

Principe de fonctionnement des Aérogénérateurs

2.1 Introduction :

Parmi toutes les énergies renouvelables contribuant à la production d'électricité, l'énergie éolienne tient actuellement le rôle de vedette. Elle est l'une des plus prometteuses, en termes d'écologie, de compétitivité, de champ d'application et de création d'emplois et de richesses. La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres une différence de pression est créée et les masses d'air sont en déplacement.

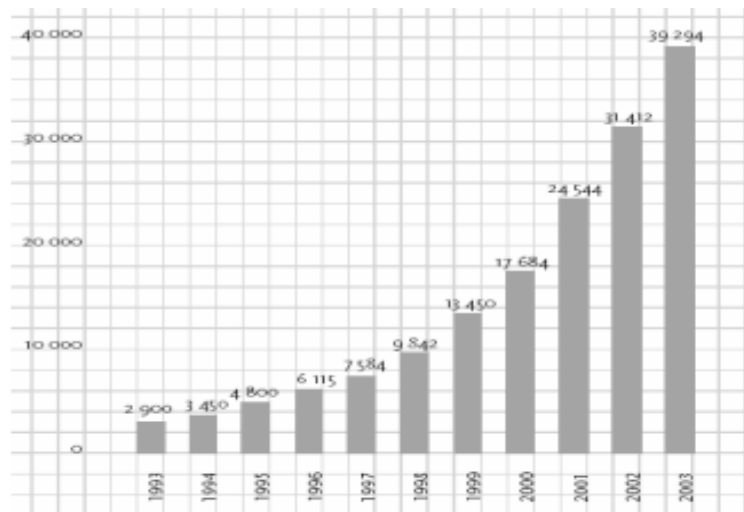


Figure 2.1 : Puissance éolienne cumulée dans le monde en MW [28]

L'étude de rentabilité des systèmes éoliens est étroitement liée à la source elle-même, à savoir, le vent. Par exemple en Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifiés.

Une étude préliminaire de l'évolution de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées. Cette représentation de la vitesse sous forme de carte a deux objectifs : le premier est d'identifier les vastes régions avec des bonnes promesses d'exploitation de l'énergie éolienne. Le second est de mettre en évidence la variation relative de la ressource à travers la région. En Algérie par exemple tous les Atlas présentent la région Sud-ouest, à savoir Adrar, Timimoun et In Salah comme les zones les plus ventées, ils représentent toutes les caractéristiques des sites candidats à l'exploitation de cette énergie comme montrée dans la figure :

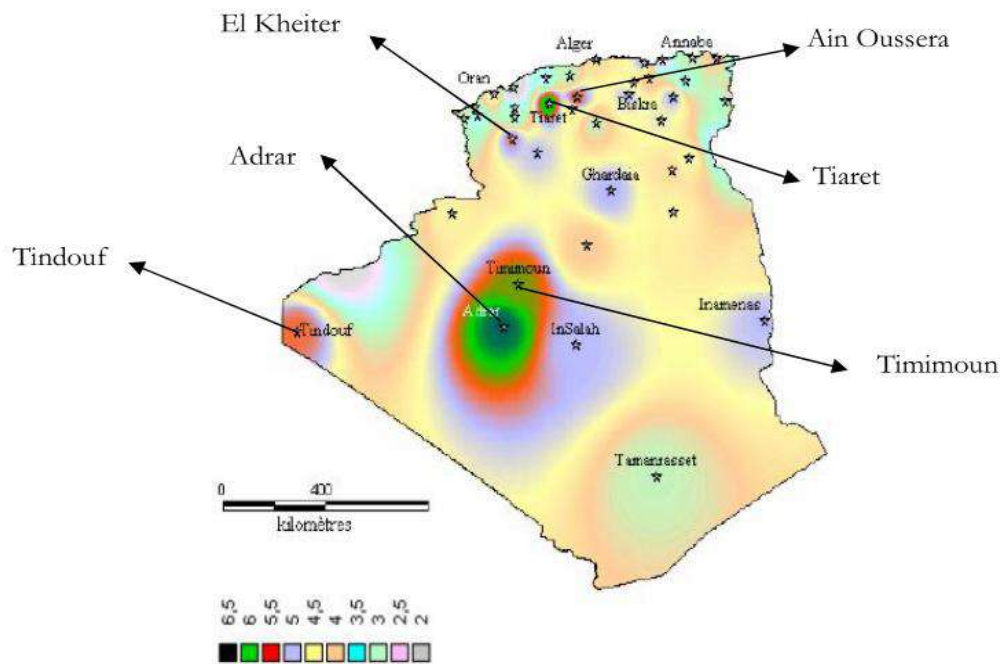


Figure 2.2 : 1. Atlas de la vitesse de vent en Algérie [5]

2.2.PRINCIPES DE L'EOLIEN

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice.

2.2.1.Définition de l'énergie éolienne

Les vents sur Terre sont dus à des différences de température. L'énergie éolienne générée par ces vents est utilisée depuis longtemps déjà.

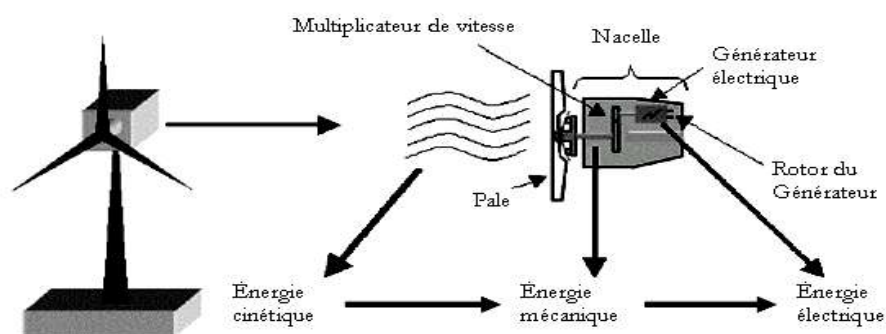


Figure2.3. Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffusée. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée

proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer. Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en Mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière. [10]

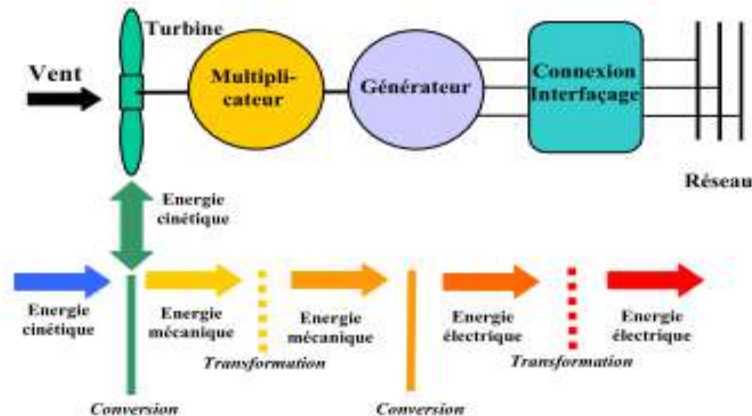


Figure 2.4 : Principe de la conversion d'énergie

2.2.2. Principaux composants d'une éolienne

Une éolienne "classique" est généralement constituée de trois éléments principaux : (Figure 2.5)

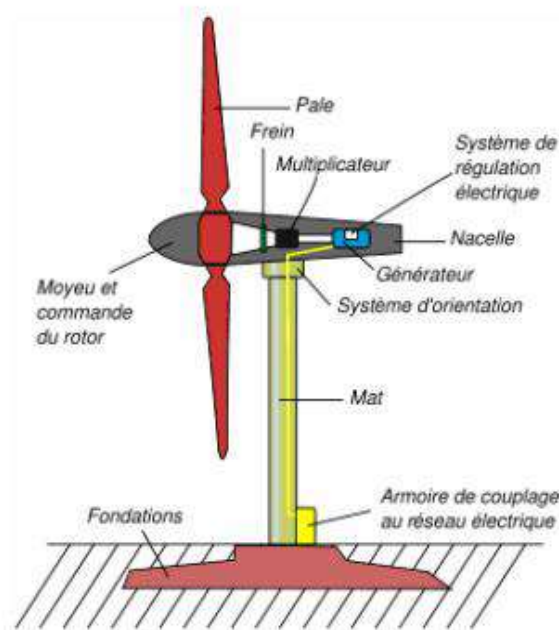


Figure 2.5 : Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

- **La tour** : généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol.
- **Le rotor** : formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3. Le rotor est fixé à l'arbre principal par des boulons. Le grand rotor est constitué de trois pales qui captent le vent.

Le vent fait tourner le rotor lorsqu'il y a assez d'énergie. Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne. Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite

- **La nacelle** : regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique. La nacelle se compose des éléments suivants : (Figure 2.6)

- **Arbre principal**

Le vent fait tourner la girouette. La girouette informe le système de commande de la direction du vent. Ensuite le système de commande demande au moteur d'orientation d'orienter le rotor face au vent.

