

CHAPITRE III

ENERGIE EOLIENNE

INTRODUCTION

Bien que ne pouvant 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, etc.

Son développement s'est fortement accéléré depuis 1995 avec une progression moyenne de 20 % par an dans le monde. Cette progression s'accompagne par une évolution de la fiabilité, de la taille des éoliennes et de leur rendement. Le coût de production du kilowattheure a progressivement baissé pour atteindre un niveau compétitif par rapport aux autres sources d'énergie.

Dans l'ensemble de la puissance installée, l'Europe est le leader (figure 1), suivi par l'Amérique du Nord. Le développement du marché américain (en particulier la Californie et ses immenses fermes éoliennes) s'est effondré dans la période 1986-1990 et a provoqué une profonde réorganisation du monde industriel éolien. Les pays européens (Danemark, Pays-Bas, Allemagne, Angleterre et maintenant Espagne) ainsi que l'Inde ont entrepris une politique volontariste d'aide et ont donc pris le relais. Cela explique la part prédominante de ces pays dans la production actuelle d'électricité ou de machines.

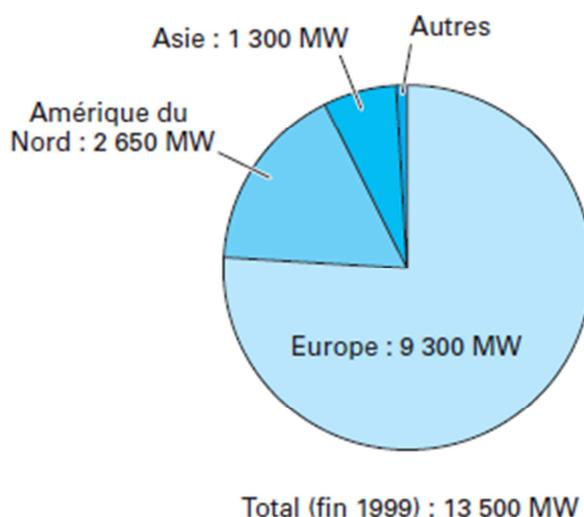


Figure 1 – Puissance installée dans le monde

DIFFERENTS TYPES D'EOLIENNES ET LEURS UTILISATIONS

On peut aisément classer les éoliennes en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal. D'autres configurations plus anecdotiques (profils oscillants, aubes mobiles, profils en translation) ont vu le jour mais n'ont jamais débouché sur une quelconque industrialisation.

1 - MACHINES A AXE VERTICAL

Deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines, à savoir la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence.

Traînée différentielle

Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (figure 2). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe. L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le

rotor de Savonius (figure 3), du nom de son inventeur, un ingénieur finlandais qui l'a breveté à la fin des années 1920. Le fonctionnement est ici amélioré par rapport à l'anémomètre par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur. On peut aisément imaginer que, lors du démarrage de ce type de machine (phase d'établissement du vent), les cylindres soient orientés par rapport au vent de telle manière que le couple résultant soit nul. L'éolienne ne pourra donc pas démarrer spontanément. La superposition de plusieurs rotors identiques, mais décalés d'un certain angle l'un par rapport à l'autre, permet de remédier à ce problème, rendant ainsi la machine totalement autonome. Il est intéressant de noter que ce type de rotor peut être construit à partir de fûts industriels découpés, ce qui rend son implantation aisée dans les pays en voie de développement.

