

ENERGIE EOLIENNE

Généralités et le point de la technique

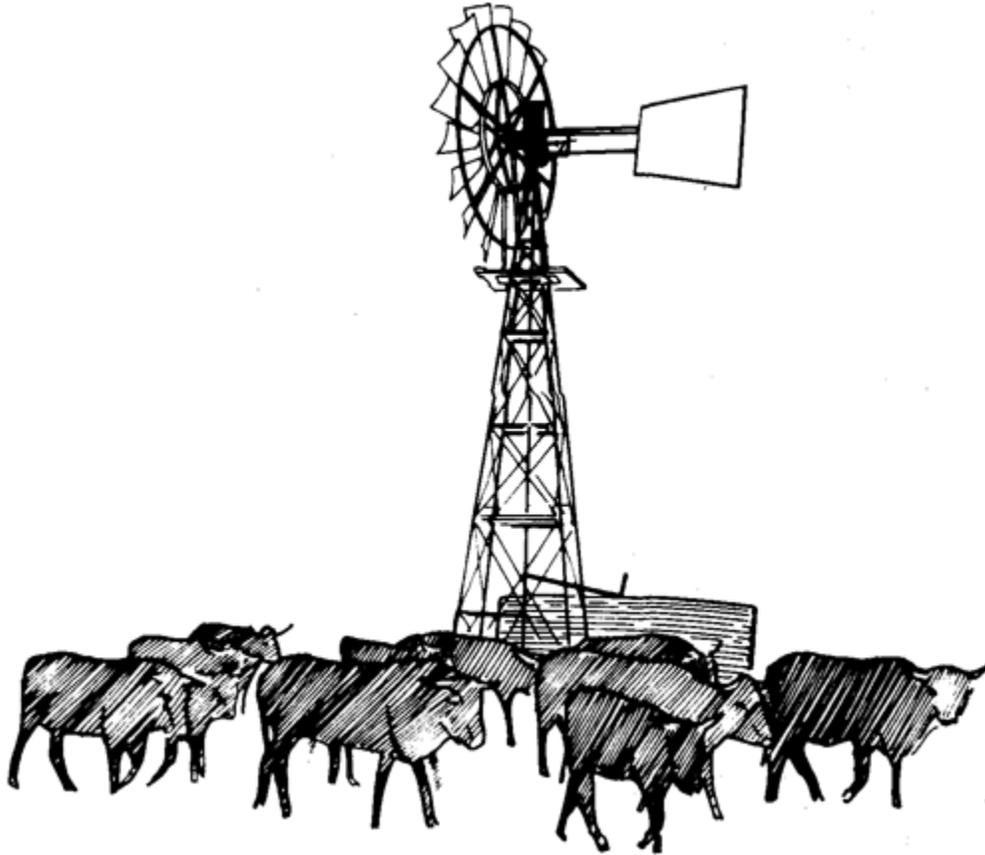
Généralités - Historique

L'énergie éolienne est utilisée pour le pompage de l'eau depuis plusieurs siècles. En réalité, c'est la principale technique appliquée pour l'assèchement des zones étendues des Pays-Bas depuis le XIII^{ème} siècle [36]. Les petites pompes éoliennes, généralement en bois, ont été utilisées pour l'assèchement des marécages (en Hollande) et au pompage de l'eau de mer pour l'extraction du sel (France, Espagne et Portugal). Elles sont également utilisées à grande échelle en Europe et elles le sont encore dans certaines régions comme au Cap Vert (figure 107).

Toutefois, la principale pompe éolienne utilisée jusqu'à présent est la pompe éolienne agricole dite américaine (figure 108). Elle comporte normalement un rotor en acier à plusieurs pales, semblable à un ventilateur, et elle entraîne généralement une pompe à mouvement alternatif normalement au moyen d'une boîte de démultiplication (figure 109) directement monté sur une pompe à piston installée dans le forage se trouvant juste au dessous. La pompe éolienne agricole américaine ou "moulin américain" a été mise au point au cours de la période allant de 1860-1900, pendant laquelle des millions et des millions de têtes de bétail ont été élevées dans les grandes plaines d'Amérique du Nord. Les ressources en eau superficielles trop limitées ont amené les utilisateurs au perfectionnement des systèmes d'élévation de l'eau pour le pompage des eaux souterraines. Les pompes éoliennes sont ainsi devenues rapidement la principale source d'énergie à usage général employée à cet effet. Le développement agricole aux États-Unis a contribué au développement des ateliers et des usines de fabrication des pompes éoliennes. Des programmes importants de recherche et développement ont été entrepris, certains ont été subventionnés par le Gouvernement des États-Unis [37]. Ces programmes de recherche ont pour objet le perfectionnement des pompes éoliennes destinées aussi bien à l'irrigation que pour l'alimentation en eau potable.

