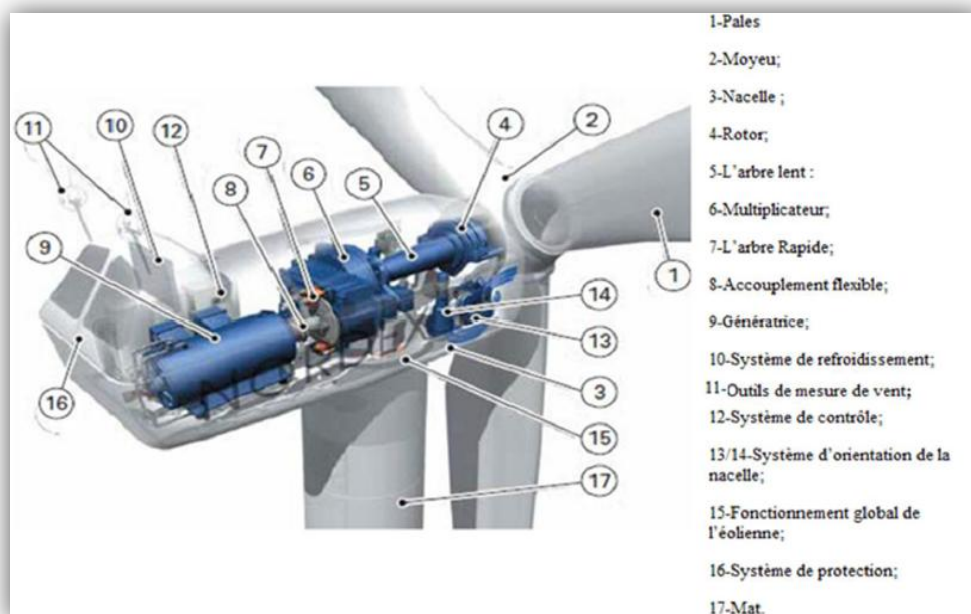


Figure II-2 : L'éolienne à l'intérieur

Elle se compose des éléments suivants [7]:

- **Les mâts:** peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils doivent être de hauteur importante pour bénéficier au maximum de l'énergie de vent. Actuellement les mâts encaissons, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance.[7]
- **La nacelle:** Elle regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande [8].
- **Le rotor :** composé de plusieurs pales (3 en général) et du moyeu, le rotor est entraîné par l'énergie du vent, branché directement au système mécanique qui utilisera l'énergie recueillie, l'énergie captée par l'éolienne est en fonction de la surface balayée par l'hélice et la vitesse du vent, plus le diamètre du rotor est grand plus la surface balayée est importante.[6]
- **Le Moyeu :** c'est l'élément qui supporte les pales. Il doit être capable de résister à des à-coups violents surtout lors du démarrage de l'aérogénérateur ou lors de brusques changements de vitesse de vent. [7]
- **Les pales :** Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie du capteur ainsi que le rendement du moteur éolien. Plusieurs éléments caractérisent ces pales : la longueur, la largeur, le profil, les matériaux et le nombre. Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tels que : (coûts, résistance au climat). [9]
- **Le multiplicateur :** adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique. Il permet de transformer une puissance à couple élevé et à vitesse lente en une puissance à couple faible et vitesse rapide. Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne [7].
- **Le système de refroidissement :** comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. Il existe un certain type d'éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.
- **La génératrice :** la fonction première de la génératrice est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines : une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone. De plus un convertisseur de puissance associé éventuellement à la génératrice selon le type (direct ou indirect) de connexion au réseau [7].

- **L'Anémomètre** : et une girouette situés sur le toit de la nacelle fournissent les données nécessaires au système de contrôle pour orienter l'éolienne et la déclencher ou l'arrêter selon la vitesse du vent [10].

De même le système de commande électrique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent atteint des valeurs très élevées pour assurer la protection de l'éolienne.

I.2.4. Le Rôle :

Le système éolien a pour rôle d'extraire une partie de l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes [11].

- Au niveau de la turbine, qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique. Cette dernière est transmise à la génératrice au moyen d'un arbre de transmission et un éventuel réducteur de vitesse.
- Au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique.

I.2.5. L'énergie éolienne dans le monde :

L'énergie éolienne pourrait fournir le un cinquième de l'électricité mondiale dans les vingt ans. Le marché mondial pour cette énergie a connu une croissance de 41.7% en 2009 et une hausse moyenne de 28.6% par ans au cours des treize dernières années, selon Steve Sawyer, secrétaire général du GWEC (Global Energy Wind Council).[4]

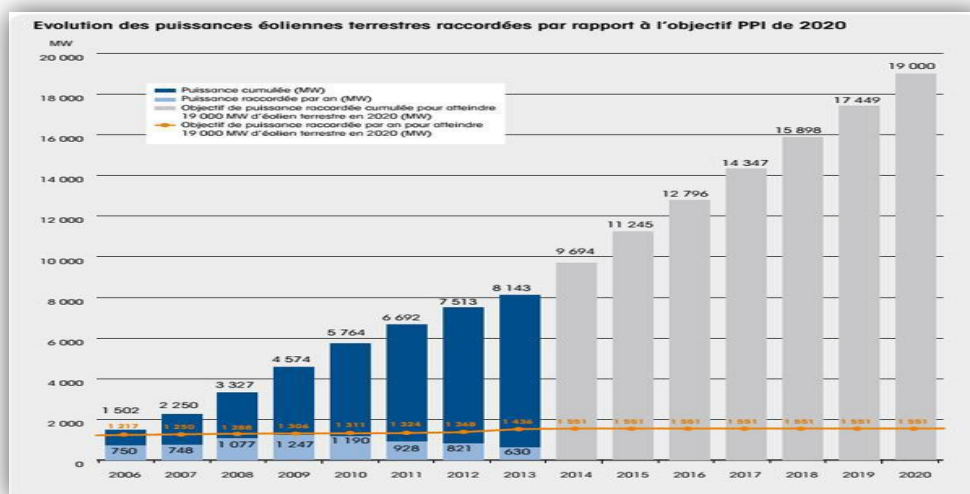


Figure I- 3: capacité totale installée (MW) et prévision 2006-2020.[4]

