

T.I.P.E

Sciences-Industrielles

Une énergie en plein essor: L'énergie éolienne

Sujet: énergie éolienne, fonctionnement, contraintes et perspectives sur l'avenir.

CUENOT Boris
GRAFF Christophe

PTSI A

1997-1998

Sommaire

- 0 Historique et Introduction

- I Présentation et caractéristiques principales des différents types de capteurs éoliens
 - I .1 Capteurs à axe horizontal
 - I .2 Capteurs à axe vertical

- II Comment tirer profit de l'énergie éolienne
 - II .1 Choix du site
 - II .2 Caractéristiques physiques des éoliennes
 - II .3 Caractéristiques technologiques des éoliennes

- III Applications
 - III .1 Production d'électricité
 - III .2 Pompage de l'eau

- IV Conclusion et avenir de l'énergie éolienne

0 L'énergie éolienne

On estime que chaque année, le vent distribue entre 2.5 et 5.10^{15} kWh; une énergie très importante mais difficilement récupérable. C'est ce potentiel énorme que représente l'énergie éolienne qui a poussé les hommes à trouver un moyen toujours plus perfectionné pour sa transformation en énergie mécanique ou électrique.

Ainsi, dès le V^e siècle avant notre ère, on voyait déjà des éoliennes à axe vertical également appelées panémons dans les îles grecques. Le premier moulin à vent a été fabriqué en Perse en 134 avant J.-C. et fonctionnait grâce à un mur protégeant les pales du vent au cours de leur retour. Puis on a beaucoup utilisé l'énergie éolienne pour le pompage et l'irrigation des cultures. L'éolienne a poursuivi sa lente évolution au cours des siècles, et les éoliennes à axe horizontal n'ont fait leur apparition qu'au XIII^e siècle. Là, les constructeurs et les utilisateurs se préoccupent plus des effets aérodynamiques liés à la forme des pales et à leur nombre pour ne citer que ces deux facteurs. Les premiers aérogénérateurs ont vu le jour en 1850, mais l'idée de l'aérogénérateur date de 1802 où Lord Kelvin, un physicien anglais, associa une génératrice d'électricité à un moteur éolien. Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. Parallèlement, les recherches dans le domaine de l'aérodynamique faites par l'aéronautique ont permis une évolution des moteurs éoliens.

Cependant, dans les années "60", le faible coût des autres sources d'énergie (notamment le pétrole) a dissuadé l'expansion de l'exploitation de l'énergie éolienne. En effet, pour que cette source d'énergie écologique parce que non-polluante, attractive car autonome puisse être commercialisée, il est nécessaire qu'elle soit rentable par rapport aux autres sources d'énergie, et la mise en place d'un réseau électrique national très important en France est un des facteurs pouvant expliquer le faible nombre d'éoliennes implantées.

Ainsi, dans quels cas est-il préférable d'opter pour l'énergie éolienne? Principalement lorsqu'on se situe dans une région éloignée, à l'écart du réseau électrique national, ou bien encore lorsque l'on n'a besoin que d'une relativement faible quantité d'énergie et d'une puissance fournie non régulière pour alimenter une pompe à eau par exemple?(Le problème de la non-régularité de la puissance fournie par l'aérogénérateur peut être remédié par la présence d'une batterie de stockage et/ou d'une source d'énergie secondaire qui se met en marche lorsque la batterie est vide).

Tout ceci était encore vrai au début des années "80" mais les progrès technologiques ont fait que depuis le début des années "90", les perspectives d'exploitation de l'énergie éolienne sont complètement différentes. En effet, même si le coût actuel de l'électricité éolienne dépasse encore d'au moins 20% celui de l'énergie conventionnelle, en comptant avec

une érosion continue du prix des machines (moins 20% dans les trois dernières années), de celui de l'installation, de la puissance et de l'efficacité sans cesse croissante des machines éoliennes, on peut envisager un coût du kilowattheure compétitif dans peu de temps (Cf. doc. 1). Pour donner une idée des énormes progrès réalisés, pour des vents moyens de 23 km/h, le prix du kWh a chuté de 50 à 29 centimes au Danemark depuis 1990 et la puissance moyenne des machines est passée de 30 kW en 1983 à 600 kW en 1997. Tous ces bouleversements techniques font que ce secteur est actuellement en pleine expansion et que s'ouvre à lui une multitude de marchés mondiaux (Cf. doc. 2). En effet, en cinq ans, le marché annuel mondial a plus que quadruplé pour atteindre 1566 mégawatts en 1997 (l'Europe représente 84% du marché), et BTM Consult, société d'études spécialiste du secteur, table sur une croissance de la demande mondiale de 18% par an jusqu'en 2002.



Doc. 1



Doc. 2

Ainsi, l'énergie éolienne est vouée à un bel avenir puisque certains spécialistes du secteur estiment que techniquement, le réseau électrique national peut s'équiper jusqu'à 20% en énergie éolienne.

Cependant, toutes les éoliennes ne ressemblent pas à celles de plusieurs centaines de kilowatts qui servent à produire de l'énergie électrique. Il existe une multitude d'éoliennes dont beaucoup ont été mises de côté du fait qu'elles ne satisfaisaient pas aux besoins demandés, et leur usage est aussi varié que leur forme.

Nous allons donc voir quels sont les différents types d'éoliennes, quel est leur fonctionnement, comment tirer profit de l'énergie éolienne et quelles peuvent être les différentes applications de cette énergie tout en gardant en tête le facteur économique du système.

*Limite de Betz: énergie maximum récupérable sur un rotor. Le rendement maximum calculé à partir de la limite de Betz est d'environ 59%.

I Présentation et caractéristiques des différents types de capteurs éoliens dynamiques parmi les plus courants.

Tout d'abord, il faut noter qu'il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique de rotation, seulement il est important de se poser certaines questions essentielles telles que: quelle sera sa taille, son coût, la puissance qu'il pourra fournir, sa résistance à l'usure? Autant de questions qui font qu'un grand nombre de capteurs éoliens ont été mis de côté et que seul un petit nombre d'entre eux ont été largement exploités.

Une classification méthodique, universellement adoptée fait apparaître les groupes, les noms et les formes de ces capteurs.

On distingue trois principaux paramètres de fonctionnement pour caractériser un capteur éolien et notamment son efficacité.

Le premier paramètre de fonctionnement est relatif à la vitesse périphérique (ou vitesse en bout de pale) $U = \omega R$ (avec ω la vitesse de rotation de la machine éolienne et R le rayon d'extrémité de la pale); ce **paramètre de rapidité** ou **vitesse spécifique** noté λ est le rapport de la vitesse U à la vitesse V du vent:

$$\lambda = U/V = (\omega R)/V$$

Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre: si λ est inférieur à 3, l'éolienne est dite *lente*; au-delà, l'éolienne est dite *rapide*. A titre d'exemple, des éoliennes bipales peuvent avoir un paramètre λ égal à 20. Cependant, une grande vitesse de rotation peut entraîner des nuisances telles que le bruit.

Le second paramètre qui caractérise le capteur éolien est le **coefficient de puissance** noté C_p . Il est défini par le rapport de la puissance P_m recueillie sur l'arbre moteur du capteur à la puissance cinétique qui passerait dans le disque du rotor en son absence:

$$C_p = P_m / (0,5 \rho S V^3)$$

(La valeur maximale du C_p définie par Betz, est égale à 0.592.)