FIGURE 108

Pompe éolienne agricole en acier dite "moulin américain"

**FIGURE 109**

Train d'engrenages démultiplicateur d'un modèle type d'une pompe éolienne agricole "américaine"

Pour une surface du piston: $A = \mu d_2/4$

On aura:	volume engendré par course	$V = A \cdot s$
	volume d'eau refoulé par course	$q = (\mu_{vol}) \cdot V$
	et le débit par minute	$Q = n \cdot q$

D'autres "nouveaux territoires" tel que l'Australie et l'Argentine ont adopté la pompe éolienne, et l'on compte à ce jour un million de pompes éoliennes agricoles en service [38] la plus forte densité étant en Australie et en Argentine [39] [40]. Il faut cependant signaler que la pompe éolienne appelée "moulin américain" est actuellement rarement utilisée pour l'irrigation. Son emploi est de nouveau limité à ses utilisations premières, à savoir l'approvisionnement en eau du bétail et, à un degré moindre l'alimentation en eau des fermes ou des communautés agricoles. Elles sont donc plutôt utilisées pour des hauteurs de pompage relativement élevées par rapport à celles des installations d'irrigation courantes. Les valeurs typiques s'échelonnent entre 10 à 100 mètres pour les forages. Les grosses pompes éoliennes sont même utilisées couramment sur des forages de plus de 200 mètres de profondeur.

Les pompes éoliennes ont également été utilisées en Asie du Sud-Est et en Chine bien plus avant qu'en Europe, essentiellement pour l'irrigation ou pour le pompage de l'eau de mer dans les cuves d'assèchement pour l'extraction du sel de mer. La pompe éolienne chinoise à voile (figure 110) a été utilisée depuis plus de 1000 ans. Des dizaines sinon des centaines de milliers sont encore en service dans les provinces de Hubei, Henan et du Nord Juangsu [41]. Des modèles traditionnels chinois sont fabriqués en perches de bambou réunies par des câbles et munis de tissu en voile. Elles sont généralement accouplées à une pompe à palettes ou à une pompe en vertèbre de dragon (échelle à eau), le plus souvent pour des hauteurs de pompage de moins d'un mètre. Plusieurs d'éoliennes chinoises sont généralement tributaires de la stabilité de la direction du vent, puisque de leur rotor a une orientation unique. Des centaines de pompes éoliennes de conception similaire à celle des pompes chinoises sont aussi utilisées pour alimenter les cuves de sel en Thaïlande (figure 111).

Dans les années cinquante 50 000 pompes éoliennes environ étaient en service dans le bassin méditerranéen pour les installations d'irrigation [42]. Il s'agit de variantes de la pompe éolienne agricole tout en métal, dite américaine, elle en diffère uniquement par l'utilisation de voiles triangulaires en toile au lieu de pales métalliques. Ces éoliennes à voile ont un rotor classique employé depuis des siècles dans la région Méditerranée, ces éoliennes sont plutôt connues sous le nom "d'éolienne crétoise" (voir figure 112). Au cours des 30 dernières années, la prospérité croissante des agriculteurs et la baisse des prix des moteurs et des carburants ont aidé au remplacement des éoliennes par les petits moteurs électriques dans la région Méditerranéenne; il n'empêche que l'île de Crête garde toujours les quelque 6000 pompes éoliennes en voile qui étaient en service jusqu'à une date très proche [91]. Cependant, le nombre de pompes éoliennes en service en Crête diminue rapidement et en 1986 il n'en restait à peine qu'un millier.

FIGURE 110

Eolienne chinoise à chaîne (pour clarté une seule voile a été représentée sur le schéma (d'après [51])