Dans un scénario optimiste, la capacité totale des éoliennes installées en 2020 serait de 19000Mégawatts/heure (MW/h), soit entre 11.5% et 12.3% de la demande mondiale en électricité (Figure I-3). En 2030, cette forme d'énergie pourrait produire 54000 TW/h, soit être 18.8% et 21.8% de la demande mondiale, selon le rapport. Un autre scénario, plus conservateur, basé sur des projections de l'Agence internationale de l'énergie de l'ONU, table sur 4.8% de l'électricité mondiale produite par l'éolien en 2020, correspondant à un triplement par rapport à la production actuelle. En fin, un scénario médian prévoit que l'énergie éolienne fournira 9.5% de l'électricité produite le monde à la fin de la prochaine décennie.

La puissance éolienne installée dans le monde devrait être multipliée par 3 pour atteindre 910 GW en 2025 et le marché mondial de l'éolien devrait, pour sa part, plus que doubler au cours de cette période, passant de 21 à 47 milliards d'euros.

Les pays qui s'intéressent au développement de l'éolien sont encore en phase de premier investissement (mise en service dans le champ éolien qui n'existaient pas auparavant). De fait, les capacités installées croissent en permanence mais à des rythmes différents selon les pays, et classer les états par puissance installée donne un résultat mouvant d'une année à l'autre. Néanmoins, il ressort des chiffres actuels que les plus gros pays investisseurs sont les pays occidentaux (USA et Europe), mais l'Asie, avec la Chine commence à tenir un rang important [4].

Tableau I- 1: La puissance éolienne totale installée les 10 premiers pays en 2013.

Country	MW	% SHARE
China	16.100	45.4
Germany	3.238	9.1
UK	1.883	5.3
India	1.729	4.9
Canada	1.599	4.5
USA	1.084	3.1
Brazil	948	2.7
Poland	894	2.5
Sweden	724	2.0
Romania	695	2.0
Rest of the world	6.573	18.5
Total.tp.10	28.894	81
World total	35.467	100.0

En 2013, la région Europe –Moyen–Orient domine le marché éolien en détenant 40% du marché mondial. Mais alors que la Chine investit des milliards d'euros dans l'énergie éolienne, plusieurs gouvernements européens ont décidé de réduire les subventions accordées à l'électricité éolienne. Ces décisions pourraient ralentir le marché de l'éolien sur le Vieux Continent, qui ne devrait plus représenter que 34% du marché mondial en 2030. Mais, selon Marcus Tackle, directeur général de Siemens en 2013, le marché mondial de l'éolien va perdre de sa présence en Europe. «Le marché va se déplacer hors d'Europe de manière significative».

Selon le rapport du cabinet de conseil GlobalData, le marché mondial de l'éolien marin, lui, va continuer sa croissance et pourrait être multiplié par dix d'ici la fin de la décennie, passant de 5 gigawatts de puissance installée à 55 GW. En Afrique du Nord, le développement de la puissance éolienne continue en Egypte, Maroc et Tunisie avec respectivement 55MW, 10MW et 34MW de nouvelles capacités installées[4][12].

I.2.6. L'énergie éolienne en Algérie :

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud ouest avec des vitesses supérieures à 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant l'existence de microclimats sur les sites côtiers de Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El Kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud [13].

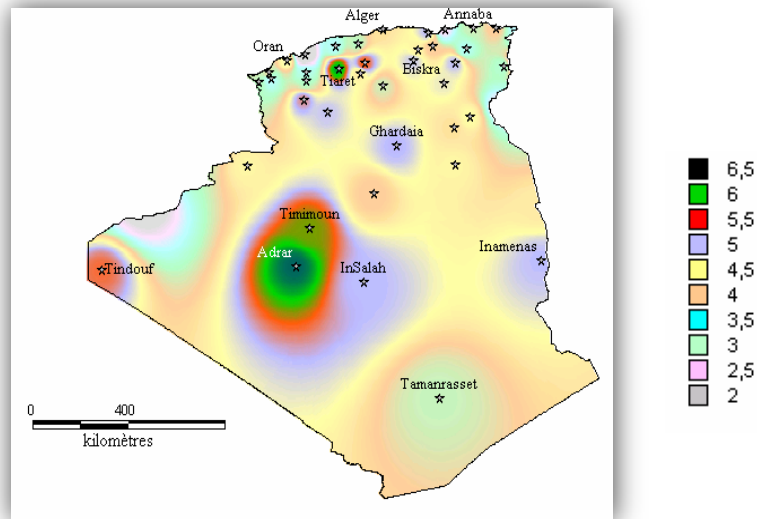


Figure I-4 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l’Algérie estimée à 10 m dusol.

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu’on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu’il s’agit d’installer des systèmes de conversion de l’énergie éolienne.

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l’Algérie sont représentés en figures 1-5 (Eté et Printemps, Hiver et Automne). On Remarque qu’engénéral, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le Reste de l’année.

