
CHAPITRE I :
GENERALITES SUR LES SYSTEMES
EOLIENS

I. LES SYSTEMES EOLIENS

I.1. Introduction

Ces dernières années, l'intérêt d'utilisation d'énergies renouvelables ne cesse d'augmenter, car l'être humain est de plus en plus concerné par les problèmes environnementaux. Parmi ces énergies, on trouve l'énergie éolienne. 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 ou asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

I.2. 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 déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [5].

Une éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis en énergie électrique, en retrouve dans les différentes configurations les éléments de base à savoir [5]:

- l'hélice qui transforme le vent en énergie mécanique.
- la transmission mécanique par l'arbre.
- la génératrice qui fait la conversion mécanique-électrique.
- une liaison électrique.

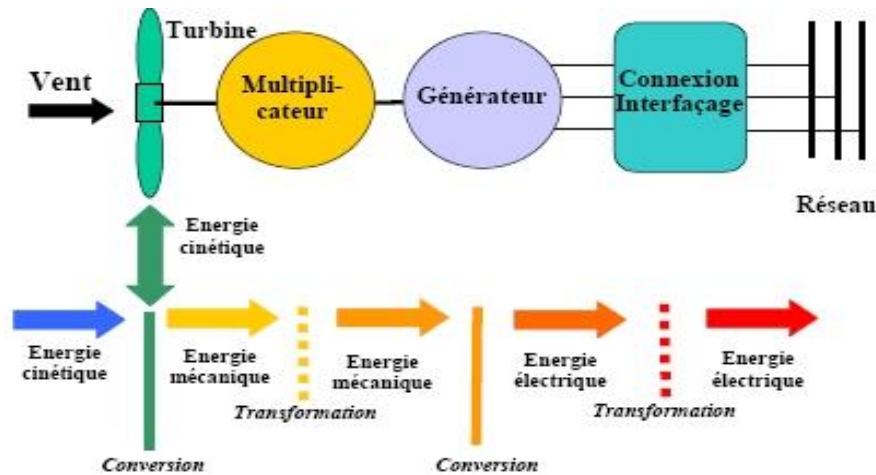


Fig.I.1: Conversion de l'énergie cinétique du vent

I.3. Développement de l'énergie éolienne

L'éolien a eu une croissance moyenne annuelle de 40 % ces 5 dernières années. Ce développement s'est surtout exprimé en Europe. L'énergie éolienne est la source d'énergie qui croît le plus vite dans le monde. Cette progression est énorme par rapport à d'autres types d'énergies plus traditionnelles, telle que l'énergie nucléaire avec une croissance de 1% ou le charbon qui n'a pas du tout augmenté dans les années 90. Les perspectives sont tout aussi spectaculaires. L'EWEA (Européen Wind Energy Association) estime que 12% de l'électricité mondiale sera d'origine éolienne en 2020 et plus de 20% en 2040.

I.3.1. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans le monde

Les pays qui s'intéressent au développement de l'éolien sont encore en phase de premier investissement (mise en service de champs d'éoliennes 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 (Amérique et Europe), mais

l'Asie, avec l'Inde et la Chine, commence à tenir un rang important [6].

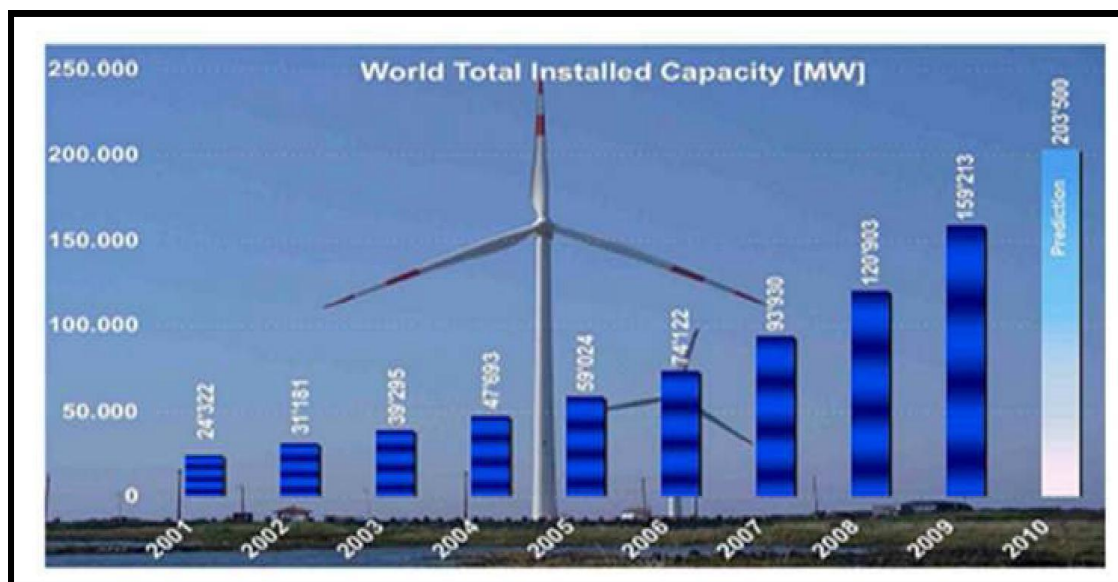


Fig.I.2: Capacité totale installée (MW) et prévisions 2001-2010.[6]

Dans la période 1991-2001, les marchés de turbine des éoliennes ont vu une croissance rapide d'une moyenne de 40% par an, et dans cette industrie énergétique de croissance lente, une telle croissance était très rapide en effet. Le tableau I.1 montre la génération d'électricité éolienne dans le monde.

| Pays | MW |
|-------------|--------|
| Allemagne | 20 622 |
| Espagne | 11 615 |
| États-Unis | 11 603 |
| Inde | 6 270 |
| Danemark | 3 136 |
| Chine | 2 405 |
| Italie | 2 123 |
| Royaume-Uni | 1 963 |
| Portugal | 1 650 |
| France | 1 567 |
| Pays-Bas | 1 560 |
| Canada | 1 451 |
| Japon | 1 394 |
| Autriche | 965 |
| Australie | 817 |
| Grèce | 756 |
| Irlande | 643 |

| | |
|---------------|--------|
| Suède | 564 |
| Norvège | 325 |
| Brésil | 237 |
| Total mondial | 73 904 |

Tableau.I.1: La génération d'électricité éolienne dans le monde. Source : World Wind Ennery Association.[5]

Actuellement l'Allemagne produit 18GW (en 2005) un tiers des éoliennes installées dans le monde entier et environ la moitié des centrales éoliennes de l'EU. En 2004 l'utilisation de la force du vent, en Allemagne, a permis d'économiser 21.4 millions de tonnes de CO₂, avec une production de 26.5 milliards de KWh d'ici 2030, elles devraient fournir jusqu'à 25 GW [5].

I.3.2. Situation actuelle de l'énergie éolienne dans l'Algérie

Le domaine de l'énergétique éolienne a connu un grand essor avec l'élargissement de l'installation d'aérogénérateurs pour la production électrique dans les pays industrialisés. De plus, la volonté de réduire les émissions de gaz responsables de l'effet de serre, a poussé beaucoup de pays à s'intéresser davantage aux énergies renouvelables dont fait partie l'éolien. Les réalisations algériennes dans le domaine de l'énergie propre dite renouvelable sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution du parc énergie renouvelable mondial ou européen, qui a atteint des objectifs très avancés. Par ailleurs, l'étude de la rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir le vent.