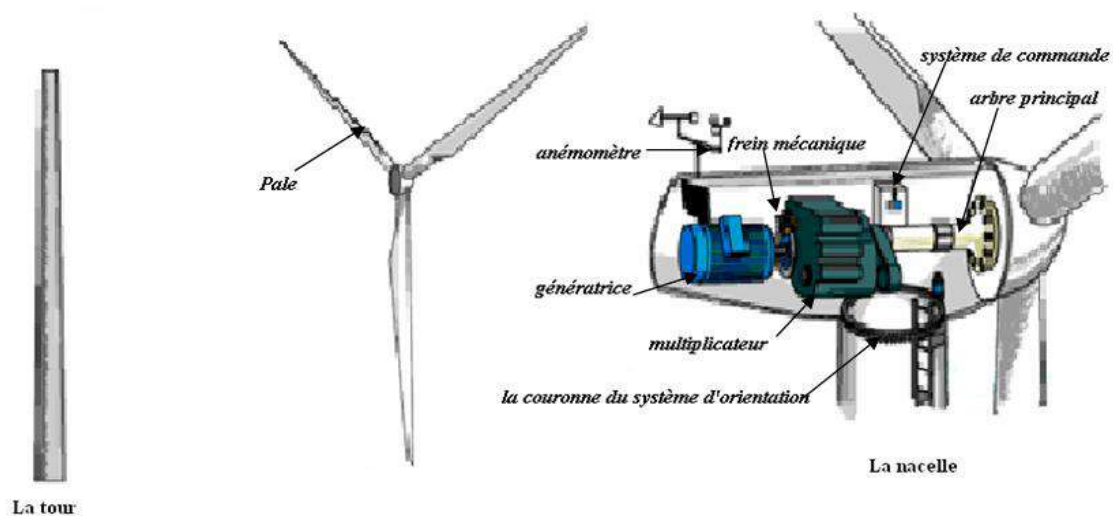


Figure 2.6. Principaux composants d'une éolienne [10]

Le moyeu :

C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

Système de commande

Le système de commande est un ordinateur qui contrôle les différents composants de l'éolienne. Il oriente par exemple la nacelle dans la direction du vent et démarre le rotor lorsque l'anémomètre lui avise que le vent est suffisamment fort.

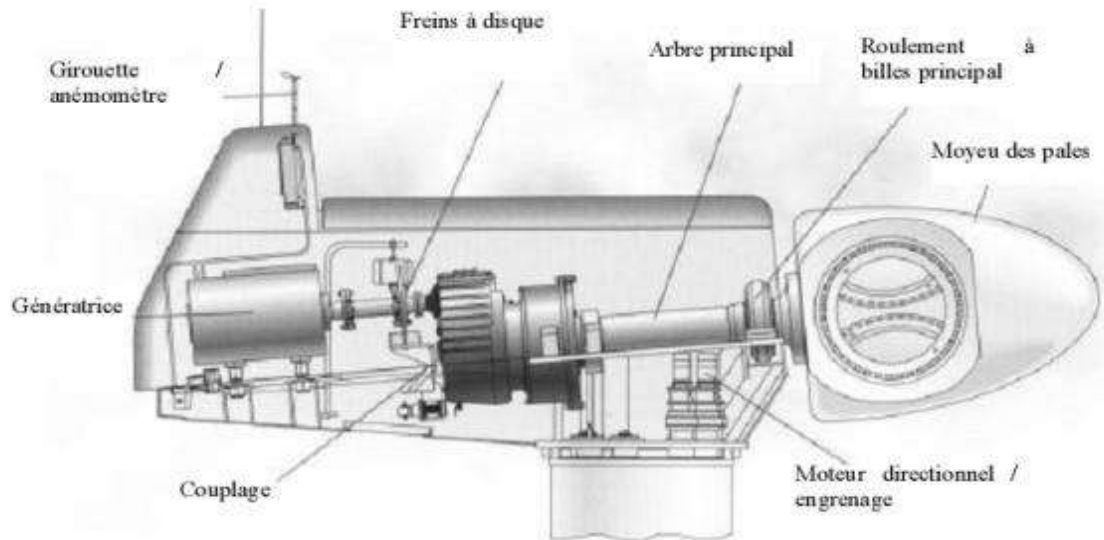


Figure 2.7 : Constitution d'une nacelle

Multiplicateur : Le rotor tourne à environ 22 tours par minute. Mais la génératrice, elle, doit tourner à quelque 1.500 tours par minute. Le multiplicateur accélère donc les 22 tours à 1.500 tours.

Courette du système d'orientation

La grande couronne d'orientation est montée sur la tour. La roue dentée du moteur d'orientation entraîne la grande couronne dentée et oriente la nacelle avec le rotor par rapport à la direction du vent.

Génératrice

La génératrice produit de l'électricité en tournant. Le courant est conduit à travers la tour par des câbles électriques.

Frein mécanique

On utilise le frein mécanique quand l'éolienne doit être réparée ou maintenue. Ainsi on assure que le rotor ne se met pas brusquement à tourner.

Anémomètre ou girouette:

L'anémomètre mesure la vitesse du vent. Il informe continuellement le système de commande de la vitesse du vent.

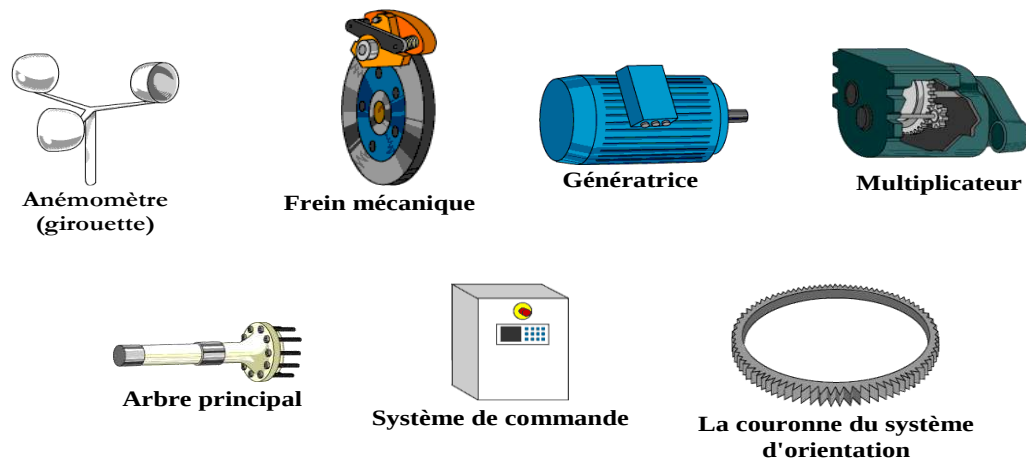


Figure 2.8. Les éléments consécutifs de la nacelle

2.3. Différents types d'éoliennes

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



a -éolienne à axe vertical.

b - Éolienne à axe horizontal.

Figure 2.9 : Technologies d'éoliennes

2.3.1. Eolienne à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical remplacent un peu aux roues hydrauliques. Elles sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation :

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) ;
- Les éoliennes de Darrieus la plus répandue.

Les éoliennes à axe vertical restent toutefois marginales et peu utilisées voire actuellement abandonnées.

Les avantages théoriques d'une éolienne à axe vertical sont :

- Elle permet de placer la génératrice, le multiplicateur, ... à terre, et on n'a pas besoin de munir la machine d'une tour.

- Un mécanisme d'orientation n'est pas nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients principaux d'une éolienne à axe vertical sont :

- Les vents sont assez faibles à proximité de la surface du sol.

- L'éolienne ne démarre pas automatiquement. (ainsi, il faut par exemple pousser les éoliennes de Darrius pour qu'elles démarrent. Cependant, ceci ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau, étant donné qu'il est alors possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).

- Pour remplacer le palier principal du rotor, il faut enlever tout le rotor.

- Les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, mais elles sont très vite disparues du marché du fait de leur faible rendement et des fluctuations importantes de puissance provoquées.

- Le rotor de Savonius (du nom de son inventeur, breveté en 1925) dont le fonctionnement 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.

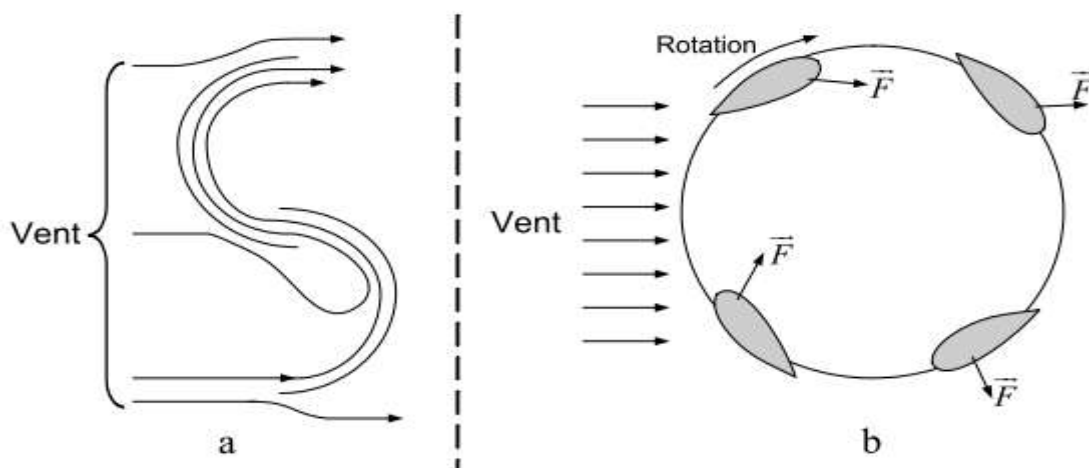


Figure 2.10 : Principe du rotor de Savonius et de l'incidence variable.