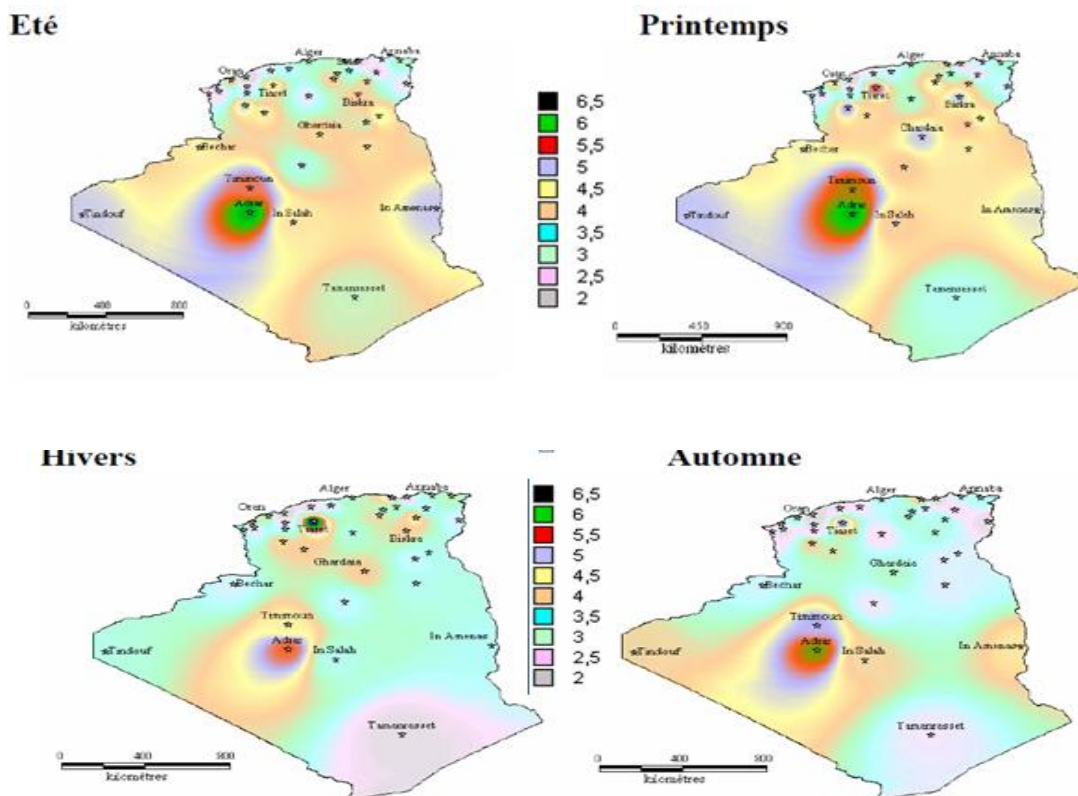


Figure I- 5 : carte saisonnière de la vitesse de vent (m/s) [13]

I.3. L'aérogénérateur :

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [11].

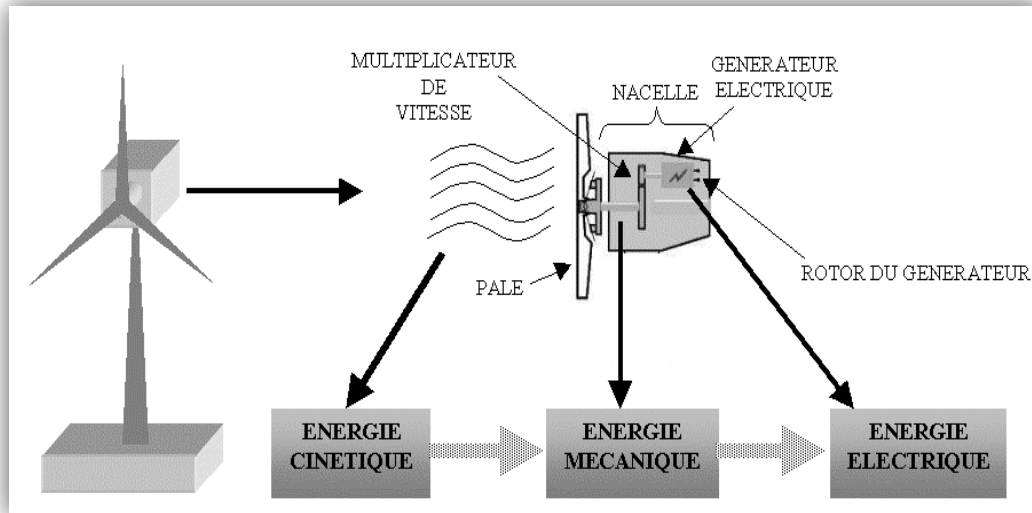


Figure I-6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.3.1. Taille des aérogénérateurs :

Les chercheurs ont eu l'idée que pour exploiter le mieux possible la force du vent, il faut que l'hélice balaie la surface où le vent est maximum, c'est-à-dire le plus haut possible du sol, ce qui demande aux constructeurs des hélices hautes perchées, donc de grands diamètres [7][11].

Les aérogénérateurs sont classés en trois catégories présentées dans le tableau suivant [4].

Tableau I- 2 : taille des éoliennes.

Echelle	Diamètres de l'hélice	Puissance délivrée
<ul style="list-style-type: none"> • Petite 	<ul style="list-style-type: none"> • Moins de 12m 	<ul style="list-style-type: none"> • Moins de 40kw
<ul style="list-style-type: none"> • Moyenne 	<ul style="list-style-type: none"> • 12m a 45m 	<ul style="list-style-type: none"> • De 40kw a 1MW
<ul style="list-style-type: none"> • Grand 	<ul style="list-style-type: none"> • 46m et plus 	<ul style="list-style-type: none"> • 1MW et plus