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 un climat très diversifiés. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes. Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas télien 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.

La carte représentée en figure (1.3) montre que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement le Sud-Ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/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 d'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.

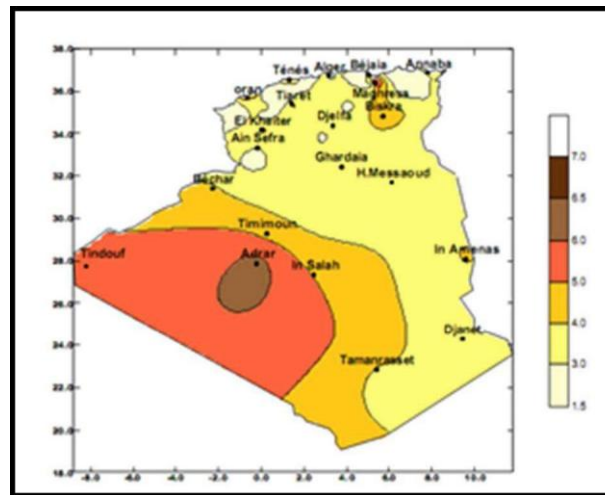


Fig.I.3: Carte annuelle de la vitesse moyenne du vent à 10m du sol (m/s).[4]

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. Les cartes saisonnières représentées en figure (1.4) montrent clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventées que le reste des saisons et que le printemps en est la plus ventée. Néanmoins, on remarque que la région de Tيارت fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver. D'un autre côté, des régions telles que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année [4].

La première expérience du pompage d'eau avec un éolien en Afrique a été effectuée à Adrar l'an 1957 au Ksar sidiassa, pour l'irrigation de 50 Hect, ce système éolien a été saboté en 1962 à la sortie des français de l'Algérie [8] [7].

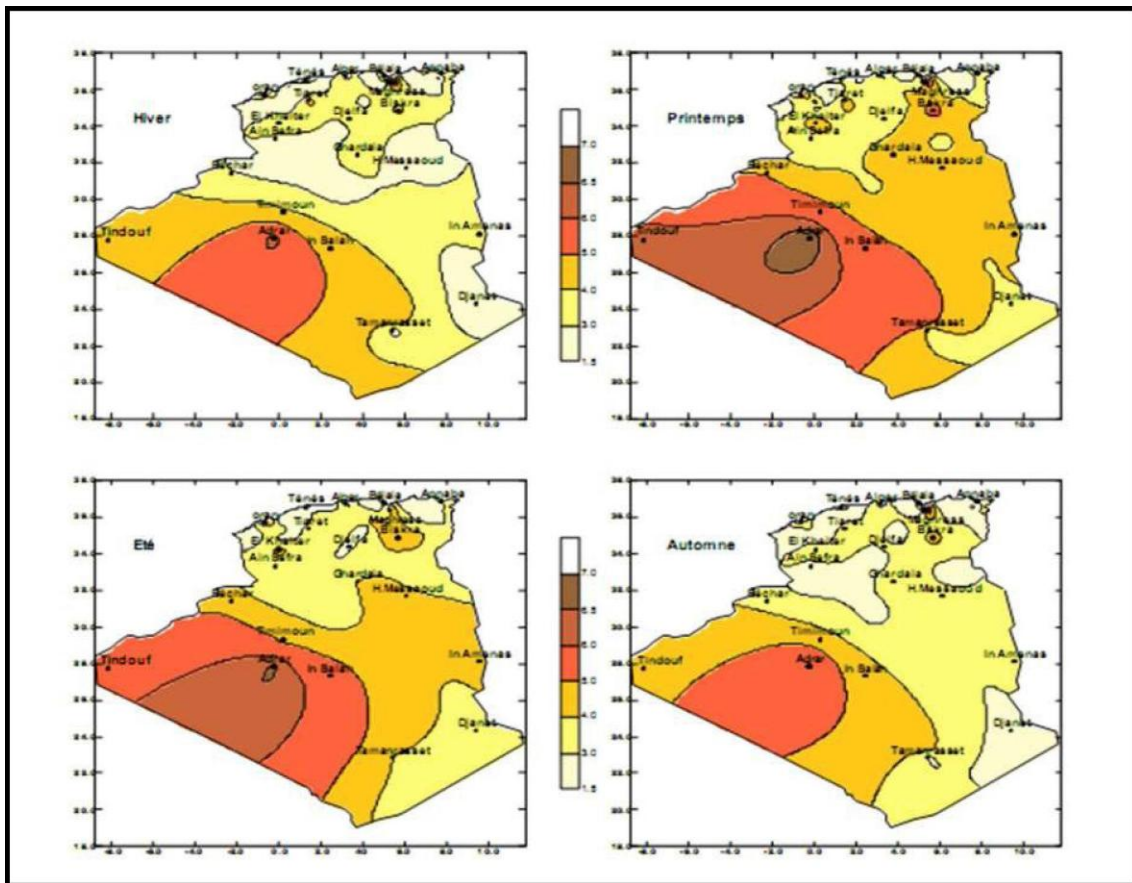


Fig.I.4: Cartes saisonnières de la vitesse du vent (m/s).[8]

Différents résultats utiles au bon choix des systèmes éoliens selon les régimes des vents locaux sont produits, à savoir :

- L'Analyse de la climatologie du site.
- L'établissement des Atlas éoliens de la région (vent et potentiel).
- Le choix optimal de l'emplacement de la ferme éolienne.
- L'estimation de la production d'énergie électrique de la ferme éolienne.
- L'efficacité des fermes éoliennes.
- et le coût du KWh produits.

Trois raisons principaux plaident en faveur d'un développement des énergies renouvelable en Algérie [8]:

- Elles constituent une solution économiquement viable pour fournir des services énergétiques aux populations rurales isolées notamment dans les régions du Grand sud.
- Elles permettent un développement du fait de leur caractère inépuisable et de leur impact limité sur l'environnement et contribuent à la préservation de nos ressources fossiles.

- La valorisation de ces ressources énergétiques ne peut qu'avoir des retombées positives en matière d'équilibre régional et de création d'emploi.

I.4. La production éolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est directement lié 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 pour tant exploitée depuis l'antiquité, connaît depuis environ 30 ans un développement sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers [09].

I.5. Principe de fonctionnement d'une éolienne

Pour convertir l'énergie disponible dans le vent en énergie électrique, les turbines éoliennes doivent être composées d'une partie mécanique et d'une partie électrique. La partie mécanique sert à capter l'énergie cinétique disponible dans le vent et à la transformer en énergie mécanique rotative. Cette dernière est transmise via un système d'entraînement, habituellement composé d'une boîte de vitesse, à une génératrice électrique. La conversion d'énergie mécanique en énergie électrique est effectuée via la génératrice électrique [10].