2.3.2. Eolienne à axe horizontal

Aujourd'hui, la majorité des éoliennes commerciales sont à axe horizontal. La raison est bien simple: toutes les éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui constituées avec un rotor du type hélice, monté sur un axe horizontal.

2.4. Avantages et désavantages 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.

2.4.1. Les avantages

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

- Bien que ne pouvoir envisager de remplacer totalement les sources traditionnelles d'énergie, l'énergie éolienne peut toutefois proposer une alternative intéressante et renouvelable. Elle s'inscrit parfaitement dans l'effort global de réductions des émissions de CO₂. Chaque mégawatheure d'électricité produit par l'énergie éolienne aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO₂ rejetées chaque année par la production d'électricité d'origine thermique.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'énergie nucléaire et ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- La durée de vie des éoliennes modernes est maintenant de 20 à 25 ans, ce qui est comparable à de nombreuses autres technologies de production d'énergie conventionnelles.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, le coût de l'éolienne à diminuer presque 50% depuis le début des années 80. Le coût de l'énergie éolienne continue de diminuer grâce aux percées technologiques, à l'accroissement du niveau de production et à l'utilisation de grandes turbines.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Car elle répond au besoin énergétique de ces pays. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. 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.

- L'énergie éolienne se révèle une excellente ressource d'appoint d'autres énergies, notamment durant les pics de consommation, en hiver par exemple .

2.4.2. Les désavantages

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

- L'impact visuel : Ca reste néanmoins un thème subjectif.
- Les bruits mécaniques ou aérodynamiques.
- Les éoliennes peuvent nuire à la migration des oiseaux.
- 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.

Les systèmes éoliens coûtent généralement plus cher à l'achat que les systèmes utilisant des sources d'énergie classiques, comme les groupes électrogènes à essence, mais à long terme, ils constituent une source d'énergie économique et ils demandent peu d'entretien. Il a fallu plusieurs décennies pour réaliser des éoliennes silencieuses, esthétiques et résistantes aux conditions météorologiques très capricieuses.

2.5. Bilan des forces sur une pale

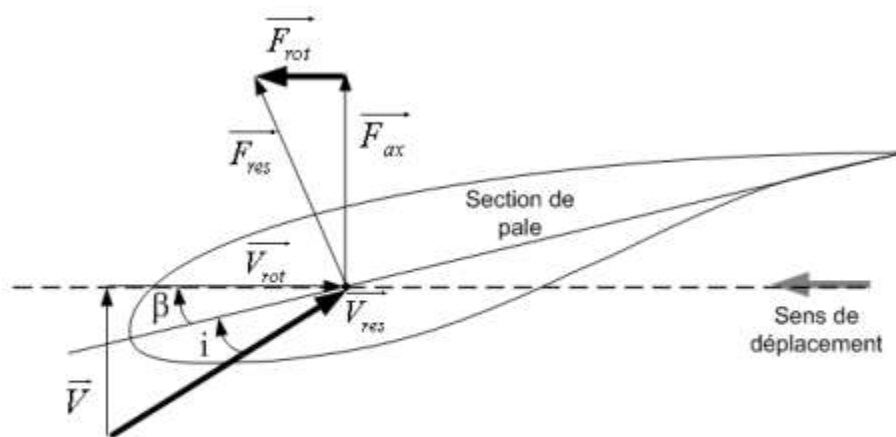


Figure 2.11 : Bilan des forces sur une pale

La Figure 2.11 représente la section longitudinale d'une pale d'aérogénérateur . La vitesse du vent arrivant face à cette pale, est représenté par le vecteur V . Le vecteur V_{rot} représente la composante de vent due à la rotation de l'aérogénérateur. La résultante de ces deux vecteurs est appelée V_{res} . L'action du vent sur la pale produit une force F_{res} qui se décompose en une poussée axiale F_{ax} directement compensée par la résistance mécanique du mat et une poussée en direction de la rotation F_{rot} qui produit effectivement le déplacement.

Chaque turbine éolienne est ainsi dimensionnée pour que cette force atteigne sa valeur nominale pour une vitesse de vent nominale donnée. Lorsque la vitesse de vent devient trop élevée ou si la génératrice nécessite une vitesse de rotation fixe, la puissance extraite par l'éolienne doit être annulée ou limitée à sa valeur nominale.

2.6. LE POTENTIEL DE CONVERSION

2.6.1. Loi de Betz

Considérons le système éolien à axe horizontal représenté sur la figure 2.9 sur lequel on a représenté V_0 en amont de l'aérogénérateur et la vitesse V_2 en aval.

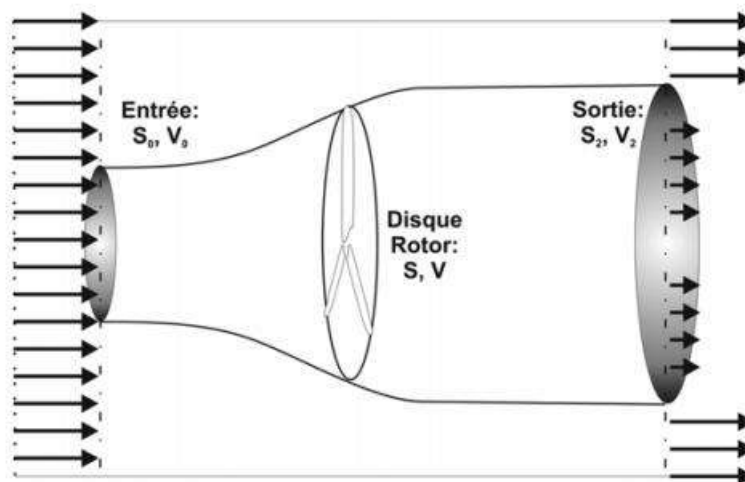


Figure 2.12 : Représentation du tube de courant

L'écoulement amont est supposé uniforme de vitesse V_0 . Dans le cas d'une éolienne, le flux d'air traversant le disque rotor de surface S est ralenti et lui fournit de l'énergie (figure 2.12). On a donc naturellement :

$$V_0 > V > V_2$$

La loi de conservation de la quantité de mouvement donne les égalités suivantes :

$$S_0 V_0 = SV = S_2 V_2$$

En notant ρ la masse volumique de l'air (en kg/m^3), la puissance absorbée par le rotor s'exprime sous la forme suivante :

$$P = \rho S V^2 (V_0 - V_2)$$

La variation de l'énergie cinétique de la masse d'air par seconde est donnée par :

$$\Delta E_c = 1/2 * \rho S V (V_0^2 - V_2^2)$$

En supposant que la vitesse du vent traversant le rotor est égale à la moyenne entre la vitesse du vent non perturbé à l'avant de l'éolienne V_0 et la vitesse du vent après passage à travers le rotor V_2 , soit :

$$V = 1/2 * (V_0 + V_2)$$

En dérivant l'expression de la puissance P par rapport à la vitesse V et en étudiant sa variation, on obtient alors une seule racine physique correspondant au maximum de la puissance absorbée par le rotor :

$$V_2 = V_0/3$$

$$P_{max} = \rho S \left(\frac{2}{3} V_0 \right)^2 \left(\frac{2}{3} V_0 \right) = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} \rho S V_0^3 \right) = \frac{1}{2} \rho C_p S V_0^3$$

$C_p = \frac{16}{27} = 0.593$ représente la fraction maximale de l'énergie passant dans le tube de courant théoriquement récupérable. Elle a été établie en 1920 par Albert Betz (scientifique allemand qui travailla dès 1911 sur l'aérodynamique au Laboratoire de Göttingen en Allemagne). Mais, de par les hypothèses utilisées qui ne sont pas vérifiées dans la réalité, cette limite est en fait une limite « haute » qui ne peut être atteinte. En effet :

- le fluide n'est pas parfait et la distribution de vitesse amont V_0 n'est pas uniforme ;
- la perte de pression due au capteur n'est pas non plus uniforme ;
- le rotor n'est pas parfait et ne récupère donc pas l'intégralité de l'énergie présente dans le tube. Il ne possède pas un nombre infini de pale et possède une traînée propre ;
- le sillage à l'aval du capteur est perturbé par les pales et leur rotation ;

Afin d'obtenir le rendement de la machine, il ne faut pas oublier de tenir compte de tous les organes et sous-systèmes qui la constituent, soit globalement :

- le rotor ;
- le multiplicateur ;
- la génératrice et l'électronique de puissance ;
- la ligne de sortie jusqu'à la connexion au réseau.