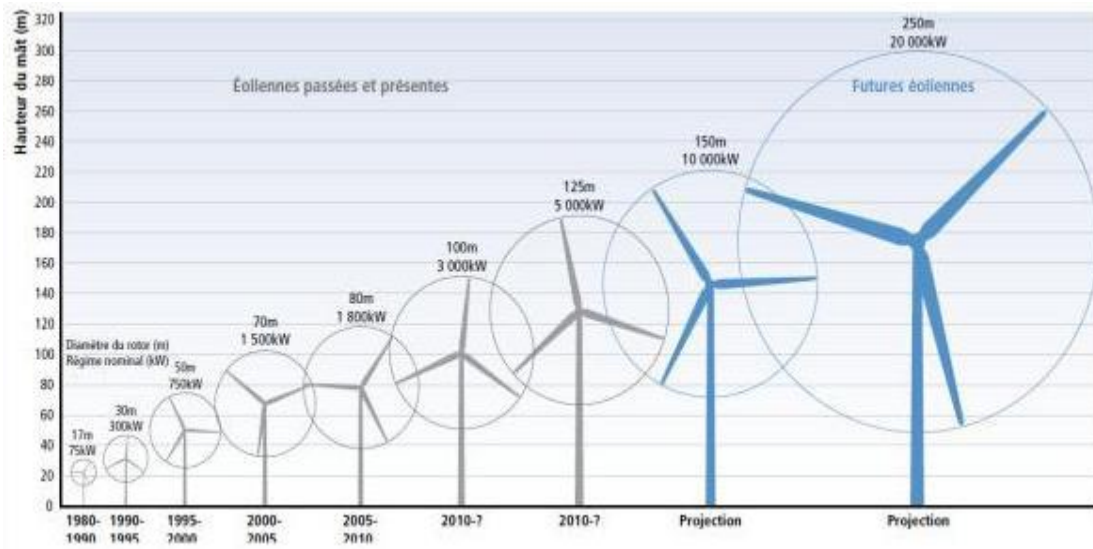


Figure I-7 : Diamètres et puissances des éoliennes.

I.3.2. Différents types d'aérogénérateurs :

La classification des éoliennes peut se faire selon d'autres critères qui influencent beaucoup le procédé de conversion et qui aboutissent à des éoliennes totalement différentes que ce soit au niveau de la conception mécanique (axe horizontal ou vertical) ou leur technologie, (vitesse fixe ou variable) pour la connexion au réseau [4][14].

I.3.2.1. Selon la conception mécanique :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal.[14]

I.3.2.1.a. Eolienne à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical ont été les premières structures développées pour produire de l'électricité paradoxalement en contradiction avec le traditionnel moulin à vent à axe horizontal.

Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol donc facilement accessible et il s'agit d'une turbine à axe vertical de forme cylindrique qui peut facilement être installée sur le toit d'une maison moderne et dont les avantages sont : faible impact visuel, pratiquement pas de bruit et très grande tolérance aux vents forts [7]. Il existe des systèmes grâce auxquels les ailes se décalent plus ou moins pour augmenter l'étendue des vitesses d'action. Si la vitesse du vent est basse, les ailes sont complètement déployées, si la vitesse est trop forte, les ailes sont complètement fermées et l'éolienne forme un cylindre. Même si quelques grands projets industriels ont été réalisés, les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées. [15]

a.1. Aérogénérateurs à rotor de Darrieus :

Ce type d'aérogénérateur est basé sur le fait qu'un profil placé dans la direction d'écoulement de l'air est soumis à des forces de direction et d'intensité variable selon l'orientation de ce profil voir (Figure.I.8). La résultante de ces forces génère un couple moteur entraînant l'orientation du dispositif. [16]

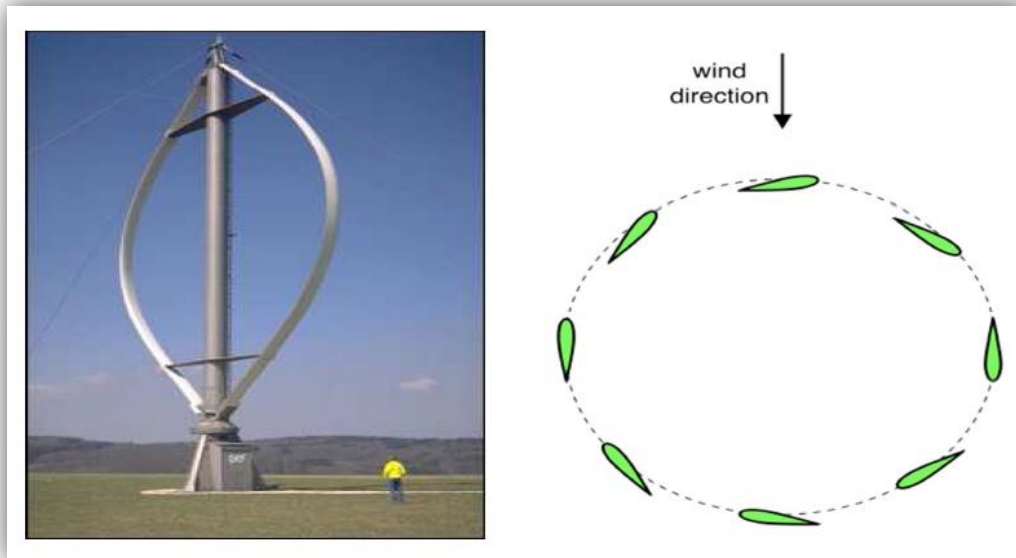


Figure. I. 8. Aérogénérateur à axe vertical (structure de Darrieus)

a.2. Aérogénérateurs à rotor de Savonius :

Ils sont basés sur le principe de la traînée différentielle qui stipule qu'un couple moteur peut être obtenu par une pression différente exercée par le vent sur les parties concaves et convexes de la structure (voir Figure.I.9). [16]

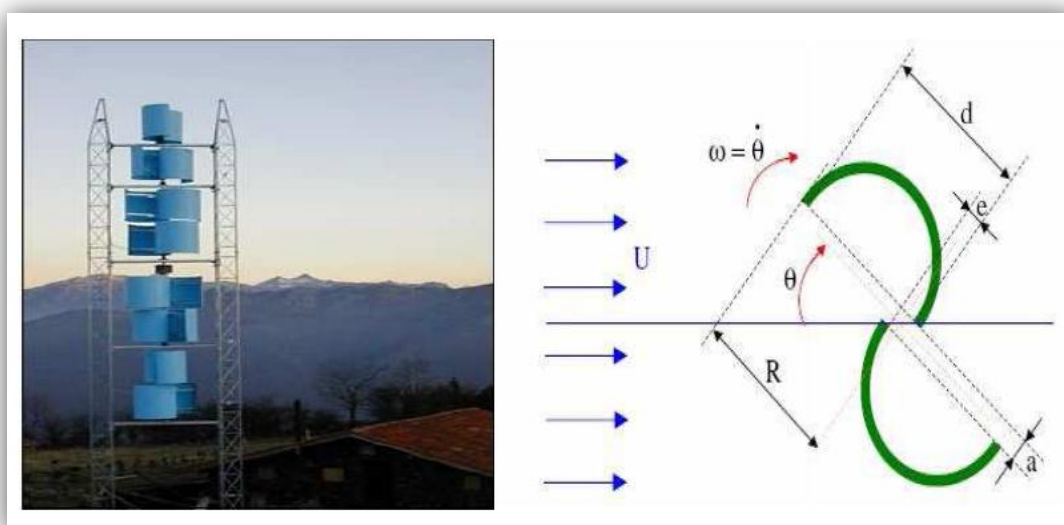


Figure. I.9. Aérogénérateur à axe vertical (structure de Savonius)