Le troisième paramètre important est le coefficient du couple: c'est le rapport du couple moteur C_m qui s'exerce sur l'arbre de sortie du capteur éolien ($C_m = P_m / \omega$) au couple aérodynamique C_a .

$$C_c = C_m / C_a = C_p / \lambda$$

Les paramètres C_p et C_c caractérisent les performances du capteur et sont habituellement représentés en fonction de λ .

Cependant plus généralement, on classe les capteurs éoliens par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue de cette manière:

- les capteurs à axe horizontal
- les capteurs à axe vertical
- les capteurs qui utilisent le déplacement d'un mobile (peu exploitable)
- les dispositifs statiques de récupération de l'énergie éolienne

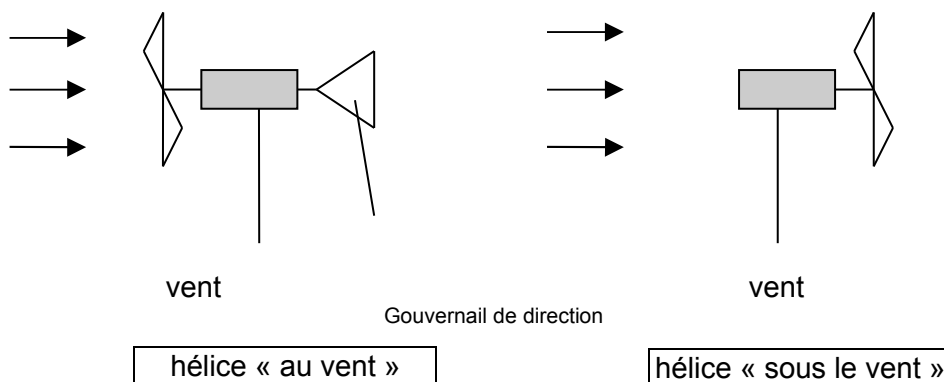
Faisons donc l'inventaire des différents types de capteurs éoliens selon leur catégorie et intéressons-nous à leurs caractéristiques générales.

Il faut cependant savoir que la plupart de ces capteurs éoliens comme le rotor Savonius ou encore les machines à clapets battants par exemple n'ont pas vraiment d'ouvertures sur l'avenir et qu'aujourd'hui seuls les capteurs à axe horizontal bi- et tripales sont utilisés pour la production d'électricité à échelle nationale.

1.1 Les capteurs à axe horizontal

Ce sont les machines actuellement les plus répandues car leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau.

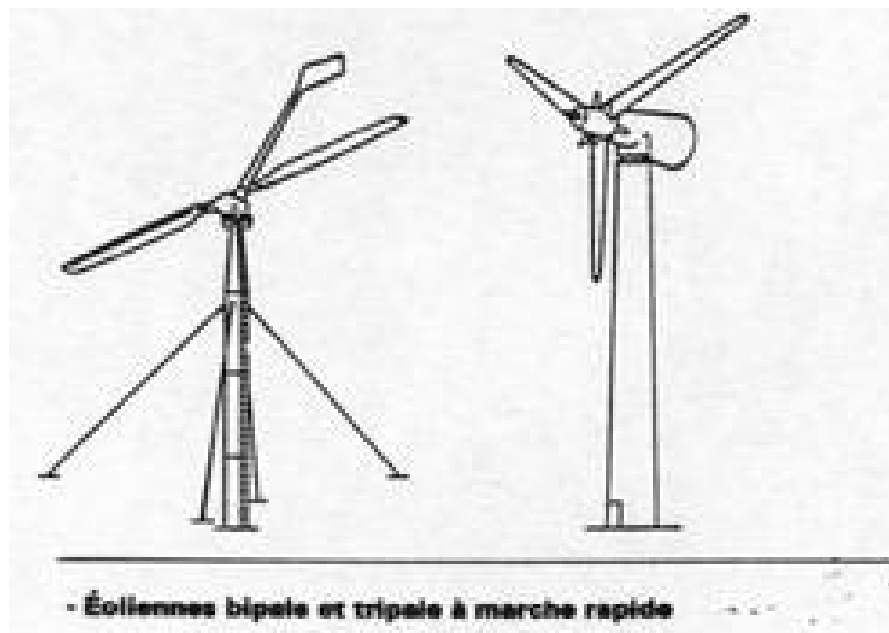
On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, « *hélice au vent* », et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent, « *hélice sous le vent* ».



Les moulins hollandais: Bien que de conception ancienne; ils se caractérisent par un assez bon coefficient de puissance de la machine ($C_p=0.3$) pour des vitesses de λ voisines de 2 à 3, et par un couple maximal pour ces deux vitesses.

Les moulins américains: Construits aux Etats-Unis dès 1870, les éoliennes multipales peuvent comporter de 12 à 30 pales. Le coefficient de puissance approche 0.3 pour des vitesses spécifiques proches de 1 ($\lambda \cong 1$); le coefficient de couple est élevé au démarrage. Le plus souvent, ces éoliennes sont de petite taille; la roue à couramment un diamètre de 3 à 8 mètres. Ces éoliennes fonctionnent bien jusqu'à un vent de 7 à 8 m/s; au-delà, il faut prévoir un dispositif d'arrêt et d'éclipsage qui doit mettre la machine en sécurité. Ces éoliennes sont pourvues d'un gouvernail de direction pour orienter le disque normalement à la direction du vent (cf schéma ci-dessus).

Les éoliennes rapides: la puissance nominale de ces capteurs est très étendue, de quelques dizaines de watts à quelques mégawatts, de même que la taille du rotor (de 1 à 100 mètres de diamètre). L'optimisation du rotor a grandement bénéficié des travaux de recherche de l'aéronautique. Les coefficients de moment et de puissance sont optimaux pour des valeurs de λ comprises entre 6 et 10. Les éoliennes rapides obtiennent des rendements élevés (voisins de 85% par rapport à la limite de Betz). Le disque éolien peut être placé en amont (hélice au vent) ou en aval (hélice sous le vent) du support. La tendance actuelle est de situer le rotor en position aval.

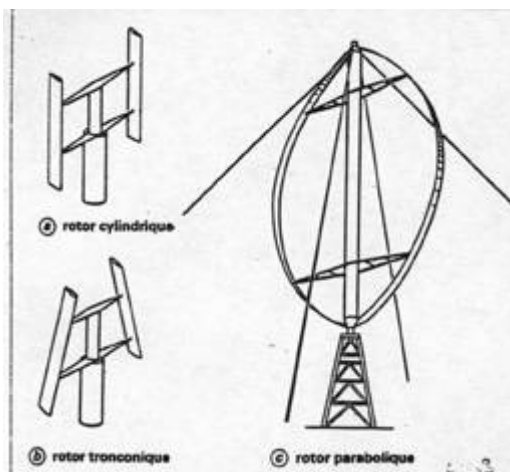


1.2 Les capteurs à axe vertical

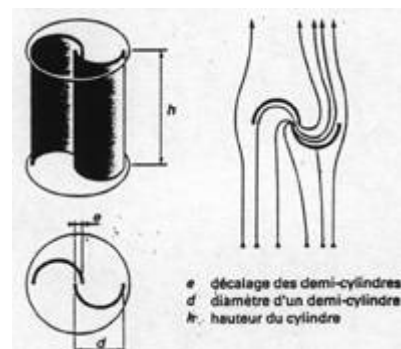
Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrius et le capteur à ailes battantes. Il existe également les machines à traînée différentielle comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants.