Il faut donc multiplier l'ensemble des rendements associés pour établir le rendement réel de l'éolienne. En prenant arbitrairement une valeur de 0,95 pour chaque sous-ensemble, on obtient au final un rendement de $0,95^4$ soit 81 %. Si l'on prend maintenant en compte la limite maximale de Betz, on aboutit au fait que cette éolienne ne récupèrera, au mieux que $0,593 \times 0,81$ soit 48 % de l'énergie du vent disponible.

2.6.2. Caractérisations des éoliennes

Pour classer les éoliennes par rapport à cette limite de Betz, on utilise couramment le coefficient de puissance défini par :

$$C_p = \frac{P_{\text{éolienne}}}{\frac{1}{2} \rho S V_0^3}$$

Pour décrire la vitesse de fonctionnement d'une éolienne une grandeur spécifique est utilisée : la vitesse réduite (spécifique) λ qui est un rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de la turbine et de la vitesse de vent est donnée par :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0}$$

Les performances des différents types d'éolienne

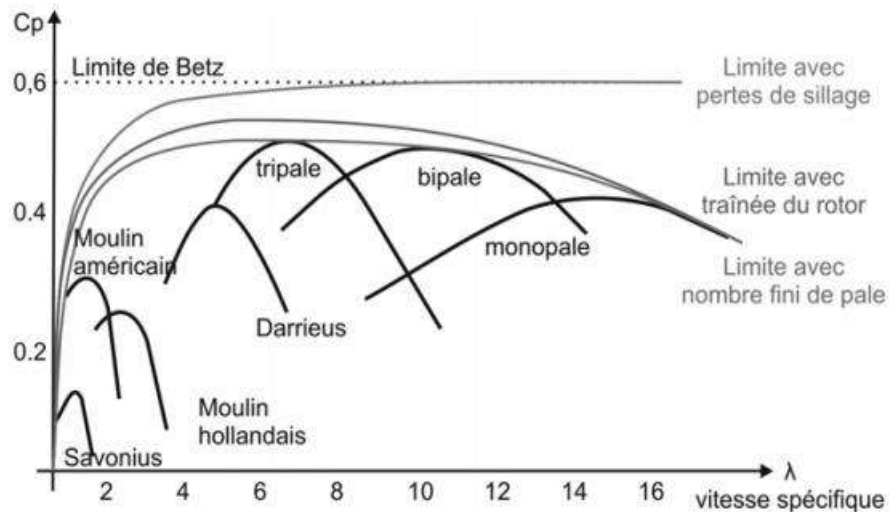


Figure 2.13: Représentation des performances des différents types d'éolienne

Avec:

Ω : la vitesse de rotation des pales (rad / s).

Selon la caractéristique propre de la voilure $C_p(\lambda)$, La puissance captée par la turbine pourra donc s'écrire :

$$P_{eol} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot S \cdot V_v^3$$

ρ : est la masse volumique de l'air (kg/m^3),

V_v : est la vitesse du vent (m/s),

S : est la surface traversée par le vent,

Pour éolienne Savonius :

$$S = 2 H R$$

Avec : R représentant le rayon de la voilure (m) et H sa hauteur (m).

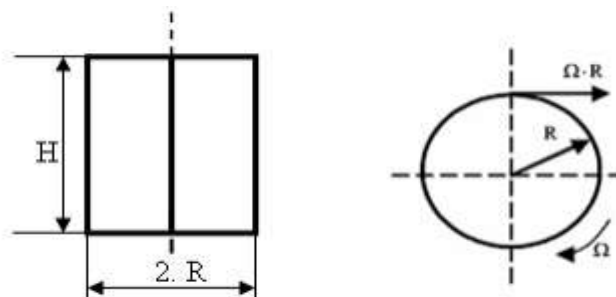


Figure 2.14 : Dimensionnement géométrique de la voilure Savonius

A partir de cette puissance, le couple éolien est donc donné par :

$$C_{eol} = \frac{P_{eol}}{\Omega}$$

Si, en remplaçant la valeur de la puissance par le produit couple – vitesse et en utilisant l’expression de la vitesse réduite, on obtient :

$$C_{eol} = \frac{C_p(\lambda) \cdot \rho \cdot R^2 \cdot H \cdot V_v^2}{\lambda}$$

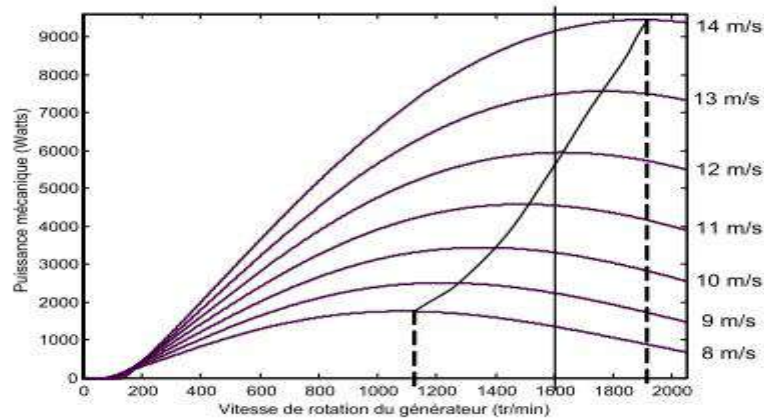


Figure 2.15 : Puissance théorique disponible pour un type d'éolienne donné

Au vu de ces caractéristiques, il apparaît clairement que si l'éolienne et par conséquent la génératrice fonctionne à vitesse fixe (par exemple 1600 tr/min sur la Figure (2.15) les maxima théoriques des courbes de puissance ne sont pas exploités. Pour pouvoir optimiser le transfert de puissance et ainsi obtenir le maximum théorique pour chaque vitesse de vent, la machine devra pouvoir fonctionner entre 1100 et 1900 tr/min pour cet exemple.

2.6.3. Modélisations existantes du coefficient de puissance

On retrouve dans la littérature plusieurs types de modélisation du coefficient de puissance, souvent tous limités par les données d'entrée, donc généralement valables pour une turbine particulière : chaque turbine a un comportement spécifique et les constructeurs sont peu bavards sur leurs propres produits. Ainsi, tout le monde est confronté à ce problème de modélisation du coefficient de puissance. Néanmoins, l'allure des réseaux de courbes est toujours la même et l'handicap de modélisation peut être levé.

L'équation analytique de C_p en fonction de λ résultant de l'interpolation, est donnée par

$$C_p(\lambda) = -0,2121 \cdot \lambda^3 + 0,0856 \cdot \lambda^2 + 0,2539 \cdot \lambda$$

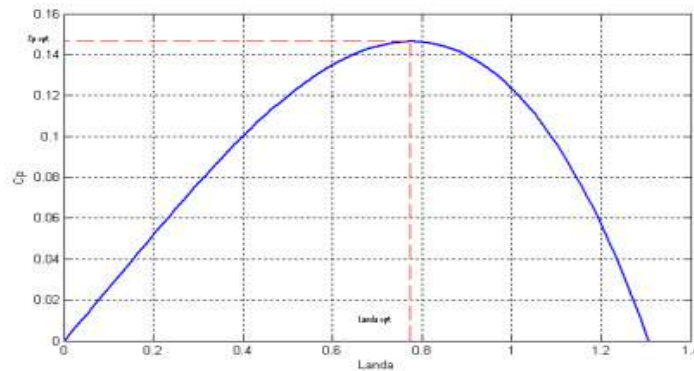


Figure 2.16 : Courbe $C_p(\lambda)$ de la voilure étudiée de type Savonius

La figure 2.16 présente le tracé de la caractéristique. Il apparaît un maximum pour une vitesse réduite de 0.78. Afin d'optimiser la conversion de puissance, il faut essayer de conserver cette vitesse réduite, soit modifier la vitesse de rotation lorsque la vitesse du vent varie.