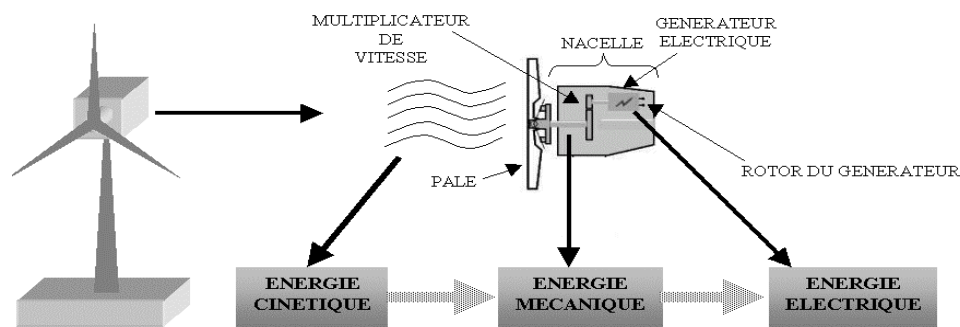


Fig.I.5 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.6. La chaîne de transformation énergétique

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

I.6.1. La transformation de l'énergie par les pales

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion :

La différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

I.6.2. L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

I.6.3. La production d'électricité par le générateur

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

I.6.4. Le traitement de l'électricité par le convertisseur et le transformateur

Cette électricité ne peut pas être utilisée directement ; elle est traitée grâce à un convertisseur, puis sa tension est augmentée à 20 000 Volts par un transformateur. L'électricité est alors acheminée à travers un câble enterré jusqu'à un poste de transformation, pour être injectée sur le réseau électrique, puis distribuée aux consommateurs les plus proches [11].

I.7. Choix de type d'éoliennes

Aujourd'hui, la plupart des éoliennes commerciales raccordées au réseau actuelles sont à axe horizontal, car elles présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au sol. le nombre de pales varie de 1 à 3, le rotor tripale étant de loin le plus répandu, car il représente un bon compromis entre le cout, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit D'ailleurs dans la suite de ce bibliographe ne seront étudiées que les éoliennes à axe horizontal [12].

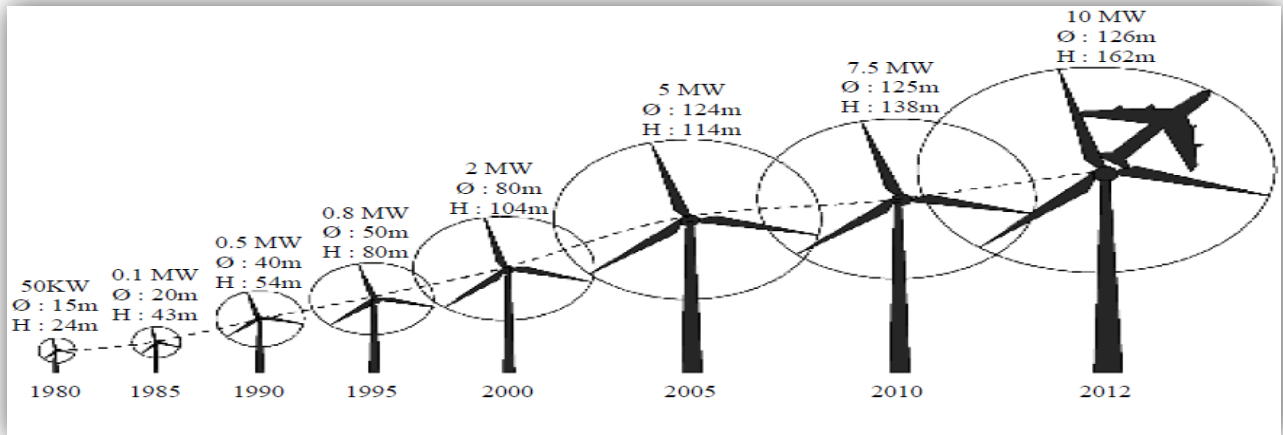


Fig.I.6 : Correspondance taille-puissance des éoliennes.[12]

| ECHELLE | DIMÉTRE DE L'HÉLICE | PUISSANCE DELIVRÉE |
|---------|---------------------|--------------------|
| PETITE | moins de 12 m | moins de 40 kw |
| MOYENNE | 12 m à 45 m | De 40 kw à 1 Mw |
| GRANDE | 46 m et plus | 1 Mw et plus |

Tableaux I.2 : Classification des turbines éoliennes.[12]

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 contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [14] .
- 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 [13].
- L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire [8].

L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que

l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [15].

- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace [15].
- 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 [14].
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [16].
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [14].

I.8.2. Inconvénients

- la nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour les gérants des réseaux [14].
- Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés [13].
- Le bruit : il a nettement diminué grâce aux progrès réalisés au niveau des Multiplicateurs [15].
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs, .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 aéro turbines [14].
- Lorsque la production dépasse la consommation, le stockage est encore onéreux, mais en cas de raccordement de l'éolienne au réseau électrique, le stockage n'est pas nécessaire [15].

I.9. Classification des éoliennes

On peut classer les générateurs éoliens selon les différents critères. Ces derniers peuvent alors se classer selon.

- Le type du capteur (à axe horizontal ou vertical).
- La nature du convertisseur électromécanique (machine asynchrone, synchrone, à courant continu, etc...).
- La nature de l'accouplement mécanique (présence de multiplicateur de vitesse ou attaque directe).
- Le mode de fonctionnement (vitesse fixe ou variable).

I.9.1. Différents types d'éolienne et leurs utilisations

L'organe capteur transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique afin de réaliser la conversion électromécanique tant que le mouvement est rotatif, les capteurs alors seront classés selon deux catégories, [17] :

◆ Capteurs à axe horizontal. Et ◆ Capteurs à axe vertical.

I.9.1.1. Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas Nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et Génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance.

En revanche , certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs à pratiquement abandonner ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal [17].



Fig.I.7: Les éoliennes à axe vertical.

I.9.1.1.1. Les type d'éoliennes à axe vertical

I.9.1.1.1. a. Rotor de Darrieus

Est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.

Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet [18].

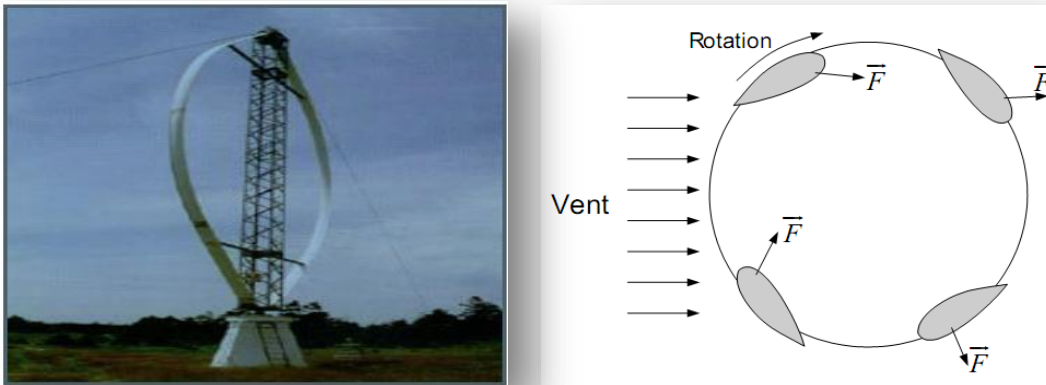


Fig.I.8 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Darrieus.