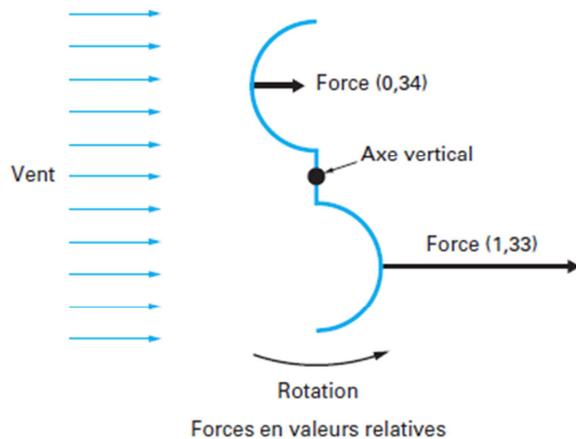


Figure 2 – Effet du vent sur un corps creux

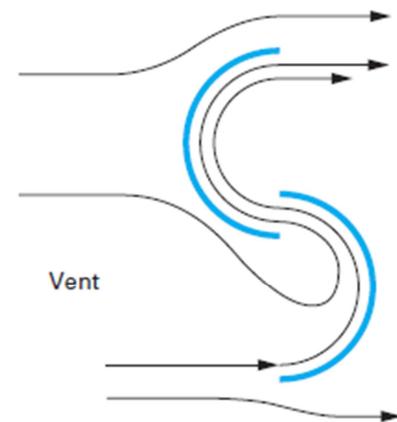


Figure 3 – Rotor de Savonius

Variation cyclique d'incidence

Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur (figure 4). En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français **Darrieus**. De tels rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, parabolique... (figure 5). Le fonctionnement intrinsèque faisant appel à la rotation des pales, cela signifie que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de lancement, s'avère donc nécessaire, pour lequel différentes solutions ont été essayées par les constructeurs : montage d'une autre éolienne de type Savonius par exemple sur l'axe vertical, utilisation de la génératrice électrique en moteur...

Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

En revanche, le fait qu'une telle éolienne soit érigée près du sol signifie que le capteur d'énergie se situe dans une zone peu favorable (gradient de vent, turbulence due aux accidents du terrain en amont de la machine), ce qui réduit significativement l'efficacité de la machine. Par ailleurs, le principe même de fonctionnement, basé sur des variations incessantes de charge aérodynamique sur les pales, fait que ces éoliennes sont très sujettes aux problèmes d'aéroélasticité. Enfin, pour des éoliennes de grande puissance, la surface occupée au sol par le haubanage est très conséquente.

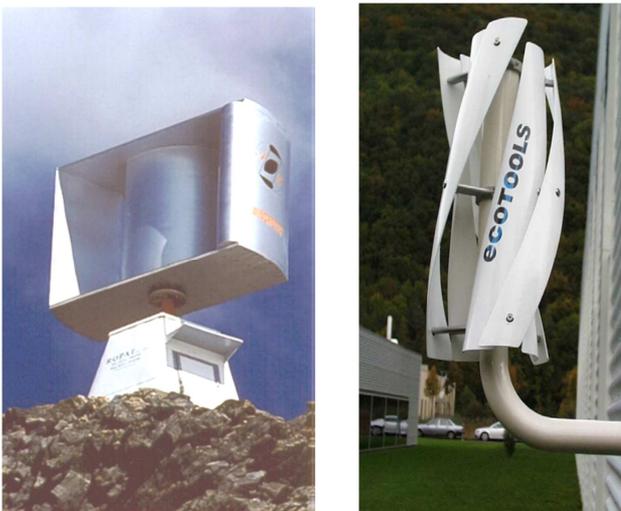
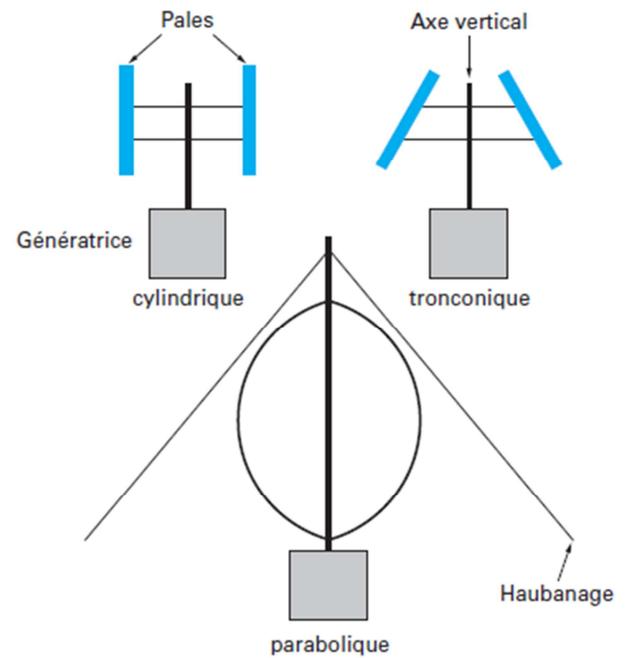
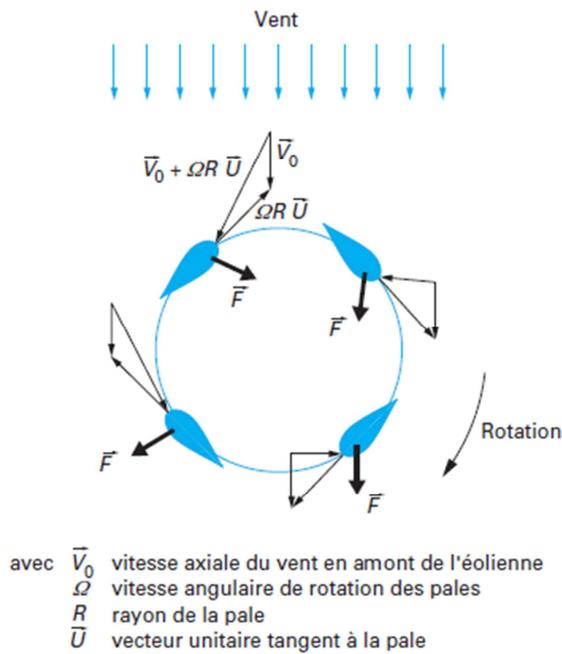