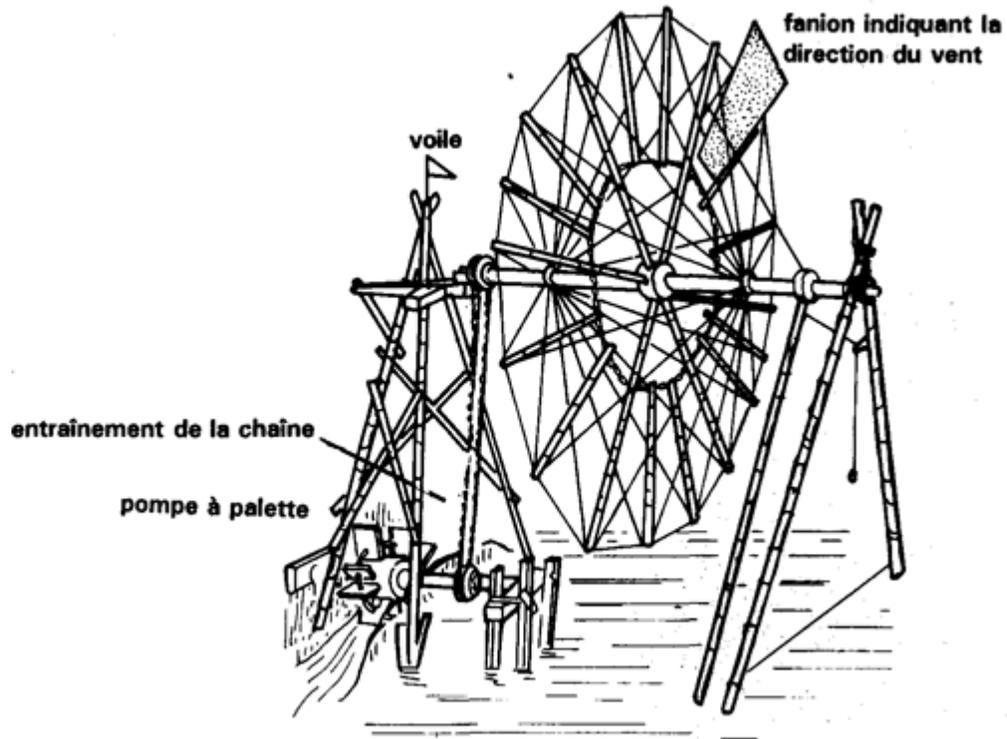


FIGURE 111
Pompe à éolienne Thaï (d'après Schioler [24])

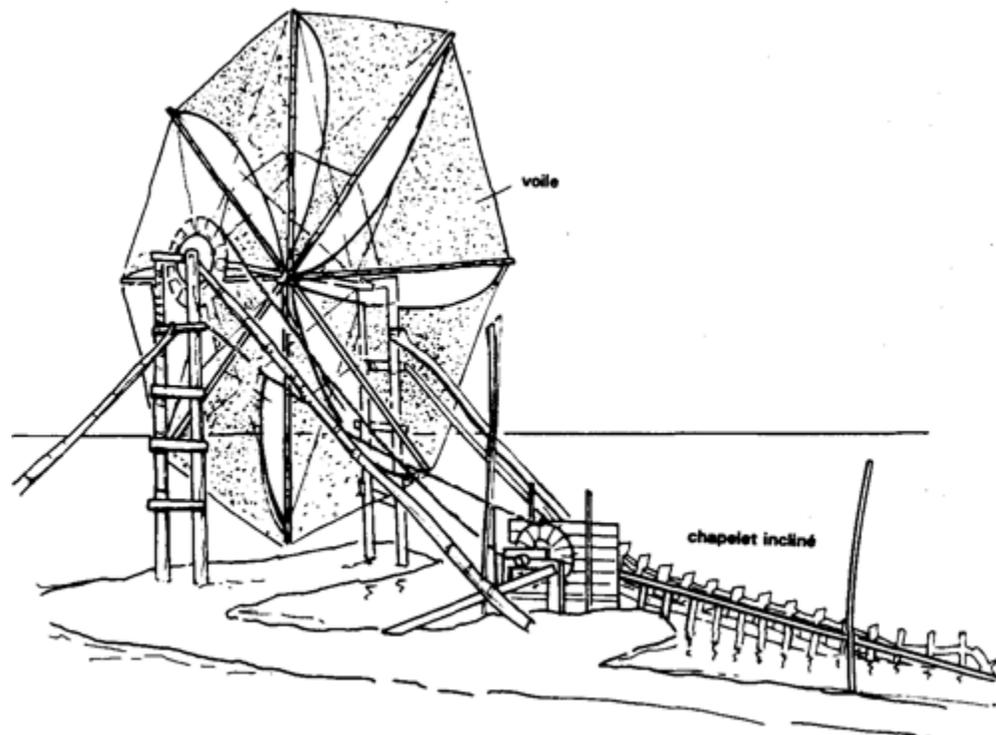
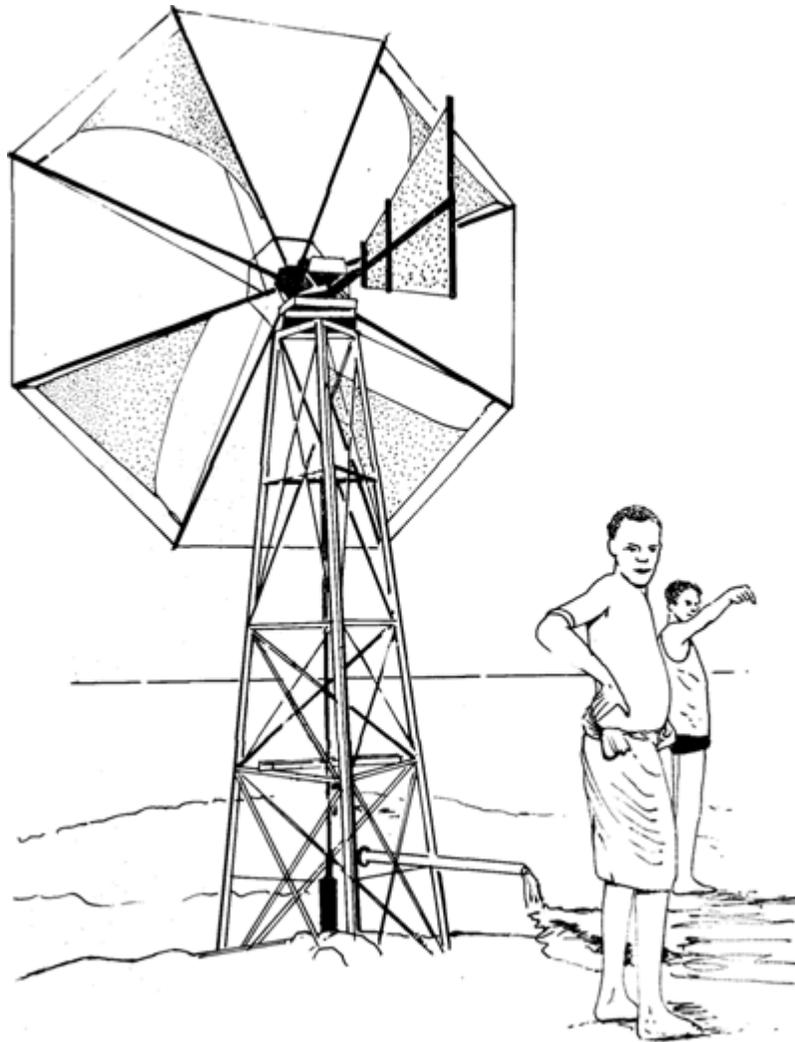