Exemple :

Cette modélisation, a l'avantage de se présenter sous la forme d'une seule équation, valable quel que soit l'angle de calage β et quel que soit le rapport de vitesse λ . L'équation donnant C_p est présenté par :

$$C_p(\lambda, \beta) = c_1 \cdot \left(c_2 \cdot \frac{1}{\Lambda} - c_3 \cdot \beta - c_4 \cdot \beta^x - c_5 \right) e^{-c_6 \cdot \frac{1}{\Lambda}}$$

Dans cette formule, le paramètre Λ dépend également de β et λ :

$$\frac{1}{\Lambda} = \frac{1}{\lambda + 0.08 \cdot \beta} - \frac{0.035}{1 + \beta^3}$$

Les six coefficients définis, c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , c_5 , c_6 , dépendent de la turbine considérée. L'exemple donné ci-dessous correspond à la turbine E-40 proposée par le constructeur allemand ENERCON dont la puissance nominale est de 500kW :

coefficient	valeur
c_1	0.5
c_2	116
c_3	0.4
c_4	0
c_5	5
c_6	21

Tab 2.1 : Coefficients définissant l'évolution de C_p

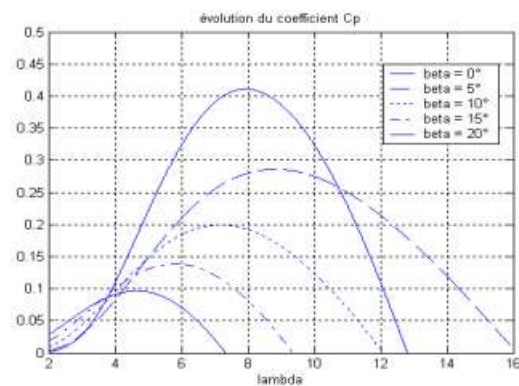
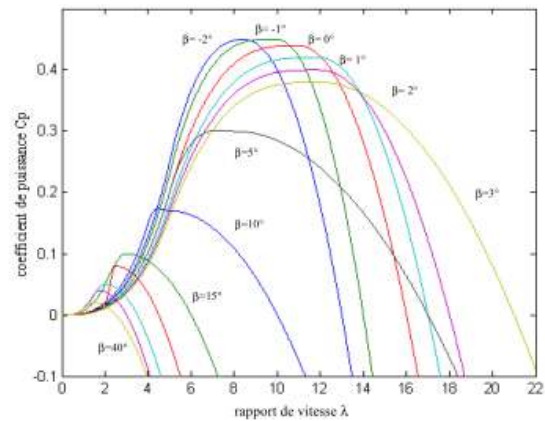


Figure 2.17 : Coefficient de puissance C_p en fonction de λ pour différents β

Exemple1 :

Coefficients de puissance pour différentes valeurs de β (pour une turbine de 660kW.)

β	C_{pp}	λ_p	C_{pm}	λ_m	λ_0	m	N
0	0.20	5	0.44	11	16	0.120	3
1	0.18	5	0.42	12	17	0.108	3
2	0.17	5	0.40	12	18	0.102	3
3	0.16	5	0.38	12	21	0.096	3
5	0.20	5	0.30	8	17	0.120	3
10	0.15	4	0.17	5	10	0.112	3
20	0.02	2	0.08	2.5	4.5	0.030	3
30	0.01	1	0.04	1.75	3.0	0.030	3



$$C_p(\lambda, \beta_i) = (0.44 - 0.0167\beta_i) \sin\left(\pi \frac{\lambda - 3}{15 - 0.3\beta_i}\right) - 0.00184(\lambda - 3)\beta_i$$

Avec β_i exprimé en degrés.

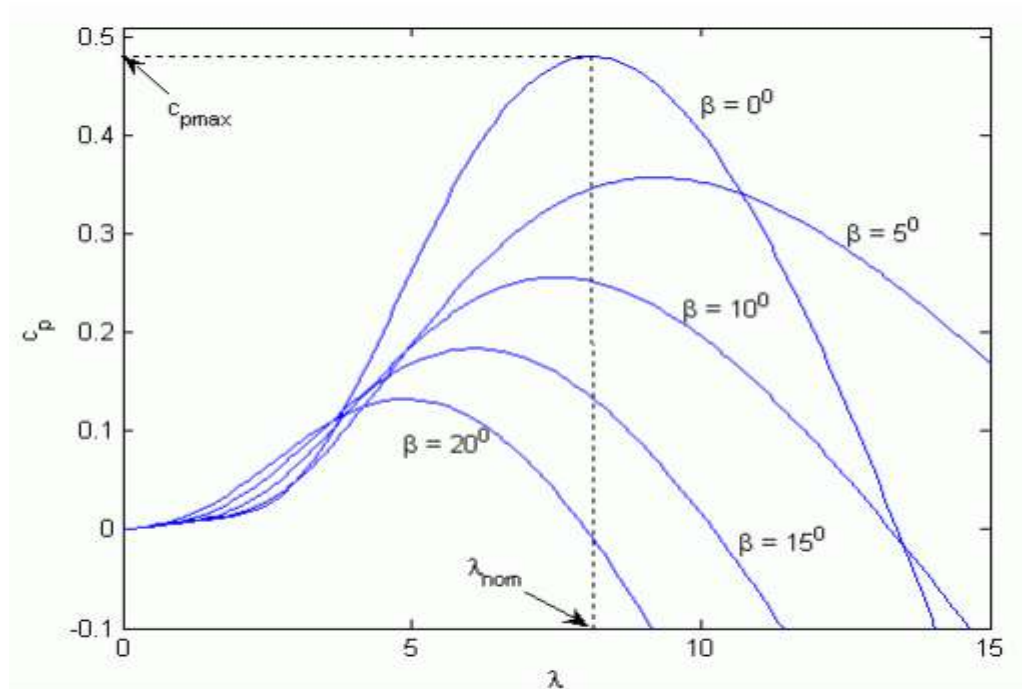


Figure II-2 : Coefficient de puissance C_p

2.7. Taille des machines

Les aérogénérateurs produisent différentes quantités d'électricité selon la taille des pales. Des rotors de 1 m de diamètre environ, produisent quelques centaines de watts d'électricité. Les rotors d'un diamètre de près de 127 m produisent 7 mégawatts. La figure suivante montre L'énergie produite en fonction de la taille des machines.

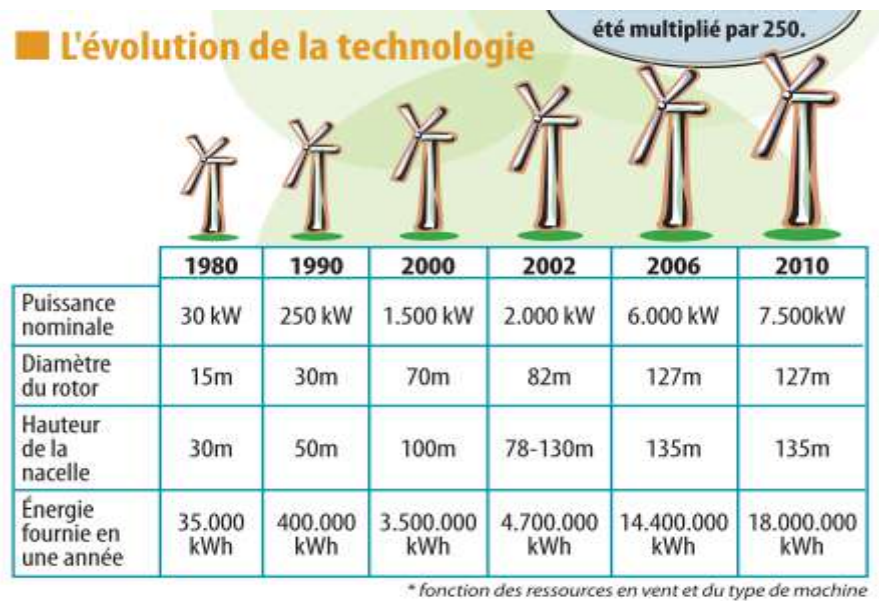


Figure 2.19 : Les éoliennes de 7,5MW produisent de l'électricité pour environ 6000 à 7000 ménages hors chauffage en fonction des ressources en vent et du type de machine.
Le Mont des 4 Faux sera donc à la pointe de la technologie.

Le développement des machines de grande puissance

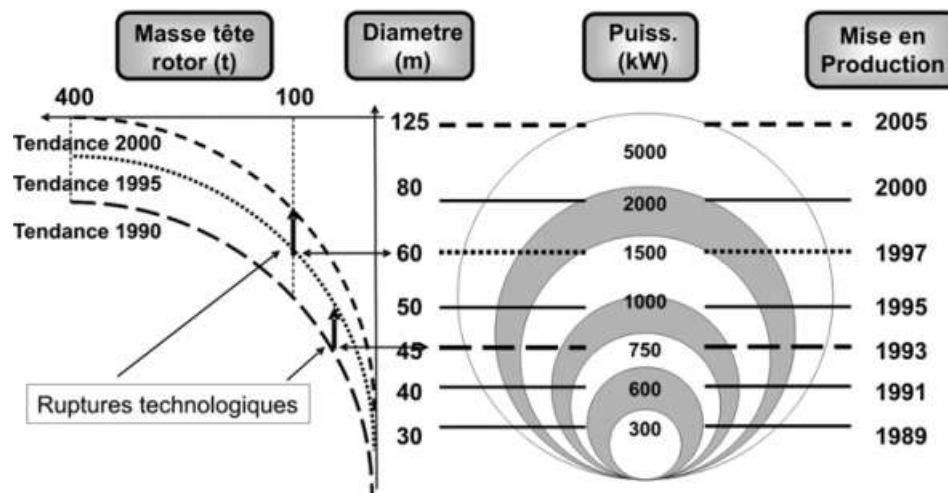


Figure 2.19 : Représentation schématique de l'évolution des prototypes, proposés par la suite sur le marché, en fonction de leurs puissance, diamètre et masse de l'ensemble nacelle/rotor

La plus grande éolienne du monde est aujourd'hui le modèle E-126 d'Enercon : d'une hauteur de 135m, l'installation dispose d'un rotor de 127m de diamètre. L'E-126 est une version améliorée de l'un des plus grands modèles existant jusqu'ici, la E-112. Elle affichait une puissance nominale de 6 MW. Cette nouvelle version devrait atteindre les 7MW de capacité, pour une production estimée de 20 millions de kWh par an. De quoi alimenter 5 000 foyers grâce à une seule installation.