Figure 4 – Principe de l'incidence variable



Figure 5 – Différents types de rotor Darrieus

2 – MACHINES A AXE HORIZONTAL

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion. La portance de ces ailes placées dans le vent ne sert pas ici à sustenter un aéronef mais à générer un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique tel qu'une génératrice électrique, une pompe...

Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 1 et 3 et peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Deux types de configuration peuvent être rencontrés : les éoliennes « **amont** », sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposé au vent, et les éoliennes « **aval** » (figure 6).

Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients : la formule « amont » requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration « aval » autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs, dans le cas d'une machine « amont », l'écoulement de l'air

sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour. L'effet de masque est plus important dans le cas d'une machine « aval ». Enfin, une machine « aval » est théoriquement auto-orientable dans le lit du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grande puissance adoptent la configuration « amont ». Une catégorie particulière d'éolienne à axe horizontal est celle des machines multi-pales de faible diamètre (jusqu'à 10 m environ). La masse importante de la roue aubagée, les vitesses de rotation peu élevées (en regard du diamètre) font que ces machines de faible puissance sont utilisées principalement pour le pompage de l'eau (figures 7 et 8). Cependant, une application récente de ce type de machine (avec des diamètres de l'ordre du mètre) est la génération électrique à bord de bateaux de plaisance ou de course au large.

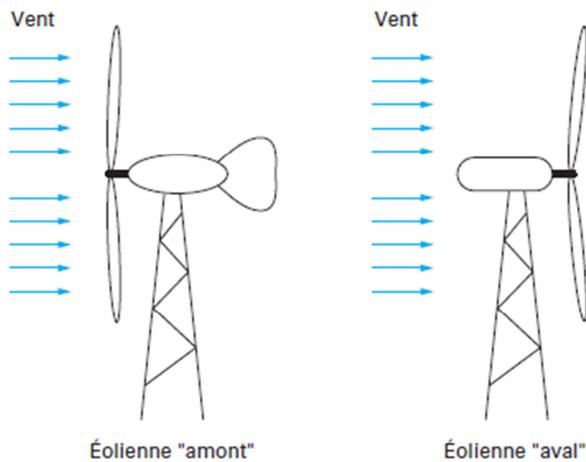


Figure 6 – Configurations à axe horizontal

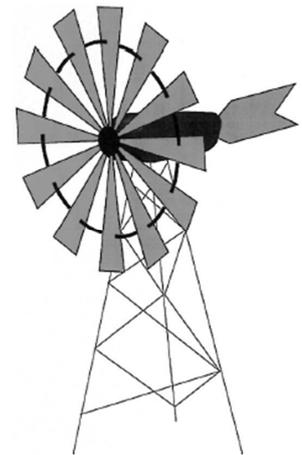


Figure 7 – Éolienne multi-pale

APPLICATION DES EOLIENNES

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent.

Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation (tenant compte bien entendu du rendement de la machine). Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières

- soit directement pour entraîner par exemple une **pompe de relevage d'eau** ;
- soit pour entraîner une **génératrice électrique**.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration :

- l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure ;
- l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir d'une part la complémentarité avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques ou nucléaires, barrages...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et d'autre part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement (alimentation d'unités de désalinisation, cogénération avec des groupes diesel, des panneaux photovoltaïques...).