I.9.1.1.1.b. 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 [19].

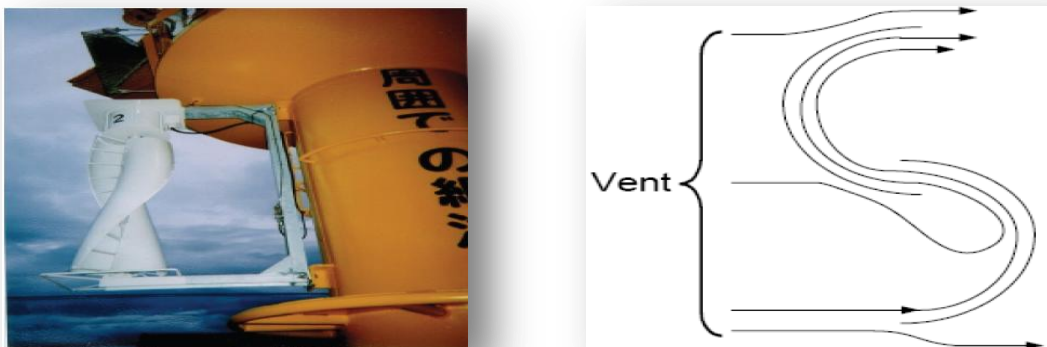


Fig.I.9 : Eoliennes à axe vertical à Rotor de Savonius.

I.9.1.1.2. Les avantages et Les inconvénients d'éolienne à axe vertical

✚ Les avantages

- Accessibilité de la génératrice et du multiplicateur mis directement au sol, ce qui facilite la maintenance et l'entretien [19].
- La non nécessité d'un système d'orientation du rotor car le vent peut faire tourner la structure quel que soit sa direction [19].

- Construction souvent simple [13].
- Faible bruit [09] .

✚ Les inconvénients

Les inconvénients principaux d'une éolienne axe vertical sont :

- Faible rendement et fluctuations importantes de puissance [19].
- Faible vitesse du vent à proximité du sol [19].
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement (Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s)[18].

I.9.1.2. Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal, plus largement employées, nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentant un rendement aérodynamique plus élevé. Elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. Dans ces types d'éolienne, l'arbre est parallèle au sol. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie entre 1 et 3. Le rotor tripale est le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien. Ce type d'éolienne a pris le dessus sur celles à axe vertical car elles représentent un coût moins important [20]. Les turbines à axe horizontal sont généralement placées face au vent par un mécanisme d'asservissement de l'orientation ou par un phénomène d'équilibre dynamique naturel assuré par un gouvernail dans le cas d'une turbine sous le vent[19].



Fig.I.10 : Eoliennes à axe horizontal.

I.9.1.2.1. Les types d'éoliennes à axe horizontal

I.9.1.2.1.a. Eoliennes lentes

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts. Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau [21].

I.9.1.2.1.b. Eoliennes rapides (Aérogénérateurs)

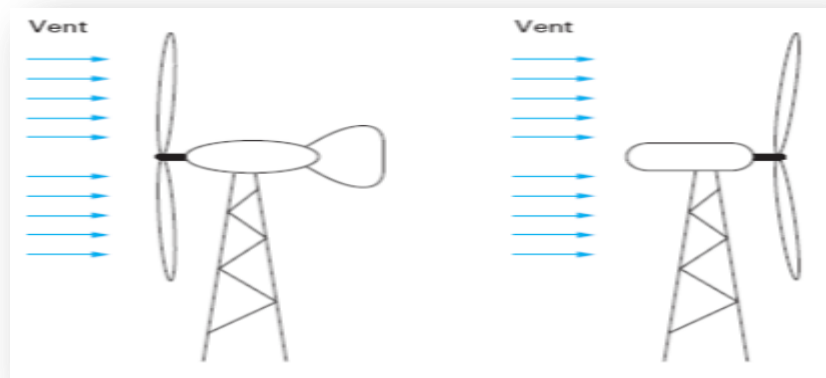
Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible [21].

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encore différencier l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par rapport au vent « hélice au vent » et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « hélice sous le vent ».

➤ 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.

➤ 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 [22].



Eolienne Amont

Eolienne Aval

Fig.I.11 : Configuration à axe horizontal.

I.9.1.2.2. Les avantages et Les inconvénients d'éolienne à axe horizontal

✚ Les avantages

- ◆ Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- ◆ Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- ◆ Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour. Ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

✚ Les inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet de la tour ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

I.9.2.Principaux composants d'une éolienne

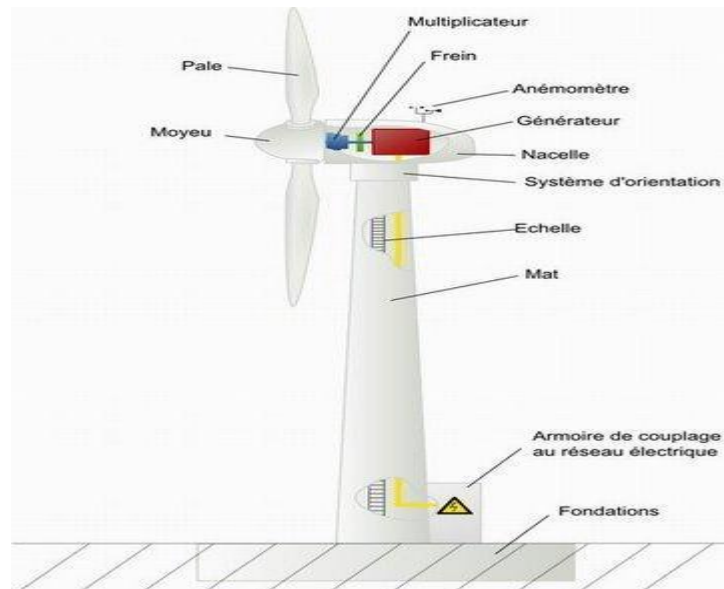


Fig.I.12 : principaux composants d'une éolienne

I.9.2.1.Le mât :

Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur (exemple : éolienne NORDEX N90 2,3 MW: diamètre de 90m, mât de 80 m de hauteur)[23].

I.9.2.2.La nacelle

Regroupe tout le système de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique et divers actionneurs de commande [24].

I.9.2.2.a.Un multiplicateur

Adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique, 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 [19].

I.9.2.2.b.Le système de refroidissement

Comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau [24].

I.9.2.2.c.La génératrice (ou l'alternateur)

Pour transformée l'énergie mécanique en énergie électrique.

I.9.2.2.d.Anémomètre

Sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne si la vitesse du vent est supérieure à 25 m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne[24].

I.9.2.2.e.Le système de contrôle-commande

Comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique [24].

I.9.2.3.Une armoire de commande

Comportant tous les convertisseurs d'électronique de puissance (onduleur, redresseur), ainsi que les systèmes de régulation de puissance, de courant et de tension et d'orientation des pales et de la nacelle [24].