- Le **rotor de Savonius** est constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. L'écoulement interne favorise les caractéristiques de performance de la machine. Le coefficient C_p maximal atteint 0.3. Le rotor de Savonius est caractérisé par un grand couple de démarrage. A titre d'exemple, des machines de plusieurs kilowatts ont été réalisées pour assurer le pompage de l'eau dans les pays du Sahel; elles démarrent à des vitesses de vent faible, voisines de 2 à 3 m/s. Ces systèmes présentent cependant beaucoup plus d'inconvénients que d'avantages dans les réalisations actuelles, en particulier ils nécessitent comme les systèmes à axe horizontal parallèle « au vent » un dispositif d'orientation. La récupération de l'énergie produite est en général beaucoup plus compliquée et se traduit souvent par une perte sensible du rendement global.
- Le principe du **rotor ou panéme de Darrius** inventé par l'académicien français Darrius au cours des années 1920-1935 repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de Darrius: le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique.

Rotor de Darrius:



Rotor de Savonius :



Toutes ces machines ont besoin d'être haubanées, c'est-à-dire soutenues par des câbles ou des cordages. Le comportement dynamique de la machine

doit tenir compte des modes propres de vibration de tous les organes structuraux, y compris celle des haubans.

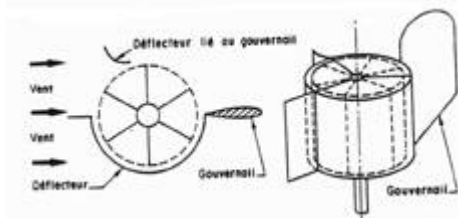
- Le **moulinet** qui est une machine à traînée différentielle est constitué de plusieurs demi-sphères ou de coquilles cylindriques (augets) montées sur des bras reliés à un axe vertical tournant.

La rotation est assurée par la traînée aérodynamique qui s'exerce différemment sur l'aube qui remonte face au vent et sur celle qui s'efface au vent. Le paramètre λ est inférieur à 1 ce qui dénote une assez faible vitesse de rotation. Le coefficient de puissance maximal $C_p \text{ max}$ est voisin de 0.18 lorsque λ vaut 0,6. Les anémomètres à coupelles, à papillon et du type Ailleret fonctionnent suivant ce principe. Les vents de faible vitesse, 1 à 2 m/s, suffisent pour assurer leur démarrage.

Cependant, ce type de capteur éolien ne convient pas pour alimenter un générateur électrique car il ne produit qu'une très faible puissance.

- Les **machines à écran**: Les aubages qui vont à contre-courant du vent sont protégés par un écran orientable grâce à la présence d'un gouvernail. Les aubes peuvent être réduites à de simples plaques planes ou légèrement cambrées.

machine à écran:



moulinet:

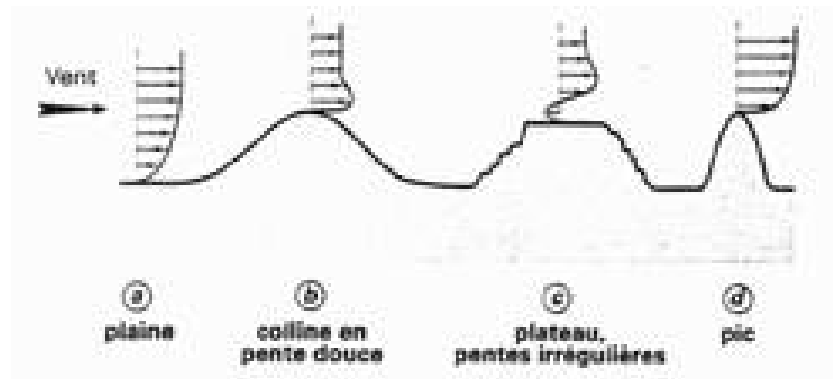


II Comment tirer profit de l'énergie éolienne

II.1 Choix du site

Par suite de l'irrégularité des vents, la rentabilité d'une machine éolienne dépendra beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à son utilisation.

Les sites les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Toutefois dans ces premiers lieux se posent des problèmes de corrosion et dans les seconds des risques de givrage.



L'énergie éolienne est très utilisée pour alimenter en énergie électrique des sites très isolés dont les besoins énergétiques sont réduits, ou pour pomper de l'eau à peu de frais et de façon plus silencieuse qu'avec un moteur thermique. Elle peut être une solution dans les pays où les lignes d'interconnexion ne parviendront pas du fait de la faible densité de population.

Dans le cas où toute autre source d'énergie peut être envisagée, l'hydroélectricité par torrent ou rivière dans le domaine privé, ligne de distribution E.D.F... une petite étude économique est nécessaire.

La prospection des sites possibles constitue donc le premier travail à effectuer pour juger de la possibilité d'utiliser le vent. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année. Non seulement, il faut connaître la vitesse moyenne mais aussi la quantité d'énergie annuelle. Pour cela, des anémomètres spéciaux totalisateurs de l'énergie par mètre carré ont été mis au point.

Les vents les plus intéressants, qui donnent le maximum d'énergie annuelle, sont les vents réguliers, comme les alizés, ayant une vitesse moyenne de 6 à 8 m/s, voire jusqu'à 10 m/s.

Outre ceux ayant une quantité d'énergie annuelle insuffisante, il faut éliminer les sites soumis à des variations très brutales de la vitesse du vent (type mistral par exemple).

Le relief local joue un rôle très important. Aussi, y a-t-il lieu d'en tenir compte dans l'interprétation des mesures effectuées souvent à la hauteur standard de 10 m au-dessus du sol (hauteur adoptée par la Météorologie nationale).

Les constructeurs, en vue de la conquête des mers, planchent sur des machines de plusieurs mégawatts. En effet, installer des fermes de grande puissance à quelques kilomètres des côtes, où les ressources en vent sont bien plus élevées qu'à terre, permettrait de réduire encore le coût de l'électricité. De plus, l'impact visuel sera atténué.

Une haie joue le rôle de brise-vent ; il en est de même des rideaux d'arbres ; ces obstacles s'avèrent défavorables à l'implantation des éoliennes de faible hauteur.

Des phénomènes cycliques apparaissent avec des périodes qui peuvent être de l'ordre de la dizaine de minutes, de quelques heures, de plusieurs jours ou de la durée des saisons. La connaissance de la fréquence de ces manifestations s'avère utile pour la sécurité des machines.

Certaines régions ont la réputation de voir naître ou de voir passer un ou plusieurs cyclones par an, ou encore des tempêtes ou des tornades. De ce fait, les pays à riche implantation de stations météorologiques édictent des règles destinées à mieux cerner les hypothèses de calcul pour donner aux constructions un degré de sécurité accrue.

II.2 Caractéristiques physiques des éoliennes

II.2.1 La limite de Betz

L'énergie récupérable est celle qu'il est possible de prélever de l'énergie cinétique du vent. Betz a montré que, pour une machine à axe horizontal, cette quantité avait une limite.