Figure 8 – Éolienne multi-pale Eiffel (fin XIXe siècle)

ARCHITECTURE D'UNE ÉOLIENNE A AXE HORIZONTAL

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, comme illustré sur la figure 9 pour une machine de type « amont ».

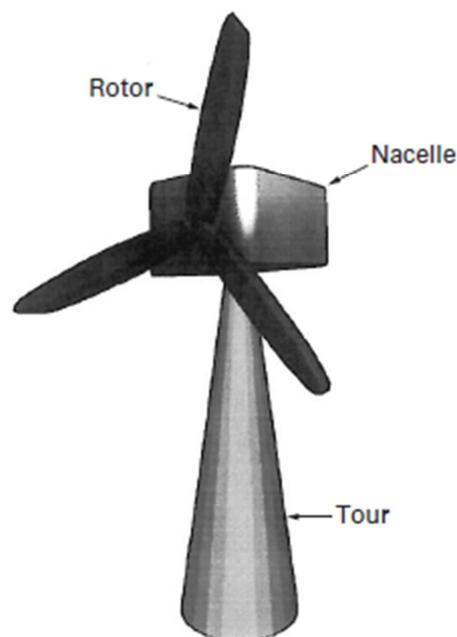


Figure 9 – Composantes d'une éolienne

Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variable, freinage du rotor...).

Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure 10 présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

- **le multiplicateur de vitesse** : il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques ;
- **l'arbre secondaire** comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine ;
- **la génératrice** : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique. Différents types de génératrice peuvent être rencontrés comme on le verra dans le paragraphe 6 ;
- **un contrôleur électronique** chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor + nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts stationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir ;
- **divers dispositifs de refroidissement** (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile ;
- **un groupe hydraulique et ses servitudes** si nécessaire ;
- **le dispositif d'orientation de la nacelle**. Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée : cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance. Le dispositif d'orientation comprend un compteur de tours, de manière à éviter de tordre inconsidérément le câble acheminant l'énergie électrique provenant de la génératrice jusqu'au pied de la tour. En effet, l'utilisation d'un collecteur tournant n'est guère envisageable au vu des intensités élevées qui transitent (parfois plusieurs centaines d'ampères). Au bout d'un certain nombre de tours de la nacelle, celle-ci est alors manœuvrée en sens inverse à l'aide des moteurs d'orientation pour dévriller le câble. Celui-ci est généralement muni d'un interrupteur (actionné par la traction du câble résultant de son vrillage) qui empêche toute rotation supplémentaire de la nacelle en cas de défaillance du compteur.