I.3.2.1.b. Eolienne à axe horizontal :

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.[3][15]

Aujourd'hui, pratiquement les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontales. Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu à 120 m pour une puissance de 6MW.



Figure. I. 10. Aérogénérateur à axe horizontal

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal.

b.1. Les éoliennes à marche lente :

Les éoliennes à marche lente sont constituées d'un grand nombre de pales (entre 10 et 40) (voir Figure I.11). Ce type d'éolienne sont défini par leur inertie importante et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre (maximum de 10 m) ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.

Dans cette structure le coefficient de puissance C_p atteint rapidement sa valeur optimale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite.[16]

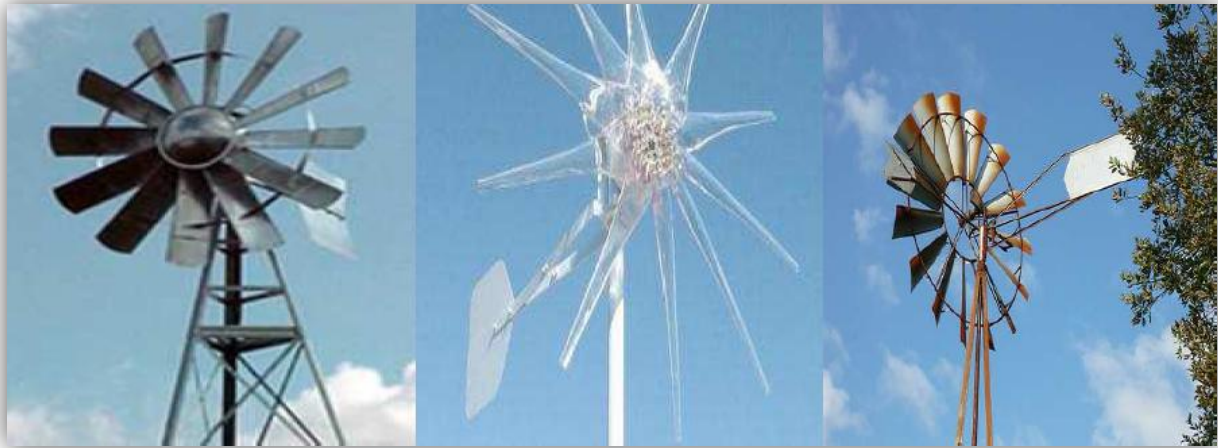


Figure. I. 11. Aérogénérateur à axe horizontal à marche lente

b.2. Les éoliennes à marche rapide :

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus utilisées et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement trois pales fixes ou orientables pour extraire le maximum de puissance cinétique de vent et pour contrôler la vitesse de rotation à chaque instant. Leur C_p atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente contrairement aux éoliennes à marche lente. Les éoliennes à marche rapide fonctionnent rarement en dessous d'une vitesse de vent de 3.5 m/sec[16].



Figure. I. 12. Aérogénérateur à axe horizontal à marche rapide

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal à March rapide :

- **Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif. [17]
- **Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée, car plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances (pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité). Les pales des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela, il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction. [17]

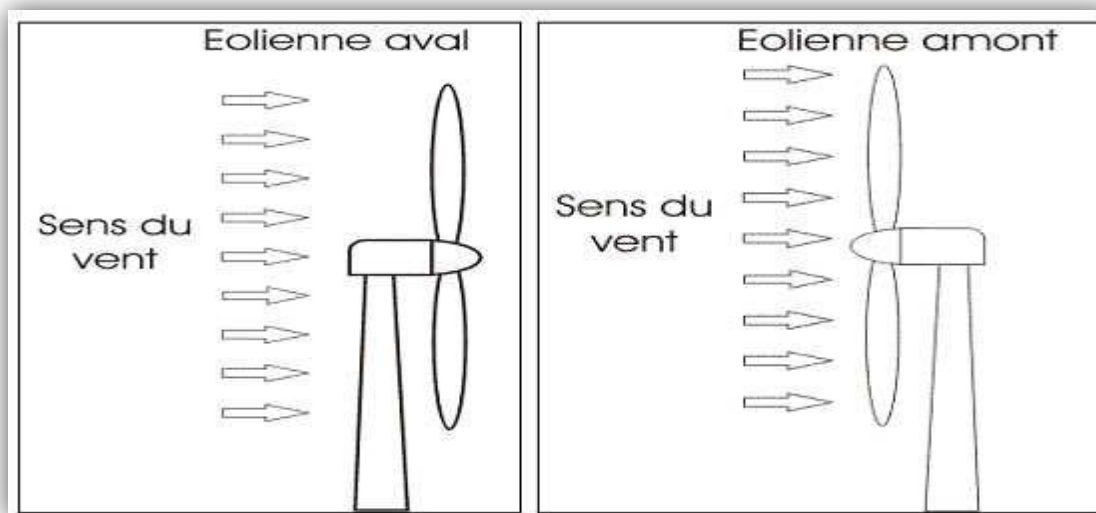


Figure I- 13:Eolienne sous le vent Figure I- 14:Eolienne face au vent

I.3.2.2. Selon la technologie :

Il s'agit des différents types de machines électriques utilisées ; on distingue deux grandes familles: les éoliennes à vitesse fixe et les éoliennes à vitesse variable. On s'intéresse aux éoliennes de grandes puissances.