FIGURE 112

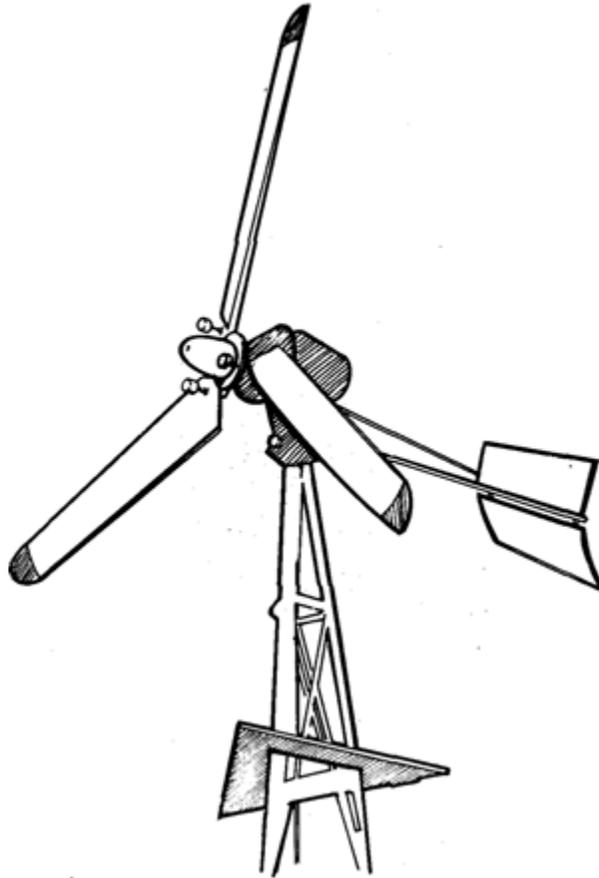
Pompe éolienne du type "crétois" utilisée dans le cadre d'un projet d'irrigation dans le sud de l'Ethiopie (d'après Fraenkel 115])



Un autre domaine d'utilisation de l'énergie éolienne a pris de l'essor vers la fin des années 1920 et au début des années 1930, à savoir celui des générateurs éoliens ou des aérogénérateurs. Des milliers de petits générateurs éoliens, tel que le générateur australien Dunlite (figure 113), ont été mis en service pour charger les accumulateurs devant servir pour l'éclairage et en particulier à l'alimentation des postes de radiocommunication, dans les zones rurales isolées. Dans les régions où le vent est favorable, ce type de machine constitue une meilleure alternative à l'utilisation d'une batterie de cellules photovoltaïques pour l'entraînement des pompes d'irrigation. Il est à noter cependant que leur emploi dans ce domaine n'a pas été trop significatif jusqu'à présent.