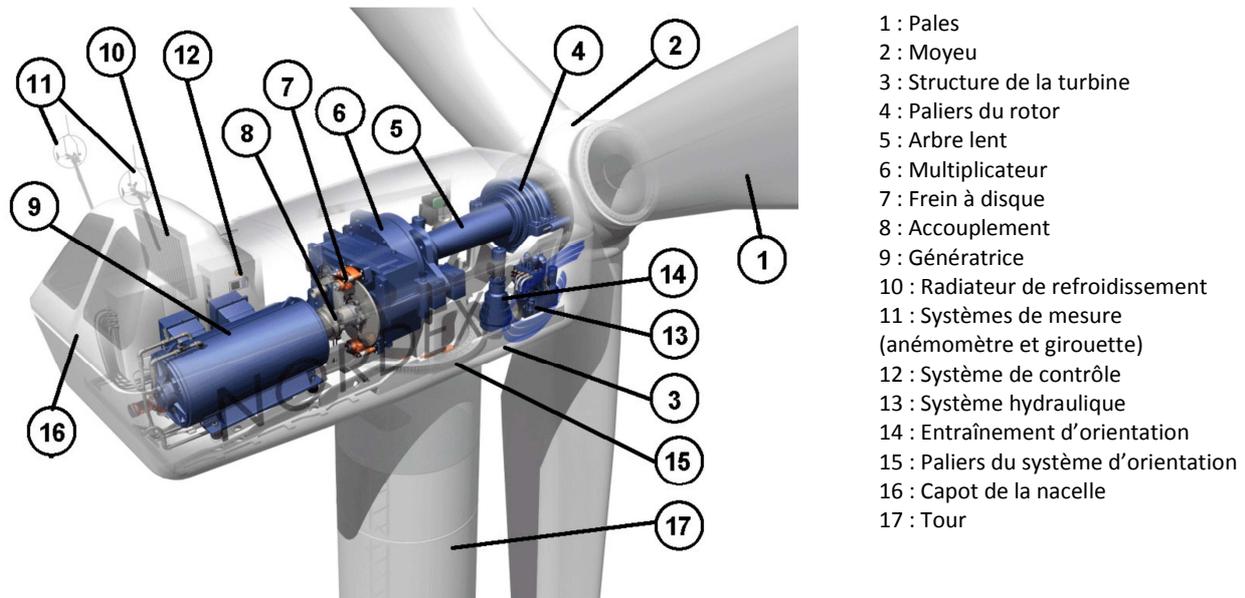


Figure 10 – Composition de la nacelle

Tour

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor + nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation.

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer :

- **mât haubané** : il est simple de construction mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât. Il présente toutefois l'avantage de pouvoir soustraire l'éolienne à des conditions météorologiques extrêmes (forte tempête, cyclone). L'emprise au sol du haubanage peut devenir un obstacle à son utilisation ;
- **tour en treillis** : son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain ;
- **tour tubulaire** : bien que de construction plus complexe, elle a la faveur des constructeurs car elle permet d'abriter certains dispositifs de régulation ou de commande et apporte une protection évidente aux personnels chargés de la maintenance qui doivent grimper jusqu'à la nacelle (installation aisée d'une échelle voire d'un ascenseur intérieur). Son aspect esthétique est de plus un atout pour l'intégration visuelle harmonieuse de l'éolienne.

MODELISATION DE L'ÉCOULEMENT A TRAVERS L'ÉOLIENNE

PUISSANCE FOURNIE PAR LE VENT – Théorème de Froude

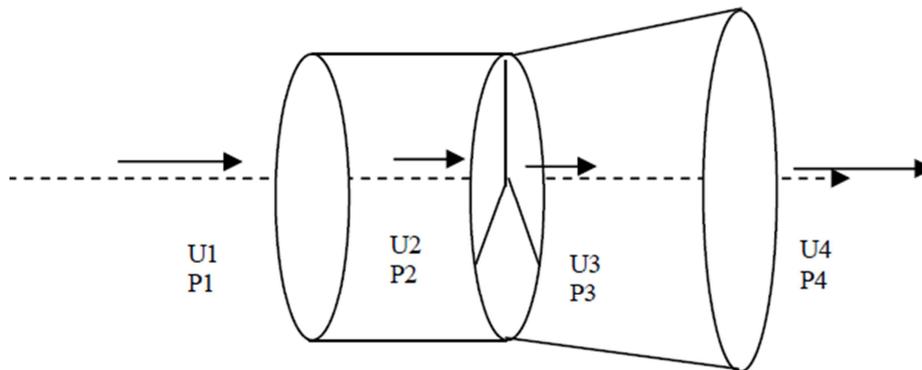


Figure 11 – Tube de courant fluide passant à travers l'éolienne

En Appliquant le théorème de Bernoulli à l'entrée et à la sortie du tube de courant, présenté sur la figure 11, et en admettant que :

- la vitesse juste à l'entrée de la surface, formée par les hélices, est égale à celle de la sortie ($U_2 = U_3$) ;
- Les pressions en amont et en aval de l'éolienne sont égales ($P_1 = P_4$)
- La loi de conservation de masse est vérifiée ;

On obtient :

$$U_2 = U_3 = \frac{1}{2}(U_1 + U_4)$$

La puissance fournie par le vent :

$$\Delta P = \Delta E_c = \frac{1}{2}\rho U_2(U_1^2 - U_4^2)$$

COEFFICIENT DE PUISSANCE – Théorème de Betz

En définissant le coefficient de puissance $C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho A U_0^3}$, on aboutit à la limite de Betz, première personne ayant développé la théorie globale du moteur éolien à axe horizontal.

Où :

- P est la puissance récupérée par l'éolienne
- C_p est le coefficient de puissance
- A est l'aire du disque rotor

$$C_{Pmax} = \frac{16}{27}$$

qui caractérise la limite maximale de l'énergie, due à la masse d'air amont, susceptible d'être captée par une éolienne. Ce coefficient de puissance permet de classer les différents types d'éoliennes suivant leur nature (figure 12).

Il est donc à noter que les meilleures machines à axe horizontal, bipale ou tripale, se situent à 60-65 % de la limite de Betz : on ne récupère donc globalement que 40 % de l'énergie due au vent.