I.3.2.2.a. Les Éoliennes à vitesse fixe :

Les éoliennes à vitesse fixe sont les premières à avoir été développées. Elles reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique (figure I.15). Sa vitesse Ω_{mec} est alors imposée par la fréquence du réseau et par le nombre de paires de pôles de la génératrice. Cette machine est entraînée par un multiplicateur et sa vitesse est maintenue approximativement constante par un système mécanique d'orientation des pales (pitch control). [3]

Les éoliennes à vitesse fixe sont utilisées principalement pour de faibles puissances (généralement inférieures à 1 MW). Elles sont appréciées pour leur robustesse et leur simplicité mécanique facilitant la maintenance. Par contre la puissance extraite n'est pas optimisée (vitesse fixe), le coût de maintenance essentiellement imputé au multiplicateur est élevé et la puissance réactive n'est pas contrôlée (uniquement compensée). Par ailleurs la connexion directe de la génératrice au réseau entraîne une très forte sensibilité lors de la présence de défaut sur celui-ci. De plus les variations du couple mécanique sont fréquentes puisque le système d'orientation des pales est souvent en action pour pallier les variations de la vitesse du vent. Ces variations de couple produisent de brusques variations du courant débité sur le réseau entraînant ainsi des perturbations. [18]

Cette configuration présente les inconvénients suivants :

- Un dispositif consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone,
- Bruyant, à cause de la modification du système d'orientation des pales fortement sollicité.
- Variations fréquentes du couple mécanique à cause du mouvement des pales pour garder une vitesse constante, ce qui entraîne des variations rapides du courant dans le réseau,
- Impossibilité de réglage de la puissance générée.

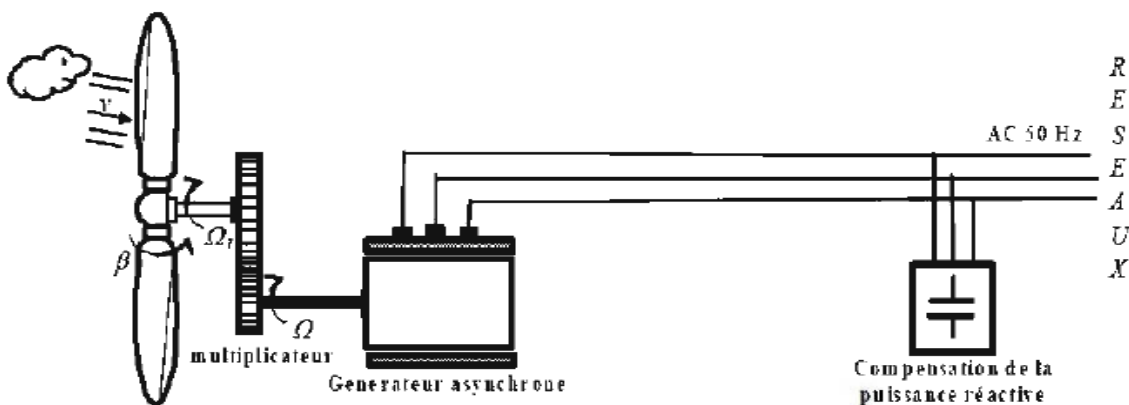


Figure I- 15 : fonctionnement à vitesse fixe

I.3.2.2.b. Les éoliennes à vitesse variables :

Les éoliennes à vitesse variable sont actuellement les plus utilisées dans l'industrie. Le terme vitesse variable désigne le fait que la vitesse de la turbine est indépendante de la fréquence du réseau électrique. L'avantage principal d'opérer la turbine à vitesse variable est de maximiser la capture de l'énergie disponible dans le vent. Selon la référence, une éolienne à vitesse variable peut aller chercher de 8 à 15 % plus d'énergie dans le vent annuellement qu'une éolienne à vitesse fixe. [5].

Les avantages principaux de la vitesse variable comparée à la vitesse fixe sont les suivants [18] :

- La simplicité du système d'orientation des pales. Grâce au contrôle de la vitesse du générateur, les constantes de temps mécaniques des pales peuvent être plus longues, réduisant la complexité du système d'orientation des pales et son dimensionnement par rapport à la puissance nominale P_n ;
- La réduction des efforts mécaniques grâce à l'adaptation de la vitesse de la turbine lors des variations du vent. De ce fait, l'incidence des rafales de vent sur la puissance générée peut être affaiblie;
- La réduction du bruit lors des fonctionnements à faible puissance car la vitesse est lente;
- L'autorisation d'une meilleure intégration de l'éolienne dans le réseau électrique;
- L'augmentation de la plage de fonctionnement, notamment pour les faibles vitesses de vent où le maximum de puissance peut être aisément converti.

On présente trois structures existantes des éoliennes à vitesse variable : [14]

- Le premier est l'utilisation d'une machine asynchrone à cage connectée au réseau par l'intermédiaire d'un convertisseur électronique de puissance permettant le fonctionnement à vitesse variable;
- La deuxième est l'utilisation d'une machine asynchrone à double alimentation pilotée au rotor par un convertisseur électronique.
- La troisième utilise une machine synchrone à rotor bobiné ou à aimant.

b.1. Eolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à cage :

La figure (I.16) montre la structure concernée.