I.9.2.4.Le rotor

formé par les pales assemblées dans leur moyeu[25]. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale (concept danois) étant de loin le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit[21].

I.9.3. La vitesse de rotor

I.9.3.1.Fonctionnement à vitesse fixe

Les premières éoliennes commercialisées reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage directement couplée sur le réseau électrique. Un multiplicateur de vitesse entraîne cette machine à une vitesse qui est maintenue approximativement constante grâce à un système mécanique d'orientation des pales. Une batterie de condensateurs est souvent associée pour compenser la puissance réactive nécessaire à la magnétisation de la machine asynchrone à cage[19].

I.9.3.1.1.Avantage et Inconvénients du fonctionnement à vitesse fixe

I.9.3.1.1.a.Avantages

- Système électrique plus simple.
- Moins cher.
- Pas besoin de système électronique.
- Plus fiable (moins d'entretien)[13].

I.9.3.1.1.b.Inconvénients

- L'énergie captée n'est pas forcément optimale.
- Difficulté de contrôler la puissance transitée au réseau.
- Présence des efforts et oscillations du couple dans le train de puissance[13].

I.9.3.2.Fonctionnement à vitesse variable

L'ensemble des caractéristiques donnant la puissance disponible en fonction de la vitesse de rotation du générateur pour différentes vitesses de vent. à partir de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si la génératrice est entraînée à une vitesse fixe les maxima théoriques des courbes de puissance ne seraient pas exploités. Pour cela, et afin de pouvoir optimiser le point de fonctionnement en terme de puissance extraite, il y a lieu de pouvoir ajuster la vitesse de rotation de l'arbre de la génératrice en fonction de la vitesse du vent[19].

I.9.3.2.1.Avantages et Inconvénients

I.9.3.2.1.a.Avantages

- 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.

- 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 [13].

I.9.3.2.1.b. Inconvénients

- Utilisation de machines spéciales.
- Coûts supplémentaires plus importants (convertisseur, commande,...).
- Complexité des convertisseurs de puissance utilisés.
- Gestion du transfert de puissance entre les convertisseurs, et placement au point de puissance optimum de l'éolienne [13].

I.9.4. Les machines utilisées dans le Système éolien (vitesse variable)

✚ Systèmes utilisant la machine asynchrone

➤ Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil (GACE)

C'est dans les grandes puissances (au-delà de 100 kW) que l'on rencontre des systèmes reliés au réseau et produisant "au fil du vent". Les machines asynchrones à cage ne nécessitent qu'une installation assez sommaire. Elles sont souvent associées à une batterie de condensateurs de compensation de la puissance réactive, et à un démarreur automatique progressif à gradateur ou à résistances permettant de limiter le régime transitoire d'appel de courant au moment de la connexion au réseau.[20]

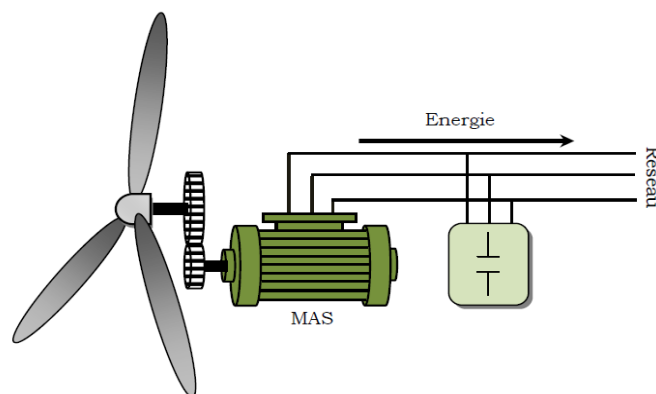


Fig.I.13: Générateur Asynchrone à Cage d'Ecureuil.

➤ **Générateur asynchrone à double stator**

cas deux enroulements statoriques , l'un conçu pour les faibles vitesses du vent à grand nombre pair de pôles et l'autre pour les fortes vitesses du vent à petit nombre pair de pôles. Donc le système fonctionne à une vitesse de rotation fixe avec deux points de fonctionnement tout en réduisant le bruit causé par l'orientation de l'angle de calage .Mais l'inconvénient majeur de système est la présence d'un second bobinage statorique qui rend la sa conception difficile ainsi que son coût de revient est trop important.[17]

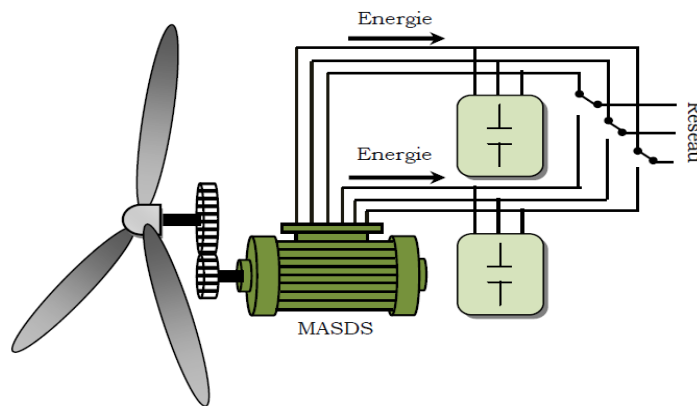


Fig.I.14: Générateur asynchrone à double stator.

➤ **MACE connectée au réseau avec une interface d'électronique de puissance**

Le système permet un fonctionnement à vitesse variable , quelle que soit la vitesse du vent on aura une tension à fréquence fixe ,en effet la tension produite sera 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.[17]

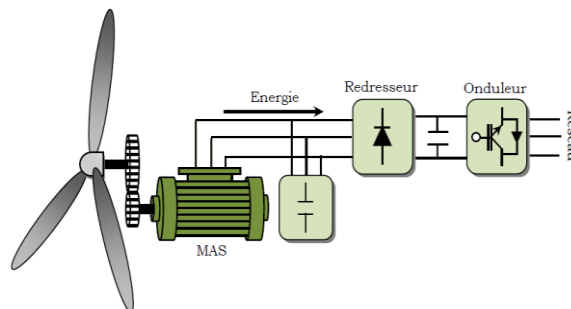


Fig.I.15: Connexion indirecte d'une machine asynchrone au réseau.

Elle est constituée par un rotor à cage et par deux bobinages triphasés indépendants dans le stator.

Un des bobinages du stator, appelé Bobinage de Puissance (BP), est directement relié au réseau, tandis que l'autre, dont la section des conducteurs est moins élevée, permet de faire varier les courants d'excitation de la machine appelé Bobinage de Commande (BC), est alimenté par un convertisseur bidirectionnel. [17]

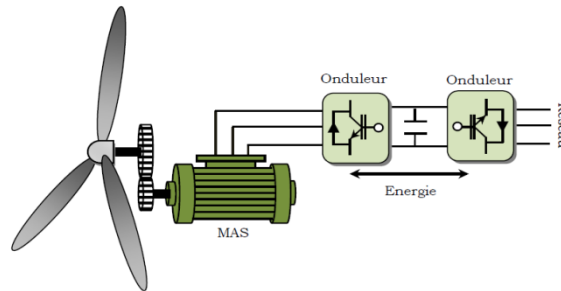


Fig.I.16: Générateur asynchrone connectée au réseau par Deux onduleurs.