2.8. Distributions de Weibull

Le choix géographique d'un site éolien est primordial dans un projet de production d'énergie. Les caractéristiques du vent vont déterminer la quantité de l'énergie qui pourra être effectivement extraite du gisement éolien. Pour connaître les propriétés d'un site, des mesures de la vitesse du vent ainsi que de sa direction, sur une grande période du temps, sont nécessaires (un à dix ans).

En effectuant la caractérisation d'un site éolien, il est impératif de connaître la hauteur sur laquelle les mesures sont prises et ensuite adapter les résultats à la hauteur du mat de

l'éolienne. En effet, la vitesse du vent augmente selon la hauteur et les valeurs de rugosité D en fonction du caractère des obstacles dans l'environnement proche.

$$V_v(h) = V_v(h_{\text{mes}}) \cdot \frac{\ln(h/\alpha)}{\ln(h_{\text{mes}}/\alpha)}$$

Nature du sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0,0002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0,0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces.	0,03
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m.	0,055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m.	0,1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m.	0,2
Villages, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés.	0,4
Grandes villes avec bâtiments hauts	0,8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel.	1,6

2.9. Technologies d'éoliennes

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante (éoliennes à vitesse fixe) et celles de vitesse est variable.

Les avantages des éoliennes à vitesse fixe sont :

- Système électrique plus simple.
- Plus grande fiabilité.
- Pas besoin de système électronique de puissance.
- Moins cher.

Les avantages des éoliennes à vitesse est variable sont:

- 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.

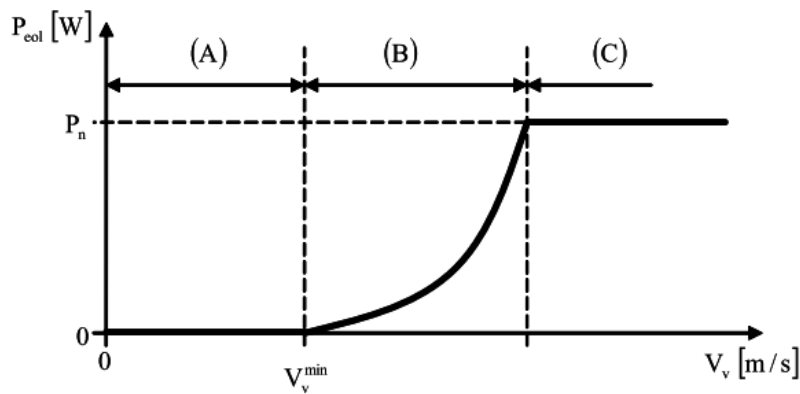


Figure 2.20: Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent

2.10. Systèmes de régulation de la vitesse de rotation de l'éolienne

2.10.1 Système à décrochage aérodynamique "stall"

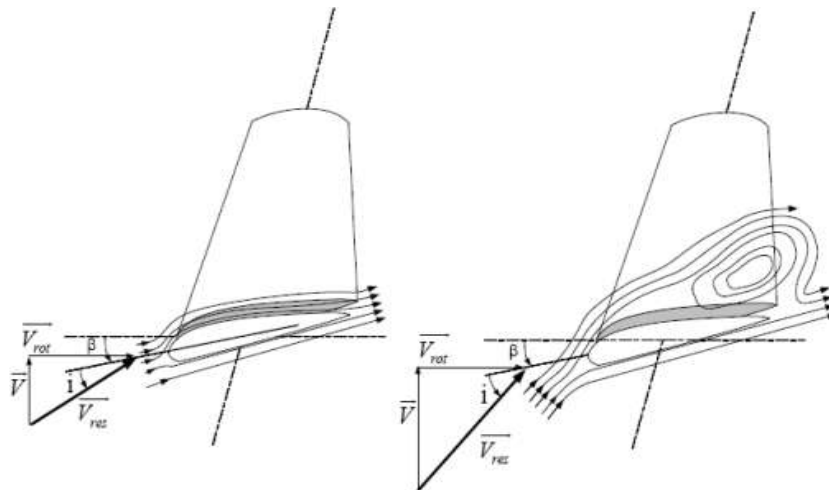


Figure 2.21 : Flux d'air sur un de pales profile (stall)

Le système de limitation de vitesse le plus simple et le moins coûteux est un système de limitation naturelle (intrinsèque à la forme de la pale) dit "stall". Il utilise le phénomène de décrochage aérodynamique. Lorsque l'angle d'incidence i devient important, c'est à dire lorsque la vitesse du vent dépasse sa valeur nominale V_n , l'aspiration créée par le profil de la pale n'est plus optimale ce qui entraîne des turbulences à la surface de la pale (Figure 2.21) et par conséquent une baisse du coefficient de puissance. Ceci empêche alors une augmentation de la vitesse de rotation. Ce système est simple et relativement fiable mais il manque de précision car il dépend de la masse volumique de l'air et de la rugosité des pales donc de leur état de propreté.

2.10.2. Les éoliennes à pales orientables (Pitch)

L'utilisation d'un système d'orientation des pales permet, par une modification aérodynamique, de maintenir constante la puissance de la machine en fonction de la vitesse du vent et pour une vitesse du vent supérieur à la vitesse nominale. Le système d'orientation des pales à un coût très

élevé par rapport au système à décrochage aérodynamique. La figure (1.10) illustre la variation de l'angle de décalage d'une pale.

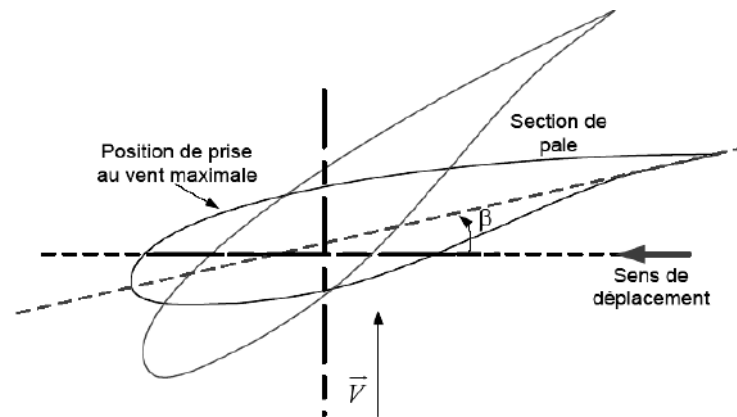


Figure 2.22. Variation de l'angle de calage d'une pale.

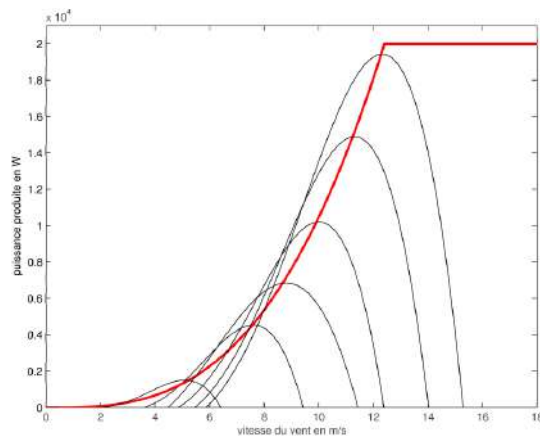


FIG. 4.10 – Puissance produite par la génératrice en fonction de la vitesse du vent.

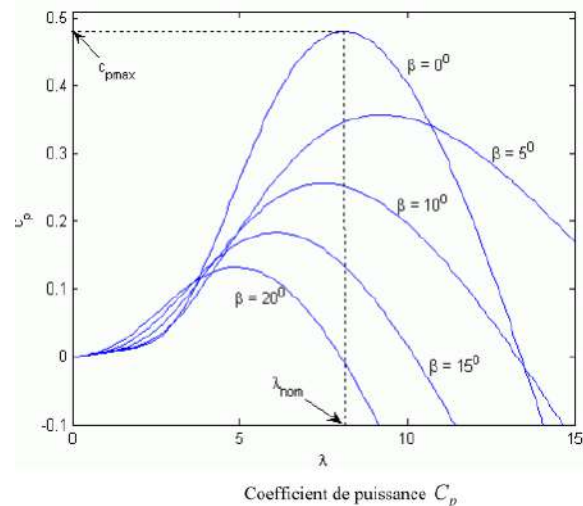


Figure 2.23:

La figure 2.23 représente le coefficient de puissance C_p (calculé à partir de l'équation) $C_p = (\lambda, \beta)$ en fonction du rapport de vitesse λ pour différents angles d'inclinaison des pales β . On remarque que si, pour un angle constant β_i , on pouvait maintenir le coefficient de vitesse λ constant et égal à λ_{optimal} à chaque instant, la puissance captée par l'éolienne serait maximale. La figure II.2 montre le λ_{optimal} correspondant à un angle d'inclinaison des pales β , cette condition ne peut être vérifiée qu'avec l'utilisation de la vitesse variable. En effet, afin de maintenir optimal $\lambda = \lambda_{\text{optimal}}$, il est nécessaire de faire varier la vitesse de rotation du générateur (et de l'éolienne) avec les variations de vitesse du vent.