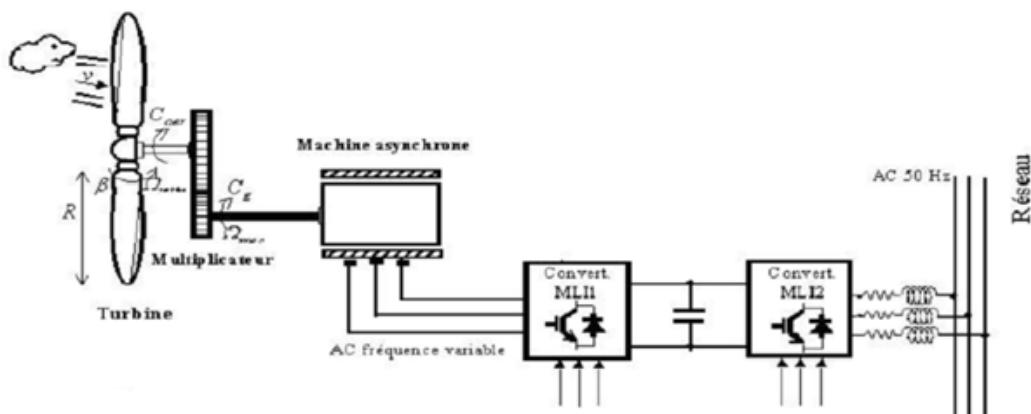


Figure I- 16: éolienne à vitesse variable basée sur une machine asynchrone à cage

b.2. Eolienne à base d'une machine asynchrone à double alimentation :

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) a été utilisée pendant des années, pour les entraînements à vitesse variable. Pour les éoliennes utilisant cette machine comme génératrice (GADA), le stator de celle-ci est directement couplé au réseau alors que son rotor est connecté aussi au réseau mais à travers une interface composée de deux convertisseurs statiques (convertisseur coté GADA et convertisseur coté réseau) (figure I.17). [18]

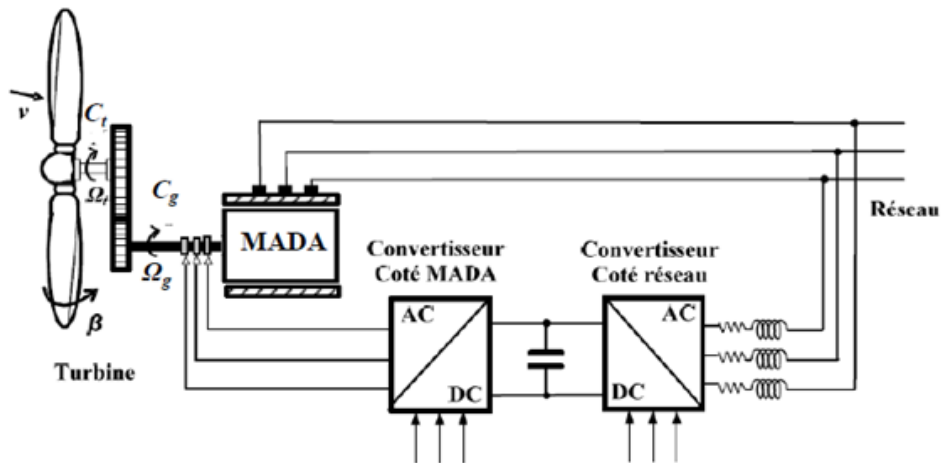


Figure I- 17: éolienne à vitesse variable basée sur une MADA

b.3. Eolienne à base d'une machine synchrone :

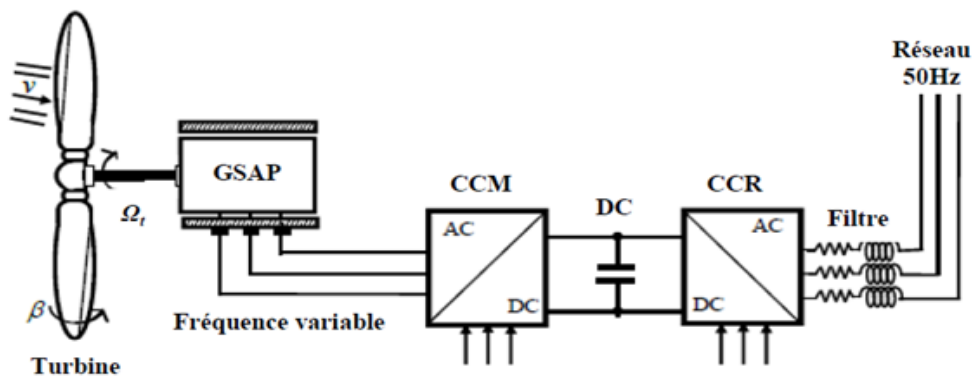


Figure I- 18: éolienne à entraînement direct basée sur un GSAP

b.4. Intérêt de la vitesse variable :

On donne sur la figure (I.19) la caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent. [12][19]

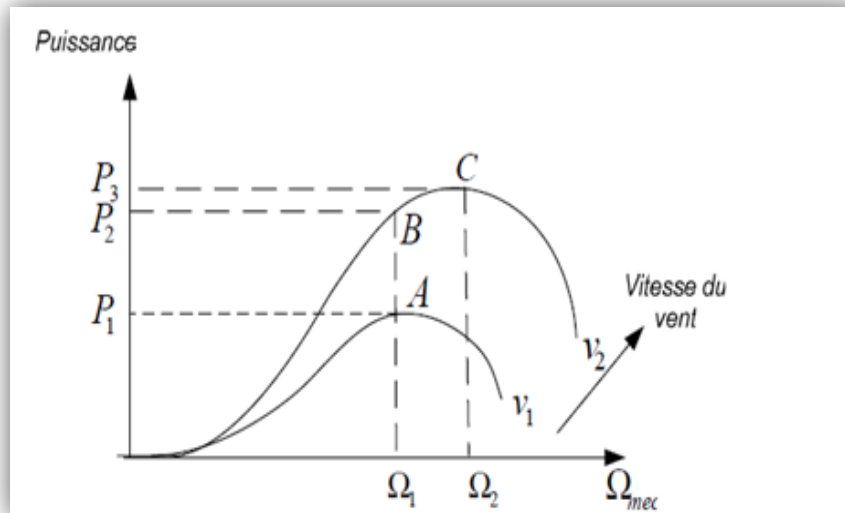


Figure I- 19 : Caractéristiques de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.