FIGURE 113

Aérogénérateur Dunlite de 2 kw

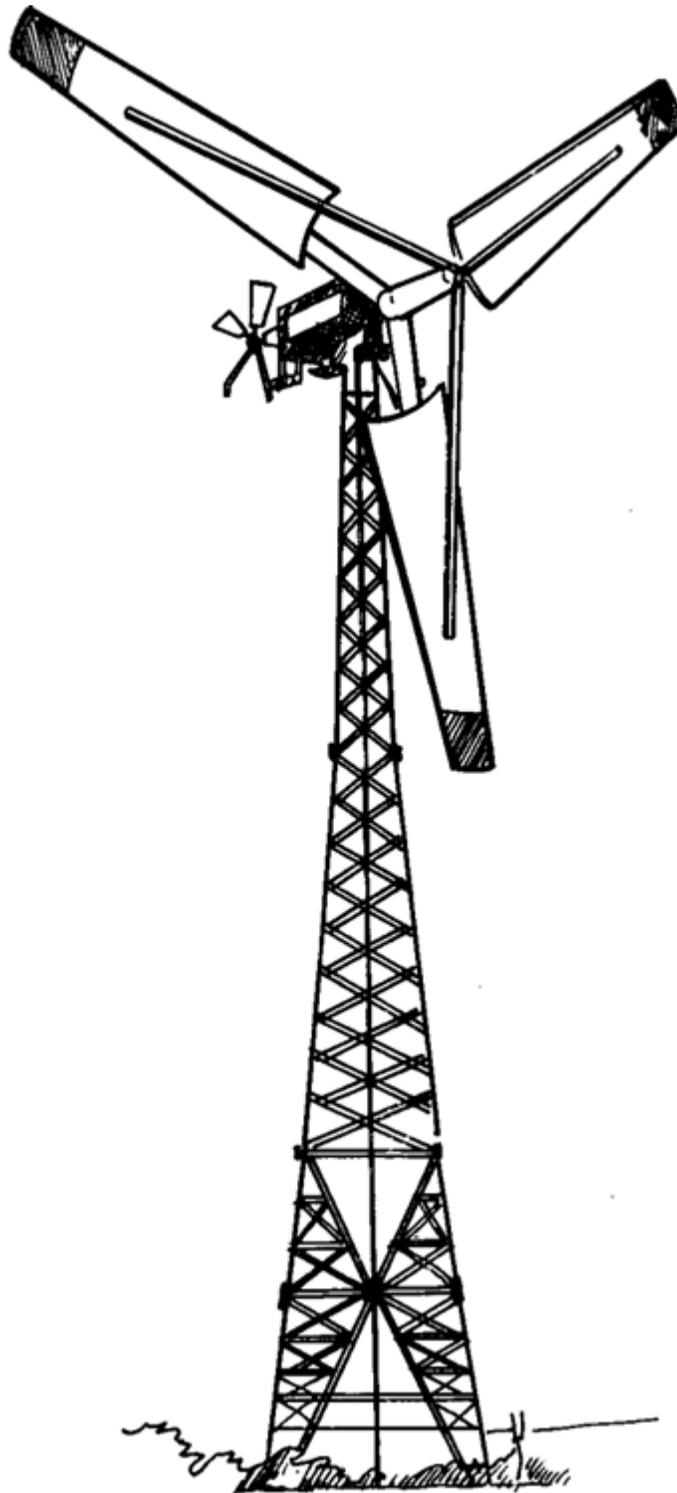


Des turbines éoliennes de grandes tailles destinées à la production de l'électricité ont été (et elles le sont encore) fabriquées. La plus importante est une machine de 5 mégawatts (5000 kw) en cours de construction en Allemagne. Toutefois, plusieurs machines de capacité moyenne sont actuellement installées pour assurer l'alimentation du réseau électrique local en Californie de même qu'au Danemark. En effet, plus de 10 000 générateurs éoliens de taille moyenne ont été installés en un temps record à peine supérieur à 3 ans en Californie. La figure 114 représente un modèle type d'une turbine éolienne moderne de 55 kw de puissance et de 15 m de diamètre (Windmatic) de fabrication danoise. Les éoliennes de cette taille pourraient devenir une alternative très intéressante pour les installations d'irrigation par pompage à grande échelle. Elles offrent d'ailleurs, des possibilités supérieures à celles des pompes éoliennes mécaniques traditionnelles (voir Gilmore [43] et Nelson *et al.* [44]).

Le point de la technique

Les pompes éoliennes se prêtent à deux modes d'utilisation distincts, à savoir l'irrigation et l'approvisionnement en eau. Par conséquent les pompes éoliennes appartiennent à deux grandes catégories et ce en raison des différentes exigences techniques, pratiques et économiques propres à ces deux modes d'utilisation. Ceci ne veut en aucun cas dire qu'une pompe éolien-ne d'approvisionnement en eau ne peut pas servir à des fins d'irrigation (ce qui arrive souvent d'ailleurs), mais plutôt que les modèles conçus pour l'irrigation ne s'adaptent généralement pas aux installations d'approvisionnement en eau.

FIGURE 114
Aérogénérateur Windamatic de 55 kw



La plupart des pompes éoliennes d'adduction d'eau doivent avoir une fiabilité parfaite, et fonctionner sans surveillance la plupart du temps. Elles doivent donc être équipées de