Pour un fonctionnement à vitesse de rotation fixe, le coefficient λ varie avec la vitesse du vent : la puissance captée est maximale seulement pour une vitesse du vent donnée (généralement la vitesse nominale de fonctionnement).

Le fonctionnement à vitesse de rotation variable permet d'optimiser l'énergie captée par l'éolienne mais demande la mise en œuvre d'un convertisseur avec sa commande.

SERIE N° 2**Fonctionnement des Aérogénérateurs****Exercice N°1 :**

- Montrer que la limite max de Betz pour une éolienne est $\frac{16}{27} = 0.593$
- Déterminer la vitesse V_2 pour laquelle, la puissance est maximale.

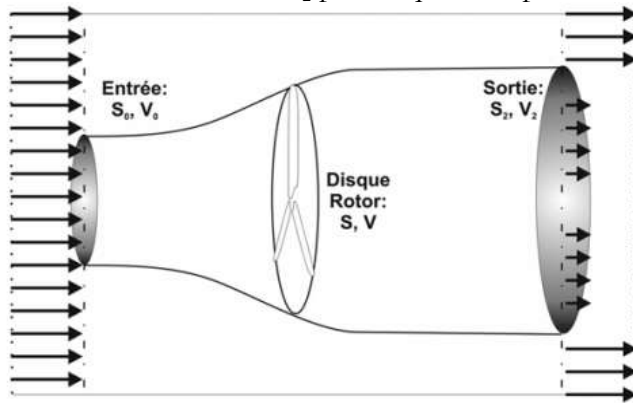


Figure – Représentation du tube de courant

Exercice N°2 :

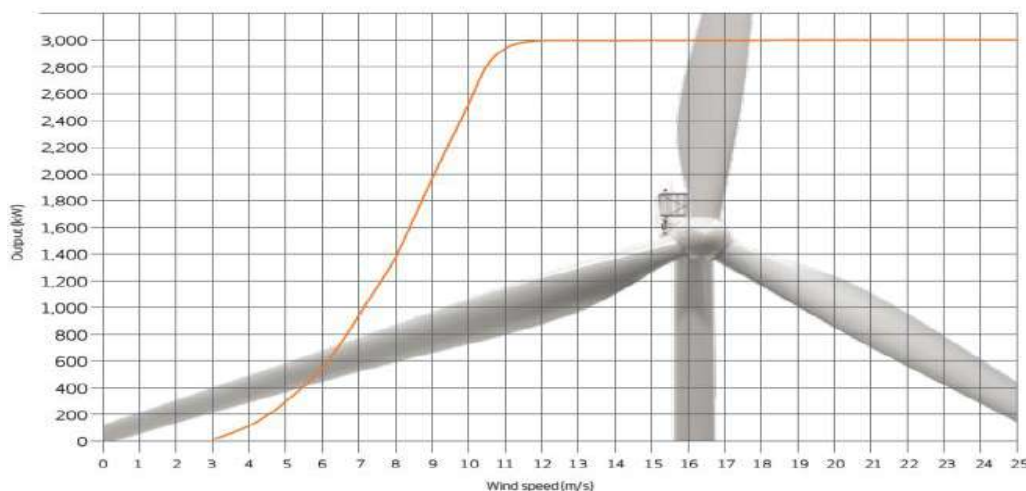
Une éolienne de diamètre 90 m peut tourner régulièrement en effectuant 16 tours par minutes. Quel est alors la vitesse en km/h à l'extrémité des pales ?

Exercice N°3 :

Nous souhaitons dimensionner les pales d'une éolienne à vitesse fixe pour obtenir une puissance mécanique de 750 kW pour une vitesse de vent de 13,8 m/s. On considère un coefficient de puissance C_p égal à 0,2. Quel sera la longueur de notre pale ou le rayon de la surface balayée par la turbine ?

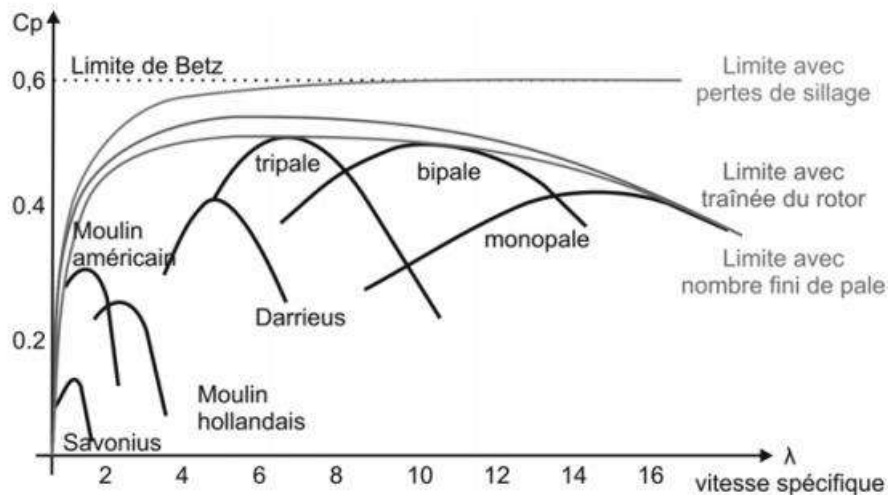
Exercice N°4 :

1. Quelle est la vitesse du vent à partir de laquelle l'éolienne devient opérationnelle ?
2. Quelle est la puissance électrique atteinte par l'éolienne quand le vent souffle à 10 m/s ?
3. Quelle est la puissance maximale que peut fournir l'éolienne ? A partir de quelle vitesse du vent est-elle atteinte ?
4. Quelle est environ la puissance électrique fournie (en Mw) quand le vent souffle à 25 km/h ?
5. La puissance électrique fournie est-elle proportionnelle à la vitesse du vent ? Justifier.
6. Pourquoi le graphique ne va-t-il pas au-delà d'une vitesse du vent de 25 m/s ?
7. Que fait l'éolienne lorsque le vent atteint une telle vitesse ?



Exercice N°5 :

Expliquer la courbe présentée et justifier le choix des éoliennes tripales

**Exercice N°6 :**

On donne quelques paramètres d'une éolienne de 300 kW:

Diamètre des pales : 28 m, Surface balayée par le rotor : 615 m², densité de l'air est de 1,225 kg/m³.

Vitesse nominale du vent : 14 m/s , Vitesse nominale de rotation du rotor : 43 tr/min

Rapport du multiplicateur : 35 , Vitesse nominale de la MAS : 1515 tr/min

Quel pourcentage de l'énergie du vent récupère-t-on au point de fonctionnement nominal ?

De quel type d'éolienne s'agit-il : éolienne lente ou éolienne rapide ?

Quelle est la vitesse nominale N du rotor de la génératrice ?

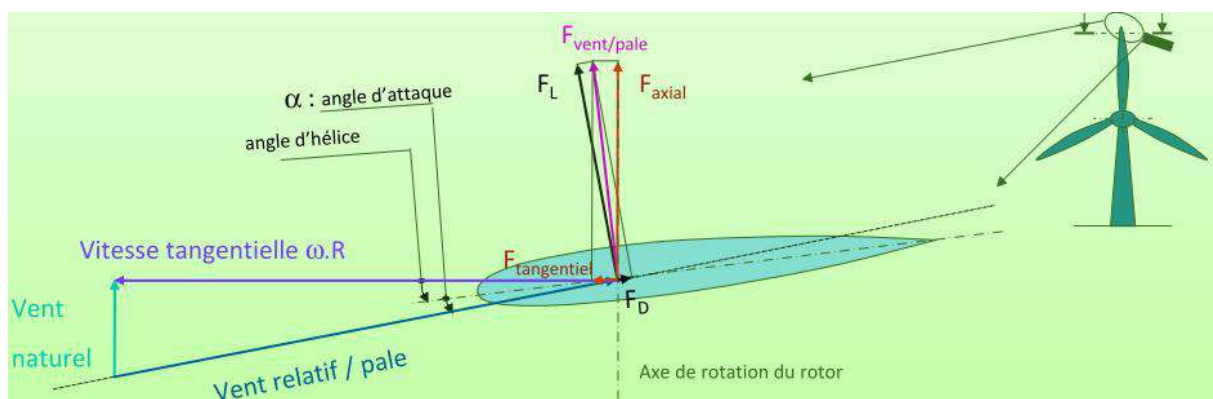
Exercice N°7 :

- Montrer les différentes forces appliquées sur une pale
- Pourquoi le profil des pales varie tout au long de la pale (pales vrillées) ?