Pour une vitesse du vent v_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance nominale P_1 (point A). Si la vitesse du vent passe de v_1 à v_2 , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance P_2 se trouve sur la 2^{ème} caractéristique (point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure Ω_2 , il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée. Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence Ω_{ref} calculée pour maximiser la puissance extraite.

a. Avantages.

- Vitesse variable sur toute la plage de vitesse.
- Puissance extraite optimisée.
- Connexion au réseau plus facile à gérer.
- Absence du multiplicateur de vitesse (pour les machines synchrones a grand nombre de pôles).

b. Inconvénients.

- Machine spécifique à plusieurs paires de pôles donc très encombrée et de grand diamètre
- Électronique de puissance dimensionnée à au moins 100% puissance nominale donc plus chère
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés
- Coût de la machine élevé surtout dans le cas d'une machine synchrone à aimant.

I.3.3. Les différentes zones de fonctionnement à vitesse variable :

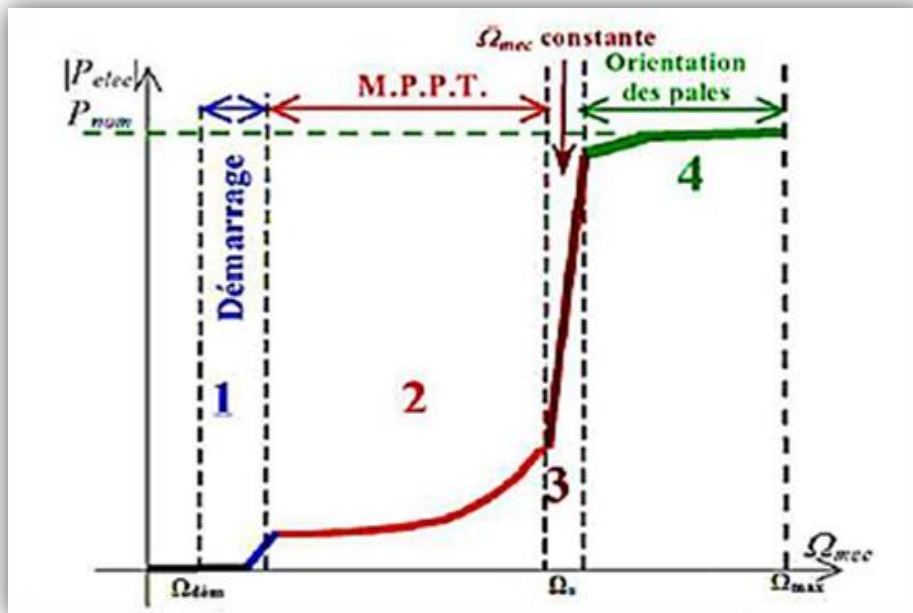


Figure I- 20: les zones de fonctionnement à vitesse variable

Zone1 : zone de démarrage, la vitesse du vent est trop faible, on aura un mouvement des pales mais la puissance produite est quasi nulle. $P_t = 0$, la turbine ne fonctionne pas ;

Zone 2: la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent, l'éolienne extrait le maximum de la puissance captée (MPPT) pour avoir un fonctionnement optimal jusqu'à ce que le vent atteigne une vitesse nominale, ce fonctionnement est réalisé avec un angle de calage constant et minimal afin d'obtenir un C_p maximal, dans cette zone la vitesse mécanique varie et peut atteindre une valeur proche de la valeur nominale.

Zone 3: la vitesse de rotation est maintenue constante par un régulateur de vitesse et la puissance fournie par l'arbre reste égale à P_n .

Zone 4 : la vitesse du vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeau ($\beta = 90^\circ$).

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous intéresserons plus particulièrement à des points de fonctionnement de l'éolienne se situant dans la zone 2 ou phase MPPT.[6][9][20]

I.3.4. Synthèse des différents types d'éoliennes :

Nous résumons les avantages et les inconvénients de chaque type dans le tableau. Il est à noter que nous visons par cette étude les éoliennes à vitesse variable basées sur des génératrices asynchrones à double alimentation pilotées par le rotor au moyen des convertisseurs électroniques de puissance.[12][13][21]

Tableau I-3 : Différentes éoliennes utilisées.

Type d'éolienne	Avantages	Inconvénients
MAS Vitesse Fixe	<ul style="list-style-type: none"> . Machine robuste . Faible coût . Pas d'électronique de puissance 	<ul style="list-style-type: none"> . Puissance extraite non optimisée . Maintenance boîte de vitesse . Pas de contrôle de l'énergie réactive . Magnétisation de la machine imposée par le réseau
MADA Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> . Fonctionnement à vitesse variable . Puissance extraite optimisée . Electronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominale . Machine standard . Connexion de la machine plus facile à gérer . Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur le réseau 	<ul style="list-style-type: none"> . Maintenance boîte de vitesse . Prix de l'électronique de puissance. . Contrôle – commande complexe . Contact glissant bagues - balais
MSAP Vitesse Variable	<ul style="list-style-type: none"> . Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse . Puissance extraite optimisée pour les vents faibles. . Connexion de la machine facile à gérer . Possibilité d'absence de boîte de vitesse 	<ul style="list-style-type: none"> . Prix de l'électronique de puissance . Machine spécifique . Grand diamètre de machine . Electronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice

I.4. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons décrit en premier lieu les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne ainsi que des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde sans oublier l'Algérie.

Aussi les types des aérogénérateurs ainsi que les différents constituants d'un aérogénérateur à vitesse variable. Ensuite, nous avons présenté les deux technologies des éoliennes à savoir les éoliennes à vitesse fixe et celles à vitesse variable.

La dernière partie de ce chapitre présente une petite introduction sur la zone de fonctionnement (zone de l'extraction maximale de la puissance MPPT). Et les avantages et les inconvénients des différentes éoliennes utilisées.

On s'intéressera dans le chapitre suivant à la modélisation de la turbine éolienne et la machine asynchrone double alimentation.