NB : La démonstration sera faite durant le cours.

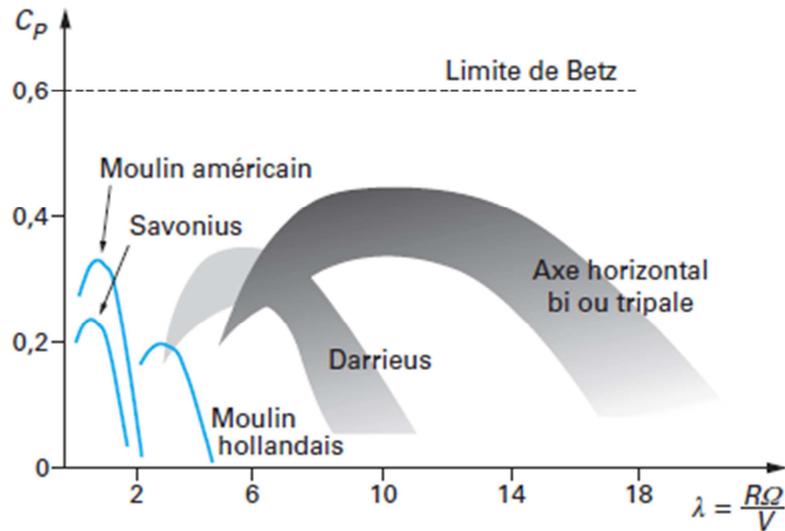


Figure 12 - Classement des types d'éolienne

Donc le coefficient de puissance d'une éolienne peut être calculé à partir de :

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1}$$

Où a est le facteur d'induction.

$$C_p = 4a(1 - a)^2$$

AERODYNAMIQUE DE LA PALE

TERMINOLOGIE

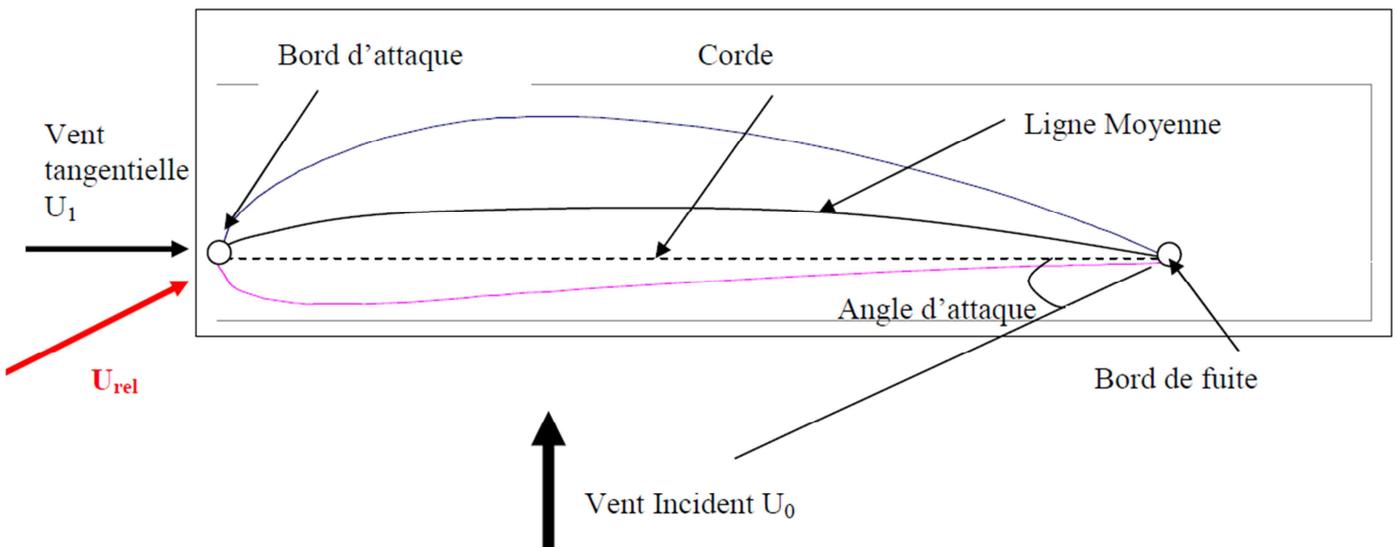


Figure 13 – Section dans une pale

THEORIE DES AILES

Quand un corps est plongé dans un fluide (Eau – ex : gouvernail d'un bateau, Air – ex : ailes d'un avion) et possède un mouvement relatif par rapport au fluide dans lequel il est plongé, la traînée F_D est définie

comme la composante de la force résultante, parallèle au mouvement relatif. La composante normale F_L au mouvement relatif agissant sur le corps immergé est appelée portance.