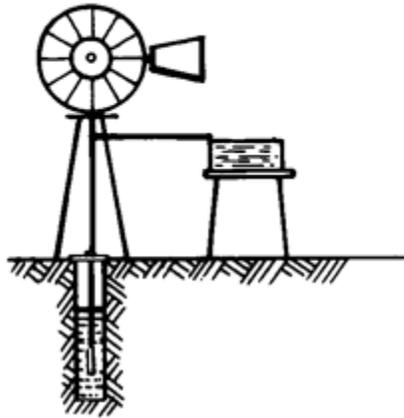
dispositifs automatiques les empêchant de tourner à survitesse par temps d'orage, d'exiger un entretien et de contrôle facile, et pouvant pomper l'eau à des profondeurs de 10 mètres au moins. Une pompe éolienne agricole doit normalement pouvoir fonctionner plus de 20 ans sans problèmes majeurs, l'entretien étant limité à un contrôle habituel annuel sans qu'il soit nécessaire de remplacer des pièces majeures. Il s'agit là d'un impératif technique particulièrement de rigueur, puisqu' une pompe éolienne de ce genre doit pouvoir fonctionner normalement en moyenne plus de 80 000 heures avant qu'une usure significative n'apparaisse. Une telle durée de vie équivaut 4 à 10 fois la durée de vie utile de la plupart des petits moteurs diesel, et 20 fois la durée de vie d'un moteur d'une petite pompe. Les pompes éoliennes satisfaisant ces normes sont généralement en acier, et de fabrication en usine. Elles entraînent des pompes à piston par l'intermédiaire de tiges à mouvement alternatif. Du fait qu'elles doivent être nécessairement robustes, elles sont donc d'un coût prohibitif à en juger par la puissance fournie. Toutefois, les propriétaires de ranches américains, australiens et argentins concèdent à payer un tel prix pour avoir des pompes éoliennes d'une fiabilité élevée et nécessitant une intervention humaine réduite au minimum. En effet, tel est le principal avantage de ces pompes pratiquement par rapport à la plupart de tous les autres systèmes de pompage.

D'autre part, les campagnes d'irrigation ont un caractère saisonnier. Ainsi l'éolienne reste parfois en arrêt pendant une bonne partie de l'année. D'autre part elles sont caractérisées par le pompage à forts débits et pour faibles hauteurs d'élévation, et par une valeur intrinsèque faible de l'eau. Ainsi toute pompe éolienne conçue pour l'irrigation doit être de faible coût, et cette exigence prévaut pratiquement à toutes autres considérations. Comme l'irrigation implique généralement la présence de l'agriculteur et/ou d'autres personnes, il n'est donc pas essentiel de disposer d'une machine capable de fonctionner sans surveillance. C'est pourquoi les éoliennes qui ont été utilisées dans le passé à des fins d'irrigation sont le plus souvent des machines de conception simple, et de fabrication artisanale. Elles constituent pour l'agriculteur un moyen de mécanisation pas trop coûteux (se reporter aux figures 110, 111 et 112). Cependant, au cas où les pompes éoliennes agricoles standard (figure 108) seraient utilisées pour l'irrigation, généralement à des hauteurs d'eau nettement plus faibles que pour les réseaux d'adduction d'eau il est souvent difficile de trouver une pompe à piston de diamètre suffisant pour obtenir une cylindrée de volume suffisant pour absorber la puissance fournie par l'éolienne. De plus, les éoliennes agricoles doivent dans la plupart des cas être installées juste au-dessus de la pompe, sur des fondations en béton armé. Par suite leur emploi est généralement limité au pompage de l'eau à partir des puits ou des forages, plutôt qu'au pompage des eaux de surface. On peut aussi adapter une pompe aspirante à une éolienne agricole, et de la faire fonctionner à des hauteurs d'aspiration pouvant atteindre environ 5 à 6 mètres, mesurées à partir du plan d'eau (voir les dispositions types des pompes éoliennes agricoles représentées à la figure 115). D'ailleurs, la plupart des éoliennes d'irrigation de fabrication locale, par exemple celles utilisées en Chine, fonctionnent avec des pompes à mouvement rotatif qui sont beaucoup plus pratiques aux faibles hauteurs d'eau. Par ailleurs, elles ne sont pas soumises à des efforts mécaniques aussi élevés qu'une éolienne de fabrication industrielle. A cet effet il est utile de rappeler que ces éoliennes de fabrication industrielles exercent souvent sur la tige de pompe une traction de plus d'une tonne qui est largement suffisante pour arracher n'importe quelle pompe mal installée.

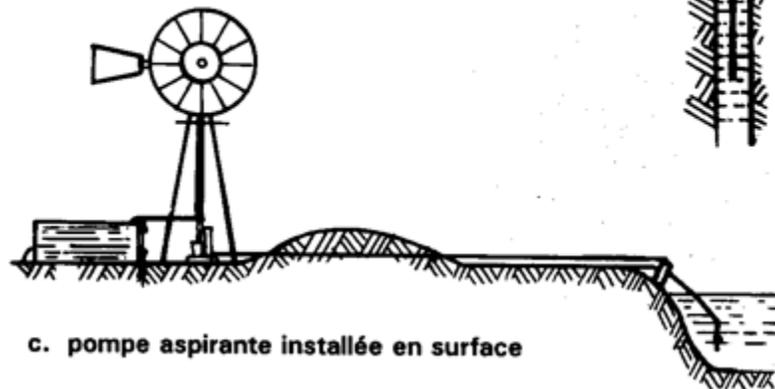
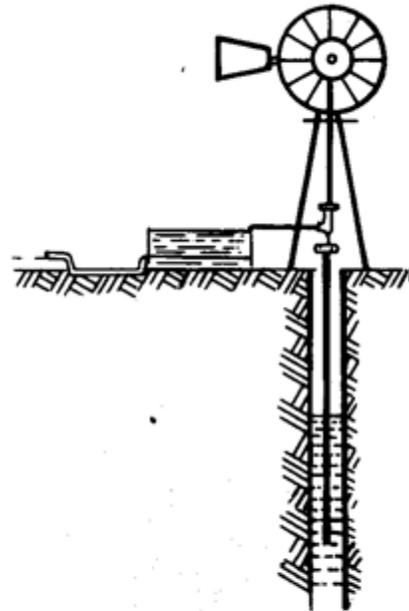
FIGURE 115