➤ **Systèmes utilisant Machine asynchrone à double alimentation type "rotor bobiné"**

La machine asynchrone à double alimentation est un générateur à induction. Les enroulements du stator sont connectés directement au réseau triphasé. Les enroulements du rotor sont reliés à des convertisseurs de puissance bidirectionnels en courant. Le condensateur entre ces deux convertisseurs représente le bus continu. Le transformateur élévateur de tension permet le raccordement au réseau de distribution.[26]

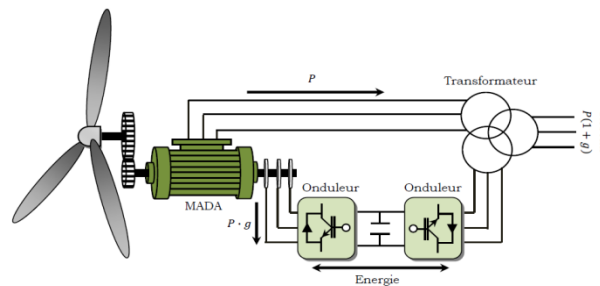


Fig.I.17: Schéma de principe d'une machine asynchrone pilotée Par le rotor.

✚ **Systèmes utilisant la machine synchrone**

Les génératrices synchrones utilisées dans le domaine éolien sont plus chères que les génératrices à induction de même taille.

Ce type de machine est directement connecté au réseau, sa vitesse de rotation est fixe et proportionnelle à la fréquence du réseau. En conséquence de cette grande rigidité de la connexion générateur-réseau, les fluctuations du couple capté par l'aérogénérateur se propagent jusqu'à la

puissance électrique produite. C'est pourquoi les machines synchrones ne sont pas utilisées dans les aérogénérateurs directement connectés au réseau. Elles sont par contre utilisées lorsqu'elles sont connectées au réseau par l'intermédiaire de convertisseurs de puissance.[26]

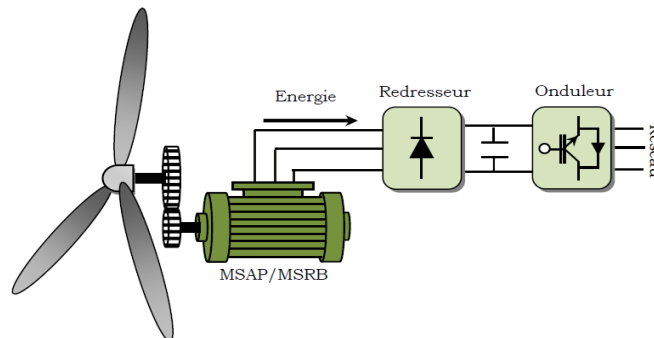


Fig.I.18: Système avec générateur synchrone pour un fonctionnement à vitesse variable.

I.9.5. Autres Architectures

On observe actuellement l'émergence d'architectures particulières qui dérivent des génératrices classiques (synchrones ou asynchrones). Parmi ces nouvelles architectures, on pourra citer la génératrice asynchrone à double alimentation en cascade, la génératrice asynchrone à cage à double alimentation statorique, génératrice asynchrone à double alimentation en cascade avec l'un de deux machines à double étoile, la génératrice synchrone à aimants permanents discoïdes et la génératrice à réluctance variable.[26]

I.10. Modèle de la turbine

L'éolienne capte l'énergie cinétique du vent et la convertit en un couple qui fait tourner les pales du rotor. Trois facteurs déterminent le rapport entre l'énergie du vent et l'énergie mécanique récupérée par le rotor: la densité de l'air, la surface balayée par le rotor et la vitesse du vent. La densité de l'air et la vitesse du vent sont des paramètres climatologiques qui dépendent de l'environnement [27].

L'évolution du coefficient de puissance est une donnée spécifique à chaque éolienne. A partir de relevés réalisés sur une éolienne [27].

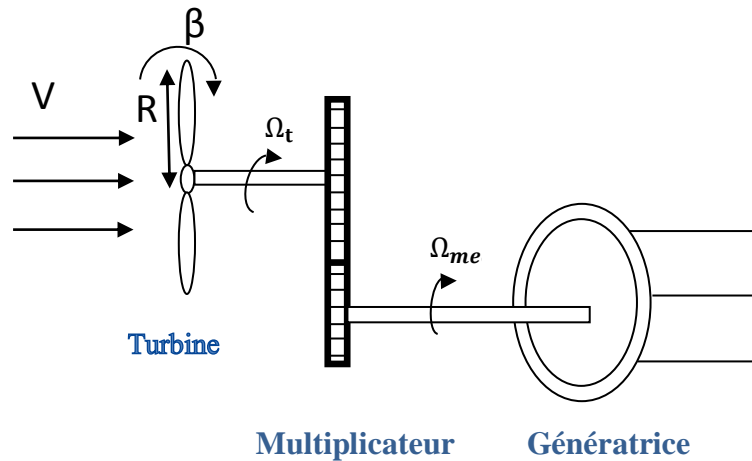


Fig.I.19: Schema de la turbine éolienne.

J_t : Le moment d'inertie de la turbine.

J_g : Le moment d'inertie du générateur.

f_v : Le coefficient dû aux frottements visqueux du générateur.

C_t : Le couple mécanique sur l'axe de la turbine.

C_g : Le couple mécanique sur l'Arbre du générateur.

Ω_{mec} : La vitesse de rotation du générateur.

Ω_t : La vitesse de rotation de la turbine.

I.10.1.Hypothèses simplificatrices

- La voiture de la turbine comprend trois pales de longueur chaque une, supposées identiques, attachées au moyeu. L'ensemble peut être considéré comme une seule masse d'une inertie .
- L'inertie du multiplicateur de vitesse est négligeable devant celle de la turbine et celle du générateur, ce qui nous permet de le considérer comme un gain de vitesse égale à G ou un gain de couple égale à $1/G$.

I.10.2.Coefficient de puissance

I.10.2.1. Lois de bétz

Considérons le cas d'une éolienne à axe horizontal placée dans un tube d'air animé à l'infini amont d'une vitesse V_1 et d'une section S_1 et à l'infini aval d'une vitesse V_2 et d'une section S_2 . On désigne par S la surface balayée par l'hélice et V la vitesse du vent au niveau des pales. Selon le principe d'incompressibilité de l'air et la continuité d'écoulement, on peut écrire que :