En effet, la composition vectorielle des vitesses, circonferentielle et celle du vent, tout au long de la pale implique que le module du vecteur vent relatif est plus important en bout de pale que près de l'axe et que l'angle d'incidence α par rapport au profil de la pale varie lui aussi tout au long de la pale.

C'est pour ces deux raisons que premièrement les pales des éoliennes sont larges au niveau du pied de pale et vont en s'affinant jusqu'au bout, et deuxièmement les pales sont vrillées tel que l'angle de calage soit plus important au pied de pale et plus faible à l'extrémité afin d'obtenir un angle d'incidence α du vent relatif constant sur toute la pale.



Types de conversion électromécanique

Technologies de production d'électricité à partir de l'énergie éolienne

- 1) Turbine entraînant une génératrice à c.c. (Fig. 45-35)
- 2) Turbine entraînant une génératrice asynchrone à vitesse constante (Fig. 45-36)
- 3) Turbine entraînant une génératrice asynchrone à vitesse variable (Fig. 45-37)
- 4) Turbine entraînant une génératrice asynchrone à double alimentation à vitesse variable (Fig. 45-38)
- 5) Turbine entraînant une génératrice synchrone à aimants permanents à vitesse variable (Fig. 45-39)

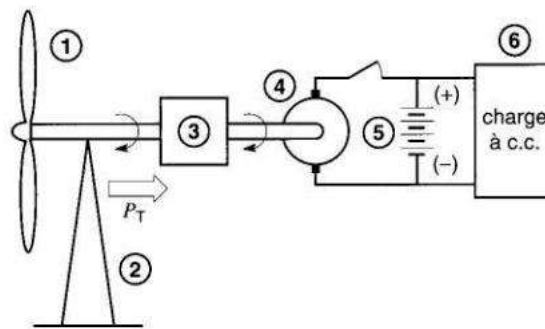


Fig. 45-35
Turbine éolienne entraînant une petite génératrice à c.c.

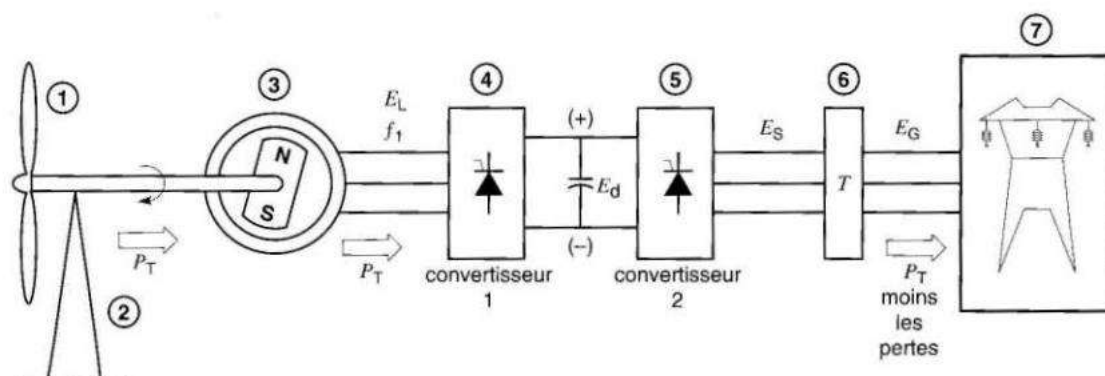


Fig. 45-39
Turbine éolienne couplée à une génératrice synchrone à aimants permanents. Le couplage direct, sans boîte de vi-

tesses, permet d'éviter les dégâts éventuels au système d'engrenages à la suite des coups de vent brusques.

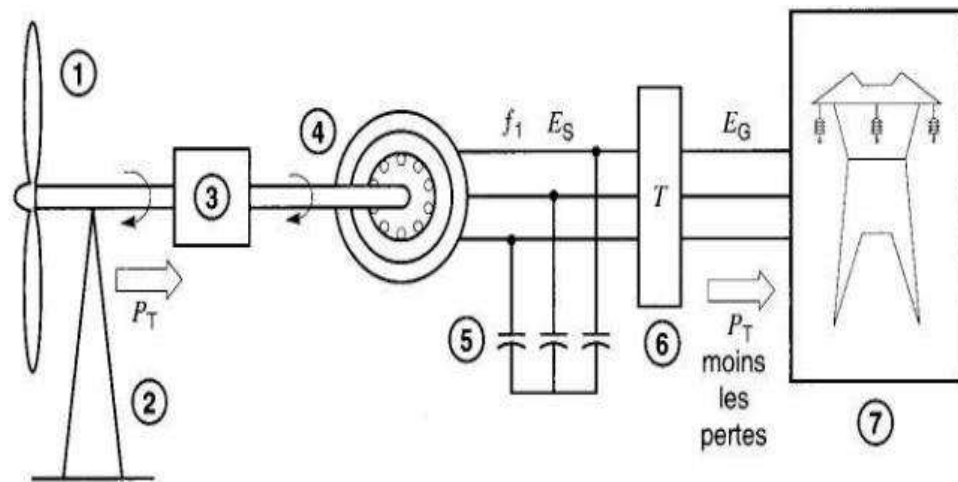


Fig. 45-36

Turbine éolienne entraînant une génératrice asynchrone à travers une boîte de vitesses. La vitesse de la génératrice reste pratiquement constante, quelle que soit la vitesse du

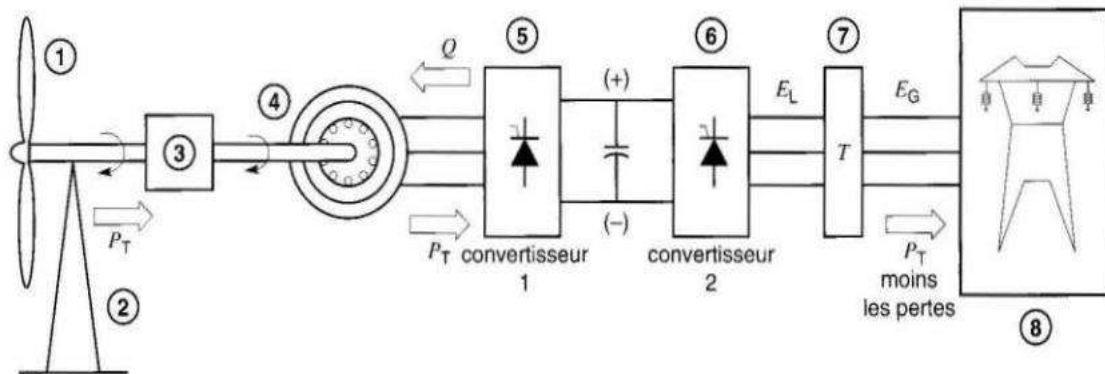


Fig. 45-37

Turbine éolienne couplée à une génératrice asynchrone à vitesse variable. La génératrice est reliée au réseau à tra-

vers un convertisseur à fréquence variable, ce qui permet d'extraire en tout temps la puissance maximale du vent.

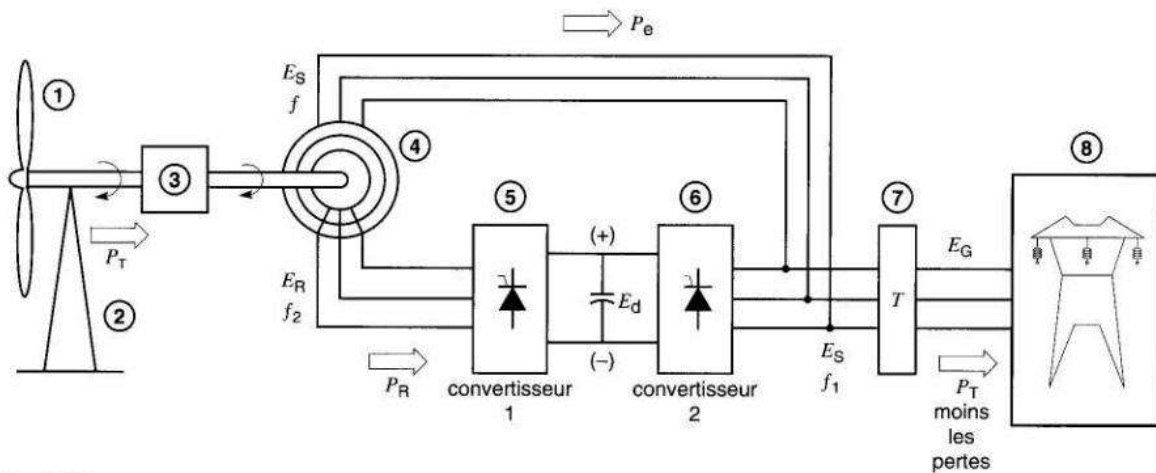


Fig. 45-38

Turbine éolienne couplée à une génératrice asynchrone à double alimentation. Les convertisseurs 1 et 2 transfor-

ment seulement une partie de la puissance totale générée par l'éolienne.