Installation type d'une pompe éolienne agricole

a. pompe de forage alimentant un château d'eau surélevé

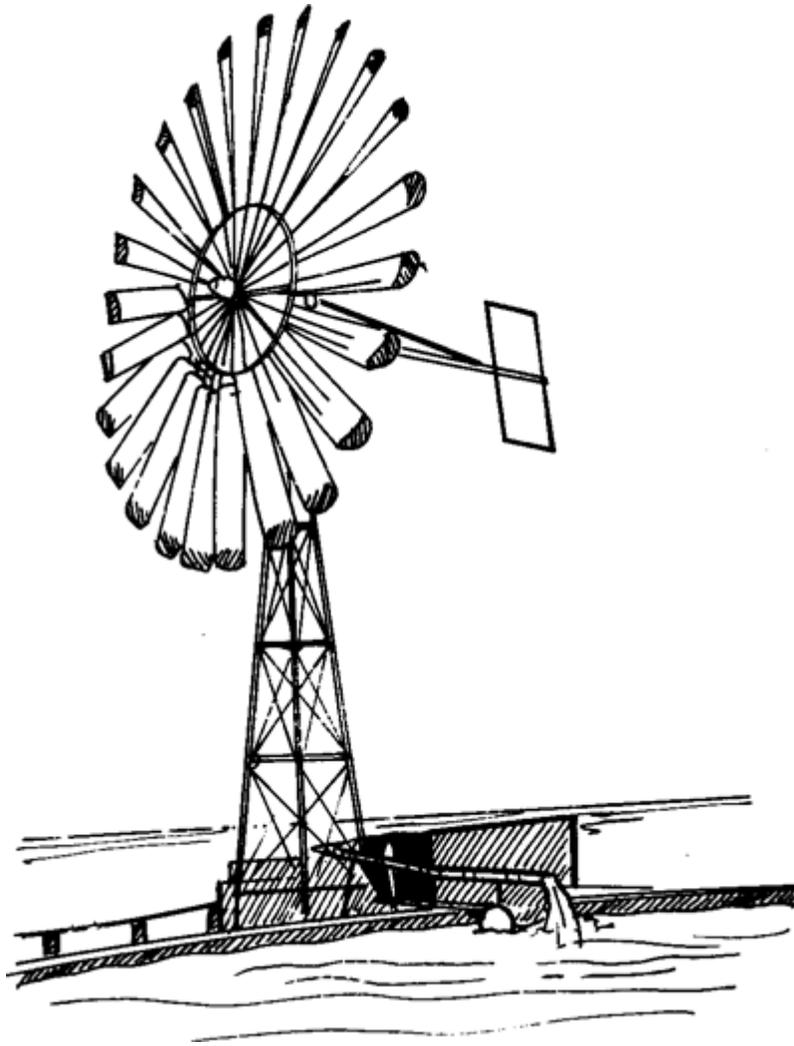


b. puits alimentant un réservoir



c. pompe aspirante installée en surface

FIGURE 116
Pompe éolienne IT fabriqué au Kenya sous le nom de "Kijito" et au Pakistan sous celui de "Tawana"



Des efforts ont été récemment déployés pour mettre au point des pompes éoliennes en acier moins coûteuses présentant les mêmes avantages des modèles anciens plus robustes. Or, la plupart des éoliennes actuellement fabriquées en usine sont de conception ancienne qui remonte à 1920 et même bien avant cette date. Elles sont donc pour la plupart excessivement lourdes, coûteuses, et difficile à installer convenablement dans les régions isolées. Des tentatives récentes de modernisation ont été entreprises afin de rendre la pompe éolienne agricole traditionnelle plus simple et plus légère. La figure 116 représente la pompe éolienne IT dont le poids est presque la moitié de celui de la plupart des modèles traditionnels de même taille. Elle est fabriquée au Kenya sous le nom de "Kijito" et au Pakistan sous le nom de "Tawana". Le coût de ces derniers modèles est sensiblement deux fois plus faible que celui des modèles américains ou australiens de taille similaire. C'est avec des transformations de ce genre que l'on peut réduire les coûts des pompes éoliennes en acier fabriquées en usine, et doter le marché de pompes aussi durables que les modèles traditionnels à des prix abordables pour justifier leur emploi pour l'irrigation.