Après démonstration, en prenant pour la masse volumique de l'air une valeur moyenne de $1,25 \text{ Kg/m}^3$, la puissance maximum pratiquement récupérable par un dispositif de surface S est égale à :

$$P = 0,37 S V^3$$

C'est la limite de Betz avec V la vitesse instantanée du vent . Toutes les grandeurs sont exprimées en unité SI.

Cette puissance récupérable est celle que recueillerait une machine idéale.

Bien qu'établie pour une éolienne à axe horizontal, il est admis que cette valeur limite s'applique à la plupart des machines.

Le rendement maximal théorique d'une éolienne est de 59 %. Grâce à l'amélioration du profil et du revêtement des pales, les machines actuelles peuvent approcher les 50 %. Mais l'utilisation de systèmes de carénage permet d'élargir la surface balayée et donc de dépasser les fameux 59 %.

II.2.2 Les dispositifs de stockage de l'énergie éolienne

Une caractéristique essentielle du vent étant la discontinuité dans le temps, un certain nombre d'études ont eu pour objet d'étudier ou de mettre au point des systèmes permettant de stocker l'énergie produite par le vent et non

utilisée directement pendant les périodes de production afin d'en restituer une partie, aussi grande que possible, pendant les périodes de calme.

Il existe différentes possibilités de stockage.

- Pour la production d'électricité, le système de loin le plus utilisé est celui par **batterie d'accumulateurs**. Celles au plomb, bien que lourdes et encombrantes, s'accommodent bien des fluctuations propres au vent. Les autres types sont mal adaptés. Toutefois, ce type de stockage ne convient que pour de petites puissances de quelques kW tout au plus.

- Pour les stockages importants, on peut faire appel au pompage de l'eau entre 2 réservoirs et une turbine si le terrain fournit une possibilité intéressante en dénivelé. Le simple pompage de l'eau dans un réservoir est aussi la solution pour stocker de l'eau dans le cas, par exemple, de distribution d'eau alimentaire.

Principe : l'énergie éolienne sert à remplir un réservoir de stockage dont l'eau sera turbinée pour restituer l'énergie.

- Le stockage thermique commence aussi à se développer, essentiellement pour le chauffage. Les différents types de stockage thermique existant sont utilisés : réservoir de fluides, chauffage de produits à haute capacité thermique, etc.

Principe : l'énergie produite est utilisée pour chauffer le fluide d'un réservoir qui restituera pendant les périodes sans vent l'énergie stockée.

II.3 Caractéristiques technologiques des éoliennes

II.3.1 Le supportage

Les pylônes peuvent être réalisés en acier ou en béton armé. Ils peuvent être autoporteurs et autorésistants ou haubanés. Si l'haubanage permet de réduire les dimensions du mât, par contre il pénalise l'emprise au sol. Pour limiter l'occupation au sol, le supportage de plusieurs éoliennes par une seule structure est envisagé ; dans ce cas, les pylônes constitués de structures métalliques en treillis sont intéressants. Actuellement les mats en caisson, souvent en acier et fortement ancrés au sol, sont très répandus pour les éoliennes de forte puissance.

Les pylônes des machines à axe vertical sont courts, entre 0,1 et 0,5 fois la hauteur du rotor. Ils sont le plus souvent du type haubané.

Les problèmes de corrosion et de montage sont les paramètres principaux dans le choix de la solution à adopter.

II.3.2 L'orientation

Deux solutions sont encore en concurrence : **l'éolienne à rotor face au vent** et **l'éolienne à hélice sous le vent**.

L'éolienne à rotor face au vent nécessite soit une dérive, soit une orientation actionnée par un servomoteur recevant des informations et commandes de la part d'une girouette.

Les capteurs à axe horizontal doivent toujours être orientés pour faire face au vent. Les dispositifs le permettant sont donnés dans le tableau ci-dessous.

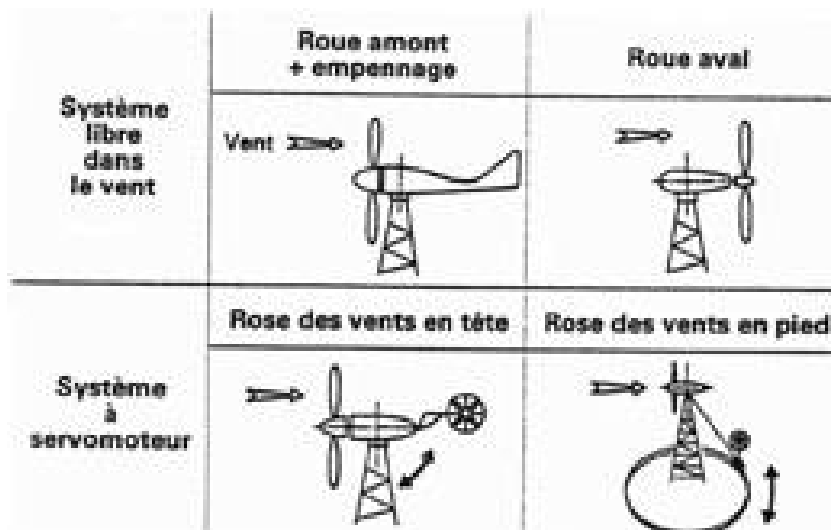
Les systèmes les plus simples sont ceux qui laissent **l'hélice sous le vent**. Le capteur, placé à l'amont du supportage, nécessite une gouverne mais soustrait les pales au sillage de ce supportage. Par contre s'il est placé en aval, la gouverne n'existe plus et les efforts de manoeuvre sont plus faibles. Cette dernière disposition est donc plus simple et donne une stabilité supérieure. Il est cependant utile, dans tous les cas, de monter un amortisseur.

La disposition roue aval est de loin maintenant la plus utilisée, même exclusivement dès que la puissance dépasse quelques kilowatts.

Les changements de direction et les variations de fréquence de rotation liés aux rafales sont à l'origine de vibrations néfastes au bon fonctionnement de la machine. Le dispositif d'orientation devra donc assurer le maintien du rotor face au vent sans provoquer lors des changements brutaux du vent des variations d'orientation rapides de la machine.

Les grandes machines font appel à la technologie électrohydraulique et le contrôle de l'orientation se fait par embrayage et valves hydrauliques.

Différent types d'orientation des capteurs



II.3.3 Les pales

Les pales sont une partie très importante des éoliennes. De leur nature dépendront le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine ainsi que le rendement du moteur éolien.

Plusieurs éléments caractérisent ces pales :

- la longueur
- la largeur
- le profil
- les matériaux
- le nombre

Parmi ces éléments, certains sont déterminés par les hypothèses de calcul, puissance et couple et d'autres sont choisis en fonction de critères tel que : coûts, résistance au climat ...

II.3.3.1 Longueur

Le diamètre de l'hélice est fonction de la puissance désirée. La détermination de ce diamètre fixe aussi la fréquence de rotation maximum, que l'hélice ne devra pas dépasser pour limiter les contraintes en bout de pales dues à la force centrifuge. Il est essentiel de prendre en compte le travail en fatigue des pales et les risques de vibrations, surtout pour les très longues pales.

Pour les **roues à marche lente**, ayant une inertie importante, le diamètre reste limité à 8 m à cause de leur comportement lors de rafales de vent.

Pour les **roues à marche rapide**, la longueur des pales peut être grande, supérieure à 30 m.