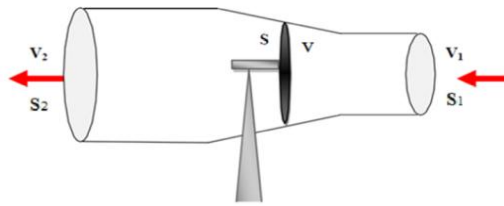


Fig.I.20:Lois de betz

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (I.1)$$

D'après le théorème d'EULER, La force exercée par l'air sur l'aérogénérateur est donnée par:

$$F = \rho S V (V_1 - V_2) \quad (I.2)$$

En remplace (I.2) dans l'équation de la puissance absorbée par l'aérogénérateur :

$$P_{aero} = F \cdot V = \rho S V^2 (V_1 - V_2) \quad (I.3)$$

Pour la variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air :

$$\Delta E_s = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.4)$$

On considère que la V au milieu du courant d'air :

$$V = \frac{(V_1 + V_2)}{2} \quad (I.5)$$

En remplaçant l'expression de V dans les relations (I.2) et (I.3) on obtient :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (I.6)$$

$$P_{aero} = \frac{1}{4} \rho S (V_1^2 - V_2^2) (V_1 + V_2) \quad (I.7)$$

Un vent théoriquement non perturbé traverserait cette même surface S sans diminution de vitesse, soit à la vitesse V_1 , la puissance correspondante (mécanique théorique) ou La puissance de l'air en mouvement, est la suivante :

$$P_{mt} = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 \quad (I.8)$$

On définit le rapport entre les deux puissances C_p (puissance extraite du vent et celle qui est théoriquement disponible) qui est appelé le coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{P_{aero}}{P_{mt}} = \frac{(1 + \frac{V_1}{V_2})(1 - (\frac{V_1}{V_2})^2)}{2} \quad (I.9)$$

Ce coefficient présente un maximum de 16/27 soit 0,59. C'est cette limite théorique appelée limite de Betz qui fixe la puissance maximale extractible pour une vitesse de vent donnée. Cette limite n'est en réalité jamais atteinte et chaque éolienne est définie par son propre coefficient de puissance exprimé en fonction de la vitesse relative λ .

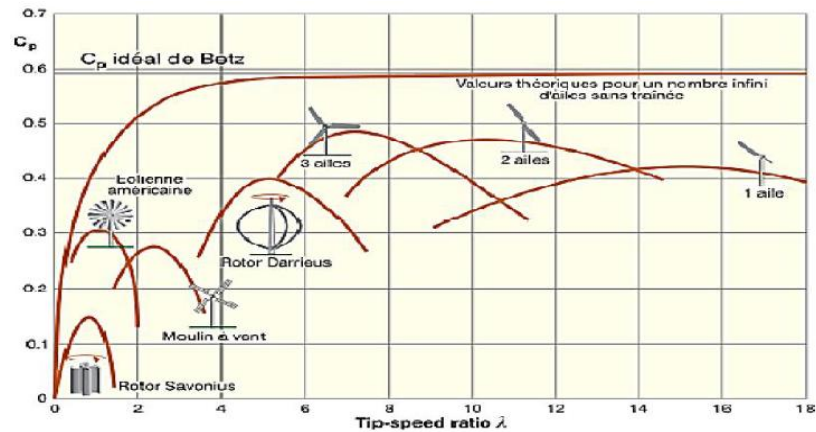


Fig.I.21: Coefficient de puissance pour les différents types d'aérogénérateur.

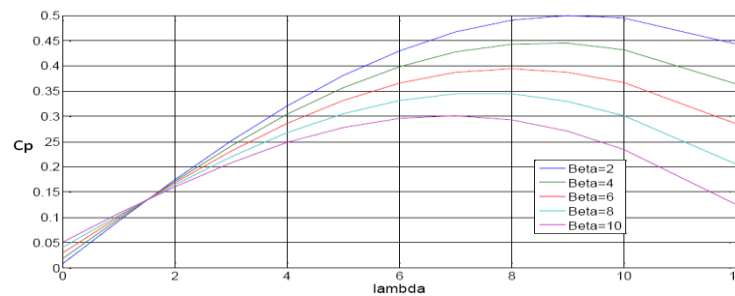


Fig.I.22: Influence de l'angle de calage sur le coefficient de couple.

L'expression simplifiée de la puissance captée par l'éolienne est :

$$P_{aero} = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p(\lambda, \beta) \quad (I.10)$$

Une autre expression de cette puissance serait :

$$P_t = C_t \cdot \Omega_t \quad (I.11)$$

Le couple mécanique C_t sur l'axe de la turbine est donné par la relation suivante :

$$C_t = \frac{P_t}{\Omega_t} = \frac{1}{2\lambda} \rho \pi R^3 V^2 C_p(\lambda, \beta) \quad (\text{I.12})$$

λ : la vitesse spécifique donné par $\lambda = \frac{\Omega_t \cdot R}{V}$

V : la vitesse du vent .

ρ : la masse volumique de l'air ($\rho \approx 1.225 \text{ Kg/m}^3$)

R : le rayon de l'aérogénérateur ou la longueur d'une pale.

C_p : est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine

I.10.2.2. Modèle du multiplicateur :

Le rôle du multiplicateur est de transformer la vitesse mécanique de la turbine en vitesse de la génératrice, et le couple aérodynamique en couple du multiplicateur selon les formules mathématiques suivantes :

$$C_g = \frac{1}{G} C_t \quad (\text{I.13})$$

$$\Omega_t = \frac{1}{G} \Omega_{mec} \quad (\text{I.14})$$

I.10.2.3. Modèle de l'arbre

$$\frac{C_T}{G} - C_g = \left(\frac{J_T}{G^2} + J_g \right) \frac{d\Omega_g}{dt} + \left(\frac{f_T}{G^2} + f_g \right) \Omega_g \quad (\text{I.15})$$

C_T et C_g : le couple éolien et le couple électromagnétique.

J_T et J_g : L'inertie de la turbine et celle du générateur.

f_T et f_g : Le coefficient des frottements visqueux de la turbine et celui du générateur.

G : Le rapport du multiplicateur de vitesse.

Ω_g : La vitesse de rotation du générateur (axe rapide).

On pose :

$$\frac{J_T}{G^2} + J_g = J \quad (\text{I.16})$$

$$\frac{f_T}{G^2} + f_g = f \quad (\text{I.17})$$

D'où, l'équation mécanique devienne :

$$\frac{C_T}{G} - C_g = J \frac{d\Omega_g}{dt} + f \Omega_g \quad (\text{I.18})$$

I.10.2.4. Modèle de l'actionneur des pales

La caractéristique $C_p(\lambda)$ est directement liée à l'aérodynamisme des pales. La Figure ci-dessous nous montre l'évolution de la caractéristique d'une éolienne en fonction de β . Plus l'angle de calage sera important, moins la turbine captera l'énergie cinétique du vent. Les pales sont face au vent pour des vents faibles afin d'en extraire le maximum de puissance puis lorsque le vent nominal v_n est atteint, elles s'inclinent pour atteindre la position « drapeau » à la vitesse de vent maximale[28].



Fig.I.23 : Modèle simplifié de la turbine.

I.11.Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Par conséquent, les éoliennes sont en général construites de manière à atteindre leur performance maximale à environ 15 m/s. Il est en fait inutile de concevoir des éoliennes qui maximisent leur rendement à des vitesses de vent encore plus élevées, celles-ci étant peu fréquentes. [29]

En cas de vitesses de vent supérieures à 15 m/s, il est nécessaire de perdre une partie de l'énergie supplémentaire contenue dans le vent afin d'éviter tout endommagement de l'éolienne. Toutes les éoliennes sont donc conçues avec un système de régulation de la Puissance.

L'objectif de cette régulation est double, d'une part de protéger l'éolienne par vent fort et d'autre part de délimiter la puissance.