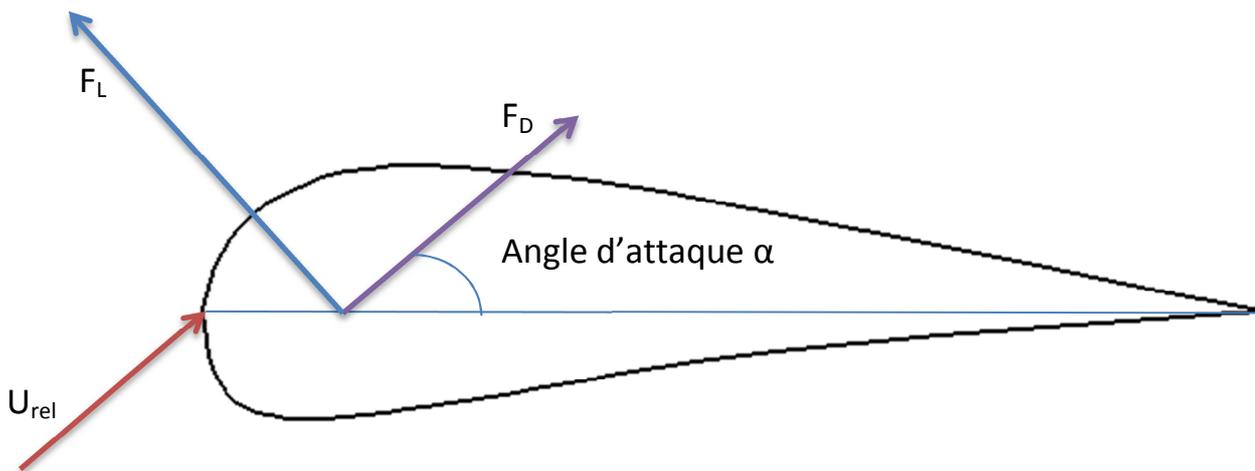


Figure 14 – Force agissant sur une aile

L'angle d'attaque α est défini comme étant l'angle entre la corde de l'aile et la direction de la vitesse relative.

Selon les théories classiques d'aéronautique, les forces de traînée et de portance sur une pale de géométrie donnée peuvent être décrites de la manière suivante:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho C_L A U_{rel}^2$$

$$F_D = \frac{1}{2} \rho C_D A U_{rel}^2$$

Où

- ρ est la masse volumique de l'air.
- A est l'aire projetée du corps immergé.
- C_L et C_D Sont respectivement les coefficients de portance et de traînée. Ils sont fonction de la nature et de la forme du corps immergé dans le fluide, de la valeur du nombre de Reynolds caractérisant la nature de l'écoulement et de l'angle d'attaque.

Considérons maintenant une section de pale d'éolienne:

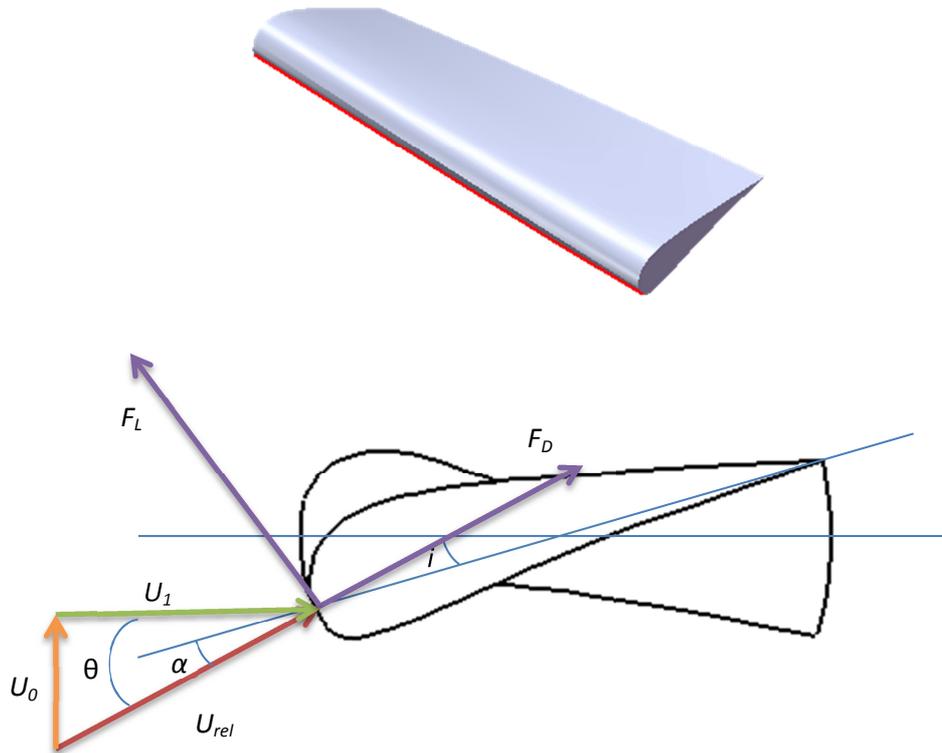


Figure 15 – Forces agissant sur une pale d'éolienne

Le vent incident est caractérisé par sa vitesse U_0 . Sous l'effet de ce dernier, les pales commencent à tourner. Ceci induit la création d'un écoulement perpendiculaire au flux incident. Cet écoulement de vitesse U_1 possède une vitesse variant linéairement le long de la pale:

$$U_1 = \Omega \cdot r$$

Où Ω est la vitesse angulaire de l'aile et r l'abscisse de la section considérée. Finalement, la vitesse relative totale du fluide agissant sur la pale est une combinaison entre U_0 et U_1 :

$$U_{rel}^2 = U_0^2 + U_1^2$$

Les forces axiale et tangentielle peuvent être obtenues par projection dans le système de coordonnées globale :

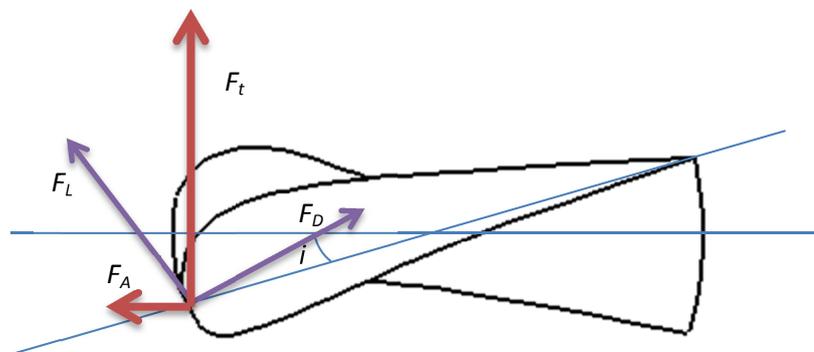


Figure 15 – Forces axiale et tangentielle projetées sur le repère global

$$\begin{aligned}F_T &= F_L \sin \theta - F_D \cos \theta \\F_A &= F_L \cos \theta + F_D \sin \theta\end{aligned}$$

La force tangentielle fournit la poussée utile sur l'arbre. La force axiale ne fait que charger la structure.

En considérant les équations précédentes, on peut facilement comprendre que pour augmenter la poussée sur l'arbre et donc l'énergie que l'on peut extraire du vent, il nous faut augmenter les forces de portance et diminuer les forces de traînée.

Un angle d'attaque optimum peut être défini pour maximiser le ratio entre C_L/C_D et ainsi atteindre une force tangentielle maximum.

Du fait de la variation de U_1 , la direction du vecteur vitesse relative vu par la pale aura tendance à venir tangenter le vecteur U_1 en bout de pale. Ceci implique la variation de l'angle d'attaque le long de la pale. Un angle d'attaque trop petit implique des valeurs de coefficient de portance trop petites alors qu'un angle d'attaque trop important va entraîner un phénomène de palier, se traduisant aussi par une perte de portance pouvant aboutir au décrochage (local ou global) de la pale. Cette dernière ne servira donc plus à la production d'énergie. En pratique, on cherche à assurer un coefficient de portance maximum et constant le long de la pale en introduisant un angle de torsion $i(r)$ dans la pale :

$$\theta(r) = A \cos \left(\frac{U_1(r)}{U_{rel}(r)} \right) = \alpha(r) + i(r)$$