II.3.3.2 Largeur

La largeur des pales intervient pour le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la pale sera plus large. Mais pour obtenir des vitesses de rotation élevées, on préférera des pales fines et légères. Le résultat sera donc un compromis.

II.3.3.3 Le profil

Il est choisi en fonction du couple désiré.

Pour la plupart des aérogénérateurs de moyenne et de faible puissance, les pales ne sont pas vrillées. Par contre, pour la plupart des machines de grande puissance (≥ 100 kW), elles le sont, c'est-à-dire qu'elles prennent la forme d'une hélice.

Les caractéristiques des différents profils sont déterminées en soufflerie. Ils ont en général été étudiés pour l'aviation (ailes ou hélices).

II.3.3.4 Les matériaux

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont variés et ont bénéficié de nombreux progrès, particulièrement ceux dus aux pales d'hélicoptère.

Contrairement à ce que l'on croit fréquemment, ce n'est pas dans le domaine de l'aérodynamique que réside la difficulté mais bien dans celui de la construction et de la résistance des matériaux. En effet, c'est dans le mode de réalisation des pales qu'il y a le plus à faire pour augmenter la sécurité de marche.

Les matériaux utilisés pour la réalisation des pales sont donc essentiels et doivent répondre à plusieurs exigences : ils doivent être assez légers, résistants à la fatigue mécanique, à l'érosion et à la corrosion, et de mise en oeuvre ou d'usinage simple.

On rencontre plusieurs types de matériaux :

- le **bois** : il est simple, léger, facile à travailler et il résiste bien à la fatigue mais il est sensible à l'érosion, peut se déformer et est réservé pour des pales assez petites.
- le **lamellé-collé** : c'est un matériau composite constitué d'un empilement de lamelles de bois collées ensemble. Il est possible de réaliser des pales jusqu'à 5 à 6 m de longueur ayant une bonne tenue en fatigue.
- les **alliages d'aluminium** pour des pales allant principalement jusqu'à 20 m de longueur.
- les **matériaux composites** : leur intérêt est de permettre la réalisation de toutes les formes et dimensions, ainsi que d'obtenir les caractéristiques mécaniques exactes recherchées : pale vrillée, corde évolutive, changement de profil.

II.3.3.5 Nombre de pales

Les éoliennes à **marche lente** ont en général entre 20 et 40 ailettes et ont un couple de démarrage proportionnel au nombre de pales et au diamètre ; leur rendement par rapport à la limite de Betz est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée.

Les **éoliennes à marche rapide** sont généralement bipales ou tripales. La roue bipale est la plus économique et la plus simple mais elle est génératrice de vibrations qui peuvent être importantes. La roue tripale présente moins de risques de vibrations, d'où fatigue et bruit plus faibles, mais elle est plus compliquée et plus lourde.

II.3.4 **Systèmes de protection et de régulation**

Quel que soit le type d'aéromoteur, il est nécessaire pour éviter sa destruction lorsque les vents sont trop violents qu'il soit équipé d'un système permettant de diminuer les contraintes mécaniques sur la machine.

Les systèmes peuvent agir de façons différentes et plus ou moins fines avec un degré d'automatisme nul ou intégral.

II.3.4.1 Système de freinage manuel

C'est le moyen le plus simple de préserver une machine de la destruction. Lorsque le vent atteint une certaine force un opérateur immobilise la machine soit à l'aide d'un frein, soit en plaçant l'hélice parallèle au vent (mise en drapeau), soit en modifiant le calage des pales pour obtenir un couple moteur nul (système le plus efficace).

II.3.4.2 Système de freinage automatique

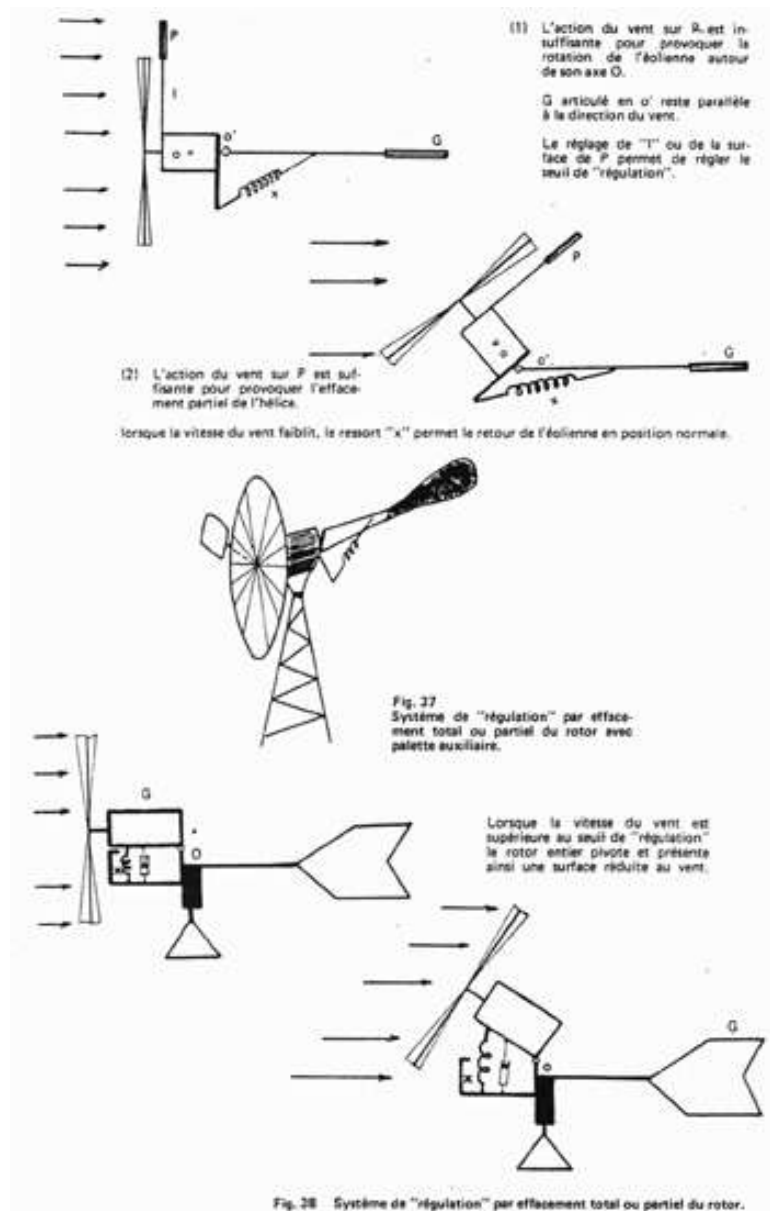
Les deux moyens cités précédemment peuvent être automatiques par action du vent sur une « palette » de commande.

La palette annexe est parallèle et solidaire du plan de rotation de l'hélice. Lorsque la pression du vent sur cette palette, proportionnelle au carré de la vitesse et à la surface de la palette,

$k SV^2$, $k \sim 0,9$, atteint un certain seuil, elle peut entraîner la commande d'un frein ou la mise en drapeau.

Ce dispositif peut être associé à un ressort qui replace l'hélice dans sa position normale lorsque l'action du vent sur la palette annexe a cessé.

Ces systèmes ne peuvent être utilisés qu'avec des aéromoteurs dont la vitesse de rotation n'a pas à être constante. D'autre part ils présentent l'inconvénient majeur d'interrompre le fonctionnement de l'aéromoteur au-delà d'une certaine vitesse de vent.