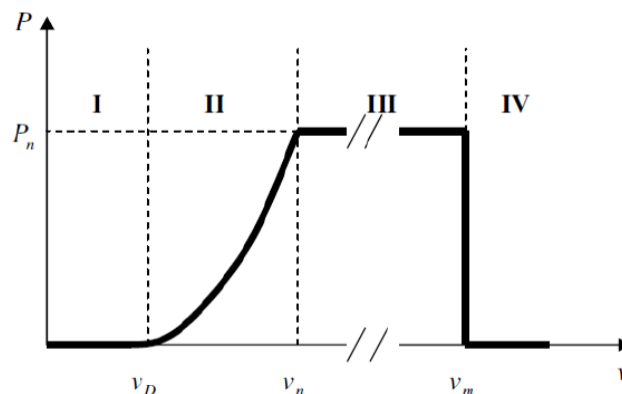


Fig.I.24: Caractéristique puissance/vitesse de vent d'une éolienne classique

- **la zone I** : le vent n'est pas suffisant pour faire fonctionner la turbine
- **la zone II** : la puissance fournie par l'arbre va dépendre de la vitesse du vent
- **La zone III** : la vitesse de rotation est maintenue constante par régulation de la vitesse et la puissance P fournie reste égale à P_n .
- **La zone IV** : la vitesse de vent est trop importante, pour ne pas détériorer le générateur éolien, les pales de la turbine sont mises en drapeaux ($\beta = 90^\circ$) [17].

I.12. Résultats de simulation fonctionnement de turbine

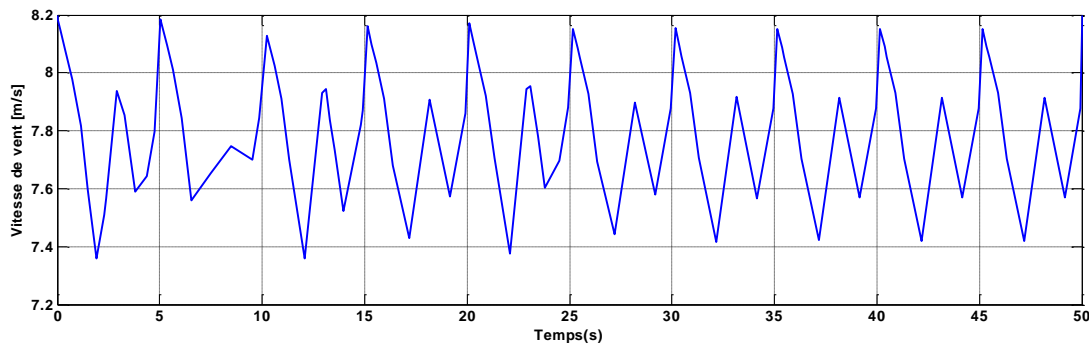


Fig.I.25 : Profile du vent appliqué à la turbine.

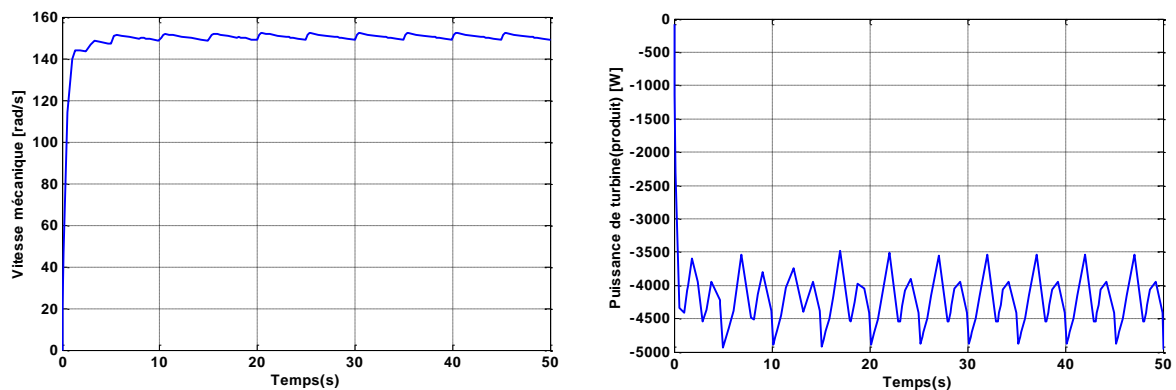


Fig.I.26 : la vitesse mécanique et la puissance produit.

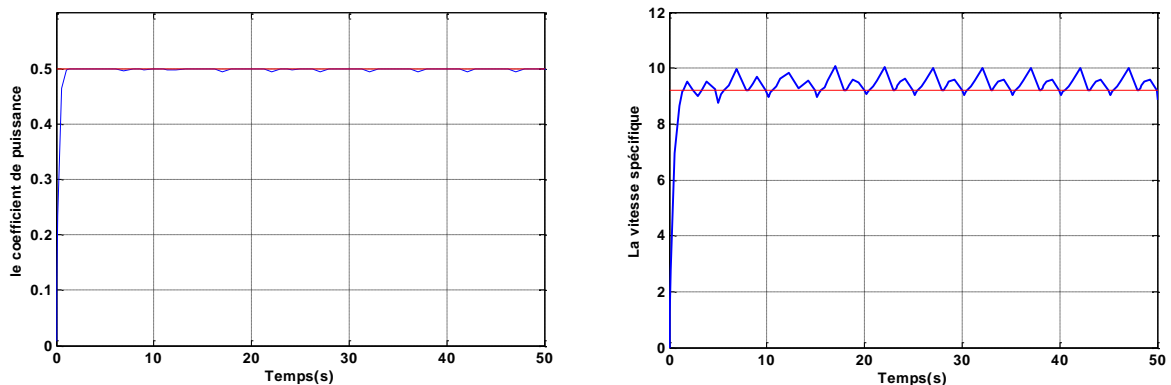


Fig.I.27 : Le coefficient de puissance et La vitesse spécifique.

I.13. Interprétations des résultats

A travers l'évolution du coefficient de puissance Figures (I.27), nous pouvons remarquer que celui-ci est dans le voisinage de sa valeur maximale théorique. Ce coefficient est obtenu pour un angle de calage β fixe ($\beta=20^\circ$) qui nous donne un $\lambda_{optimale}$. On remarque que l'atteint une valeur maximale de 0.5, Cette résultats de simulation montre que la fiabilité de la commande sans asservissement de la vitesse du vent.

La figure (I.25) présente le profil du vent qui sera appliqué pour la turbine éolienne sa valeur faible est autour de (8m/s). Les résultats de simulation montrent que la variation de la puissance électrique est adaptée à la variation de la vitesse de la génératrice, et cette dernière, est adaptée à la variation de la vitesse du vent. Ceci montre l'influence de la variation de la vitesse mécanique en fonctionne de la vitesse du vent sur la puissance électrique produite.

I.14. CONCLUSION

Ce chapitre nous a permis de jeter un coup d'œil sur les solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Après un rappel de notions nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement ont été décrits. Et par la suite des machines électriques et leurs convertisseurs associés, adaptables à un système éolien ont été présentés. Plusieurs types de machines ont été présentées : machines asynchrones, machine synchrones et machines à structure spéciale.