II.3.4.3 Système de régulation par frein aérodynamique centrifuge

Les pales principales sont fixes (calage constant).

La régulation comporte 2 palettes P_1 et P_2 articulées en O_1 et O_2 sur un support normal à l'axe des pales principales. Ces palettes ont leur partie avant un peu plus longue et plus lourde que la partie arrière. Elles sont maintenues à la position repos par les tiges t_1 et t_2 et les ressorts tarés x_1 et x_2 .

Jusqu'à une certaine fréquence de rotation f_0 (c'est-à-dire la vitesse de vent correspondante V_0), les palettes restent concentriques. En formant un volant

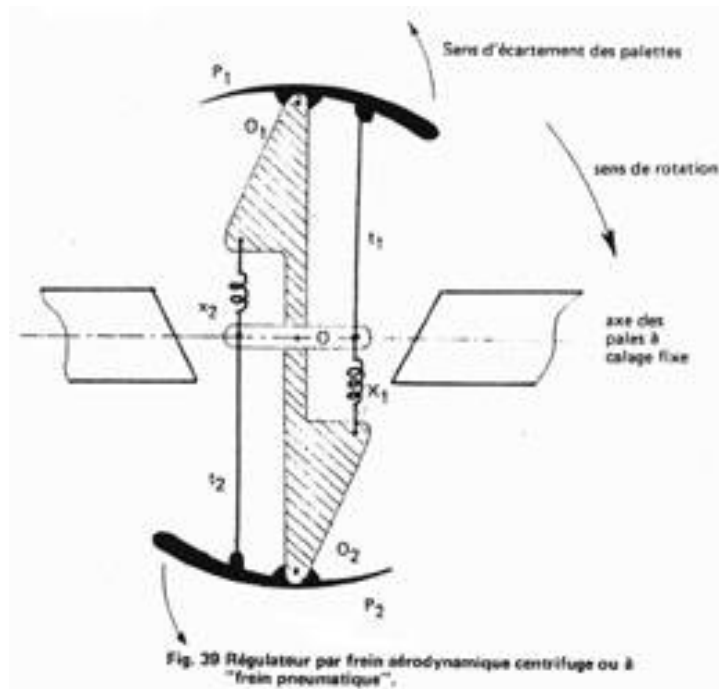
d'inertie, elles tendent à maintenir la fréquence de rotation stable lorsque la vitesse du vent varie pendant de brefs instants (petites rafales).

Les pales ayant un calage fixe, la fréquence de rotation augmente avec la vitesse du vent. Lorsque cette vitesse dépasse V_0 , la fréquence de rotation dépasse f_0 , la force centrifuge et la pression de l'air sur les palettes deviennent prépondérantes. Les palettes P_1 et P_2 pivotent autour de O_1 et O_2 et prennent la position correspondant au freinage (voir figure ci-dessous).

La vitesse diminue alors et l'action des ressorts x_1 et x_2 redevient prépondérante, ramenant les palettes à leur position initiale. Si le vent est toujours supérieur à V_0 le processus recommence.

En fait, le mouvement réel ne présente que de faibles variations de position autour d'une position d'équilibre. En fonctionnement, les palettes semblent conserver une position d'équilibre fixe. Mais la vitesse de rotation n'est pas très stable pour toute la plage d'utilisation de vitesse du vent.

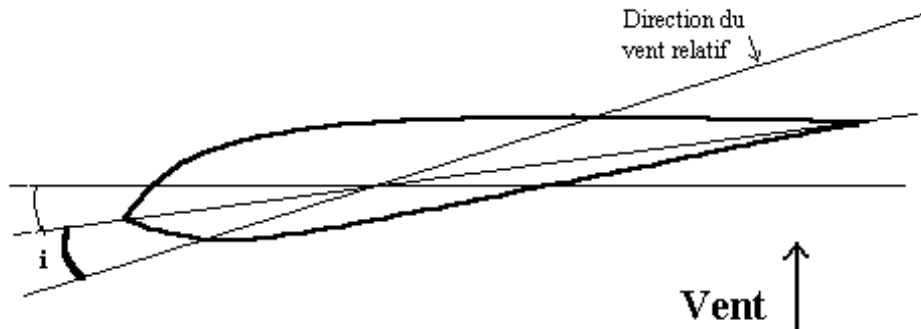
En plus de ce système de régulation, un frein peut permettre d'immobiliser la machine en cas de tempête, d'arrêt urgent ou de non-utilisation.



II.3.4.4 Régulation par variation du calage des pales

(voir le dessin en annexe).

La régulation consiste à conserver une fréquence de rotation constante de l'hélice pour toute une gamme de vitesses de vent. Cette régulation est obtenue en faisant varier l'angle de calage α , et par suite l'angle d'incidence i qui est l'angle entre la direction de la vitesse du vent relatif et l'axe de la pale.



Régulation par mise en drapeau

Principe : la pale est orientée en incidence légèrement négative et le profil ne porte plus.

Avantage : limiter les contraintes sur les pales par fort vent.

Les machines qui utilisent ce système exigent d'être freinées pour un vent supérieur ou égal à 36 m/s.

Régulation par décrochage aérodynamique

Principe : on provoque une diminution de α , ce qui entraîne une augmentation de l'angle d'incidence i de sorte que la traînée de la pale augmente considérablement tandis que sa portance diminue (le système charge la machine et il est source de phénomènes de fatigue).

Le système garantit une bonne régulation pour des vents inférieurs ou égaux à 60 m/s.

Régulation par asservissement du calage

Les 2 systèmes précédents peuvent fonctionner par commande directe du calage, un vérin hydraulique dans l'arbre porte-hélice creux par exemple.

Le vérin modifie le calage des pales en fonction de la vitesse de rotation du rotor.

Ce système, plus souple mais techniquement plus complexe, est réservé aux grandes machines.

II.3.4.5 Freinage mécanique

Les dispositifs de commande sont également nombreux : frein à main, frein à air comprimé, frein électromécanique ou électromagnétique : le frein est inséré au plus près du disque éolien lorsqu'il y a une ligne d'arbre avec multiplicateur incorporé ; il agit de façon progressive pour réduire les contraintes élevées apparaissant lors d'un freinage brutal sur une roue de plus grande inertie. Le freinage d'une machine constitue un élément de sécurité si important que, bien souvent, on conjugue diverses solutions qui participent à la limitation en vitesse de rotation puis à l'arrêt.

II.3.4.6 L'éclipsage

Il s'agit d'effacer plus ou moins soit le disque éolien soit la totalité du système.

Soit on efface totalement ou partiellement le rotor soit l'ensemble du pylône et de la machine peut être ramené à terre grâce à un vérin hydraulique.

-

II.3.5 **Le multiplicateur**

Les rotors dont le diamètre est supérieur à 5 m ont des vitesses de rotation trop faibles pour pouvoir entraîner directement un alternateur classique. Il est donc indispensable pour ces machines d'interposer entre l'aéromoteur et l'alternateur un multiplicateur.

3 types de multiplicateurs peuvent être utilisés avec les aéromoteurs :

- Le plus simple est le multiplicateur à engrenages à un ou plusieurs trains de roues dentées cylindriques ; d'une réalisation économique il est tout de même encombrant pour un rapport de multiplication élevé.
- L'utilisation de trains planétaires permet de réaliser des multiplications élevées sous un encombrement réduit. Leur utilisation se généralise ; cette technique permet de réaliser des rapports de multiplication élevés sous un encombrement réduit et avec un bon rendement de transmission. Les axes d'entrée et de sortie sont colinéaires voire coaxiaux.
- Le réducteur à couple conique permet une disposition de l'arbre de sortie perpendiculaire à l'arbre d'entrée.

III Applications

L'énergie éolienne est captée dans les rotors sous forme mécanique, c'est-à-dire sous la forme d'un couple dans un arbre en rotation. Du fait, le plus souvent, de l'irrégularité de cette énergie elle n'est pas utilisée sous cette forme mais convertie en énergie mécanique potentielle (pompage d'eau), en énergie thermique et souvent en énergie électrique.

La détermination des organes de conversion, générateurs électriques ou pompes, se pose sous le double aspect du choix du type et de la puissance nominale. Cette détermination est liée en particulier aux conditions météorologiques du site.

Un paramètre important dans la conversion de l'énergie mécanique en une autre énergie est la vitesse de rotation du rotor. Cette dernière est généralement faible (quelques dizaines à une centaine de tours par minute). Or les générateurs électriques, mais aussi les pompes rapides ou les convertisseurs thermiques, doivent tourner beaucoup plus vite, d'où la plupart du temps la nécessité d'augmenter cette vitesse soit par un artifice, soit par un multiplicateur. La solution la plus répandue utilise un multiplicateur de vitesse à courroies, si le rapport est inférieur à 4 ou 5 et la puissance limitée à quelques kilowatts, ou à engrenages dont le rendement peut atteindre jusqu'à 95 %.

Le système éolien est constitué des éléments suivants : un capteur éolien, un adaptateur mécanique composé des organes de transmission de puissance avec multiplicateur ou réducteur de vitesses, un transformateur d'énergie qui peut être électrique, hydraulique ou thermique, un accumulateur d'énergie associé au transformateur, un réseau de distribution alimentant le ou les utilisateurs, enfin les organes de commande, de sécurité et de distribution.

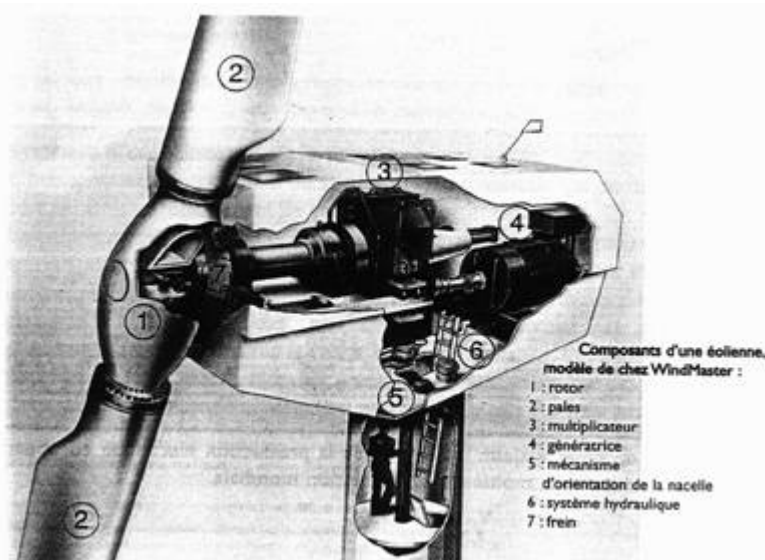
III.1 Production d'électricité

Un aérogénérateur est constitué par :

- Un aéromoteur à deux ou trois pales pourvu d'un système de régulation conférant à l'hélice une fréquence (vitesse) de rotation stable à partir d'une certaine vitesse de vent, et éventuellement un système de sécurité destiné à arrêter la machine en cas de tempête si le système de régulation est inopérant au delà de certaines vitesses du vent.
- Un générateur électrique qui peut être :

- . soit directement accouplé à l'aéromoteur : dans le cas le plus simple, l'hélice est montée directement sur l'axe du générateur électrique ;
 - . soit entraîné par un multiplicateur placé entre l'aéromoteur et le générateur électrique. La fréquence de rotation est liée au diamètre de l'hélice et elle diminue lorsque le diamètre augmente. Pour garder un bon rendement du générateur électrique, il est donc nécessaire d'augmenter la fréquence de rotation obtenue avec l'aéromoteur avant d'entraîner le générateur électrique. Ce générateur pourra être soit une dynamo fournissant un courant continu directement utilisable pour charger une batterie, soit un alternateur. Pour des raisons de coût et de rendement, les constructeurs d'aérogénérateurs s'orientent de plus en plus vers l'utilisation des alternateurs.
- Un pivot d'orientation qui permet à la machine de présenter l'hélice au vent quelle que soit sa direction.
 - Un carter ou bâti qui enveloppe, protège et relie entre elles l'ensemble des pièces.
 - Un gouvernail, dans le cas où l'hélice de la machine fonctionne *au vent*.

Les aérogénérateurs actuels commencent en général à tourner lorsque la vitesse du vent est d'environ 19 km/h, ils atteignent leur puissance de croisière pour des vitesses du vent comprises entre 40 et 50 km/h et s'arrêtent sous des vents soufflant à plus de 100 km/h. Les meilleurs sites pour implanter des aérogénérateurs sont ceux où la vitesse moyenne du vent est d'au moins 20 km/h.



III.2 Pompage de l'eau

Les éoliennes sont très utilisées pour le pompage de l'eau.

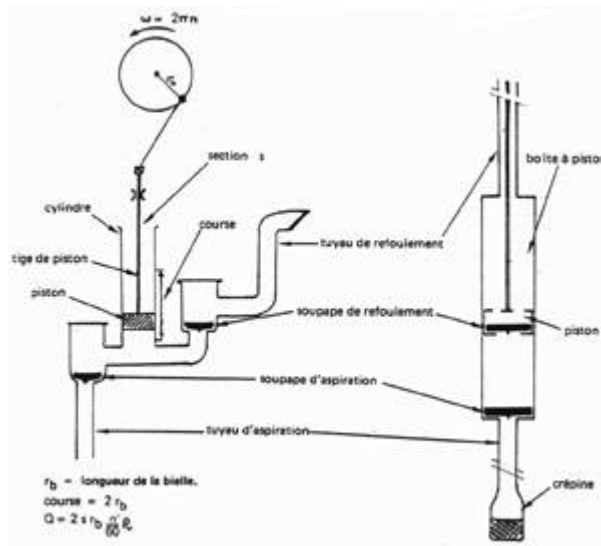
III.2.1 Les éoliennes de pompage multiples

La pompe est simple et permet une hauteur de refoulement importante. Par contre, elle demande un couple assez élevé et surtout constant ; sa vitesse est faible.

Ce type de pompe s'accommode donc bien avec les éoliennes lentes qui présentent des caractéristiques voisines des siennes.

Etant donné le mode d'attaque par une tige descendante le long de la conduite de refoulement, tige adaptée surtout aux efforts de traction, c'est la pompe à simple effet qui est la plus courante (voir figure ci-dessous).

La pompe est caractérisée par son diamètre et sa course. Ces 2 paramètres déterminent le volume maximum éjecté à chaque coup de piston.



Systèmes d'entraînement de la pompe

L'hélice entraîne directement un système bielle-manivelle qui permet d'actionner le piston de la pompe selon un mouvement de va-et-vient.

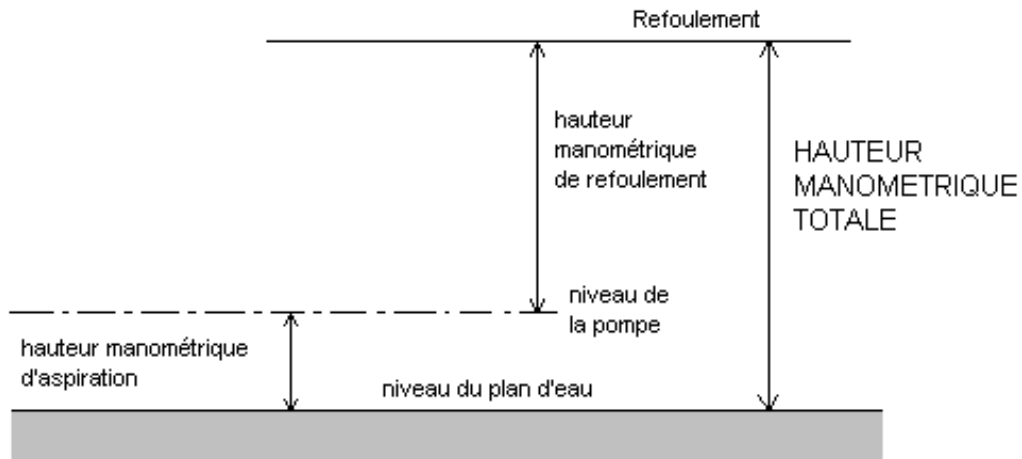
La dimension de la manivelle définit la course, donc le débit, mais aussi le couple à vaincre par la roue pour assurer le mouvement du piston. Son inconvénient est toutefois de présenter une irrégularité de couple entre les deux courses. Pour régulariser le couple, on utilise des dispositifs extérieurs : levier, poids, ressort. Ce dernier est intéressant, car il évite les articulations supplémentaires et réduit les frottements.

Pour des grandes profondeurs de pompage, il faut minimiser les efforts d'inertie et éviter les phénomènes de résonance dans la tige de commande qui, par suite de sa grande longueur, se comporte comme un ressort. On est alors souvent conduit à réduire la vitesse par l'utilisation d'un réducteur.

Il est dangereux pour les machines de dépasser une certaine hauteur manométrique d'aspiration (7 m) à cause des différentes pertes car le piston se sépare de l'eau, ce qui n'est pas concevable dans un fonctionnement

continu. La hauteur manométrique totale ne dépasse guère 50 m pour des hélices de 2,5 m de diamètre.

La hauteur manométrique est définie d'après le schéma suivant :



III.2.2 Les éoliennes de pompage à hélice rapide

Le principal inconvénient des éoliennes multipales est de posséder une régulation par tout ou rien. En effet, au-delà de 10 m/s, le moteur éolien se place dans le lit du vent grâce à la palette de régulation et le dispositif ne pompe plus. Leur rendement est plus faible que celui des hélices rapides. On a donc pensé utiliser les éoliennes à hélice rapide pour le pompage.

Eoliennes rapides équipées de pompes à piston

Il existe des machines à hélice rapide à 3 ou 4 pales à régulation centrifuge, ce qui permet de continuer à pomper à la vitesse nominale pour des vents de 33 m/s (120 km/h). Ces machines sont équipées d'un réducteur entre l'hélice et le dispositif bielle-manivelle.

Aéromoteurs rapides équipées de pompes centrifuges

La pompe centrifuge s'est substituée à la pompe à piston, considérablement plus encombrante, plus coûteuse, et ne permettant généralement pas l'accouplement direct au moteur électrique ou à tout mouvement de rotation.

La pompe centrifuge, dont le couple est assez faible aux basses vitesses, s'adapte bien aux aéromoteurs rapides.

Le couplage de la pompe peut se faire soit mécaniquement par l'intermédiaire d'un multiplicateur sur la tige de commande qui descend dans le tube de refoulement, soit électriquement.

IV Conclusion

Bien qu'il existe de nombreuses sortes de capteurs éoliens, seuls les capteurs à axe horizontal de type « éolienne rapide » sont voués à un avenir pour la production d'énergie électrique à grande échelle. Les recherches effectuées par l'aéronautique dans le domaine de l'aérodynamique et les systèmes de régulation automatique des pales pour obtenir une vitesse de rotation des pales à peu près constante quelle que soit la vitesse du vent supérieure à la vitesse de démarrage principalement ont permis d'accroître considérablement le rendement des éoliennes à tel point que l'on atteint aujourd'hui des rendements approchant les 50 %. Mais l'utilisation de systèmes de carénage permet d'élargir la surface balayée et donc dépasser le fameux 59 % défini par Betz. De plus les éoliennes sont de plus en plus puissantes (plusieurs mégawatts par éoliennes).

Jusqu'alors, les éoliennes étaient attractives car écologiques, relativement silencieuses, et autonomes mais le prix de revient du kilowattheure était bien plus cher que celui du réseau électrique national. Aujourd'hui, les progrès techniques font que l'énergie éolienne est de moins en moins coûteuse et presque aussi compétitive que l'énergie du réseau national en prenant en compte le coût d'installation des lignes électriques. On pense avoir une énergie éolienne compétitive dans trois à cinq ans. EdF espère que le kilowattheure éolien qui coûtait en moyenne 50 centimes il y a dix ans, va passer à 35 centimes en 2001 et à 28 centimes en 2005. Dans ce contexte, l'énergie éolienne sera devenue une énergie comme les autres.

On assiste actuellement à de vastes programmes d'implantation d'énergie éolienne en France et en Europe tel le programme Eole 2005 lancé par EdF qui va mobiliser 620 millions de francs d'investissements privés et environ 700 millions de francs supplémentaires pour aller jusqu'à 500 mégawatts. EdF pense pouvoir aller sans hésiter jusqu'à 1 000 mégawatts dans l'hexagone ce qui est modeste comparé aux 12 000 mégawatts qui doivent être installés en Europe d'ici 2002. Ali-Réza Laali, spécialiste du domaine à la direction des études de recherche d'EdF pense qu'un réseau peut s'accommoder de 10 à 20 % d'énergie éolienne. L'avenir de l'énergie électrique est donc très optimiste.

Bibliographie

- Encyclopédie des Sciences Industrielles Quillet, supplément, *Energie éolienne*, Paris, 1983.

- THEMA Encyclopédie Larousse, Sciences et Techniques, *Energie du vent et de la mer*, 1990.

- Encyclopédie Techniques de l'ingénieur, Mécanique et chaleur, *Energie éolienne*, Jean MARTIN, 1996.

- Energie éolienne. Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.

- Vent et performances des éoliennes, C.G. JUSTUS, Edition SCM, 1980.

- Eoliennes et Aérogénérateurs - Guide de l'énergie éolienne, Edisud, 1979.

- L'USINE NOUVELLE, *Energie renouvelables : Le printemps du solaire et de l'éolien*, N° 2638, 1998.

- Encyclopédie Microsoft ENCARTA 97, *Eolienne*, Microsoft Corporation, 1993-1996.