Principes de la conservation de l'énergie éolienne

Puissance du vent

La puissance du vent est une fonction du troisième degré de la vitesse. La formule générale donnant cette puissance s'écrit comme suit:

$$P = \frac{1}{2} \rho A V^3$$

avec P la puissance disponible en watts, ρ densité de l'air (de valeur approchée 1,2 kg/m³ au niveau de la mer), A la section transversale du flux d'air considéré (ou bien la surface balayée par le rotor d'une éolienne), et V la vitesse instantanée du vent libre. Si la vitesse V est exprimée en m par seconde (signalons qu'une vitesse de 1 m par seconde correspond pratiquement à 2 noeuds ou miles nautiques par heure), la puissance du vent au niveau de la mer serait égale à:

$$P = 0,6 V^3 \text{ watts/m}^2 \text{ de superficie du rotor}$$

TABLEAU 16
Puissance du vent calculée en fonction de la vitesse du vent exprimée en densité de puissance par unité de surface du courant d'air

Vitesse de vent									
m/s	2,5	5	7,5	10	15	20	30	40	
km/h	9	18	27	36	54	72	108	144	
mph	6	11	17	22	34	45	67	90	
Puissance du vent									
kW/m ²		0,01	0,08	0,27	0,64	2,2	5,1	17	41
CV/pi ²		0,001	0,009	0,035	0,076	0,23	0,65	2,1	5,2

TABLEAU 17
Variation de la densité de l'air en fonction de l'altitude

Altitude (au-dessus du niveau de la mer)					
(pi)	0	2500	5000	7500	10000
(m)	0	760	1520	2290	3050
Coefficient de correction de densité					
	1,00	0,91	0,83	0,76	0,69

Comme la puissance est une fonction du troisième degré de la vitesse, elle est donc fortement sensible à la vitesse du vent puisque pour une vitesse double la puissance, serait huit fois plus importante. Les données du tableau 16 montrent les variations de la puissance en fonction de la vitesse.

Ces chiffres montrent les variations très fortes de la puissance du vent. En effet, cette puissance passe d'une valeur de 10 watts/m² pour une légère brise, à 41 000 watts/m² pour un cyclone soufflant à 144 km/h. Ces variations extrêmes conditionnent notablement la conception de tous les éléments du système. C'est ainsi qu'il est impossible de faire fonctionner des éoliennes avec une vitesse de vent inférieure à 2,5 m/s, car à ce moment-là la puissance disponible serait trop faible. D'un autre côté, il serait essentiel de dissiper la puissance et même d'arrêter une éolienne si le vent souffle à plus de 10 à 15 mètres/seconde (25-30 mph), car la puissance excessive ainsi développée pourrait endommager une éolienne normale qui n'est pas conçue pour travailler dans de telles conditions.

Etant proportionnelle à la densité de l'air, la puissance d'une éolienne diminue avec l'altitude du fait que l'air devient de moins en moins dense (voir tableau 17).

Puisque l'énergie fournie par une éolienne est beaucoup plus sensible à la vitesse qu'à la densité de l'air, l'incidence de l'altitude est relativement marginale. Par exemple, la puissance unitaire d'un vent soufflant à 5 m/s au niveau de la mer est de 75 watts/m² environ. Toutefois, du fait de la relation du troisième degré décrite ci-dessus, il suffit d'une vitesse de 5,64 m/s à une altitude de 3000 m au-dessus du niveau de la mer pour obtenir exactement la même puissance de 75 watts/m². La diminution de la densité de l'air peut donc être facilement compensée par une très faible augmentation de la vitesse du vent aux hautes altitudes.

Energie disponible dans le vent

Puisque la vitesse du vent est constamment variable, sa puissance est elle aussi variable mais dans une proportion encore plus forte du fait de la relation du troisième degré qui lie la puissance à la vitesse du vent. L'énergie disponible est égale à la puissance développée durant une période de temps déterminée. Or, il s'agit là d'une question complexe que Lysen [45] a bien illustrée. En effet le point de départ de l'estimation de l'énergie disponible dans le vent en un endroit donné sont les informations disponibles sur les vitesses moyennes du vent observées au cours d'une période de temps prédéterminée. Les moyennes mensuelles sont généralement les plus employées. La principale conclusion à retenir c'est que l'énergie effectivement disponible dans le vent au cours d'une période donnée est nettement plus forte que l'énergie obtenue à partir de la vitesse moyenne relative à cette même période. C'est ainsi que l'énergie réellement disponible est presque le double de la valeur obtenue par la simple multiplication de la puissance éolienne instantanée correspondante à la vitesse moyenne par la durée considérée. En effet, du fait des variations de la vitesse du vent, la moyenne de la puissance est sensiblement deux fois plus élevée que la puissance instantanée calculée à partir de la vitesse moyenne. La puissance moyenne peut donc dépasser la puissance instantanée obtenue à partir de la vitesse moyenne considérée dans une proportion de 1,5 à 3, suivant les variations propres de la vitesse du vent local. Le coefficient est d'autant plus élevé que les variations sont importantes.

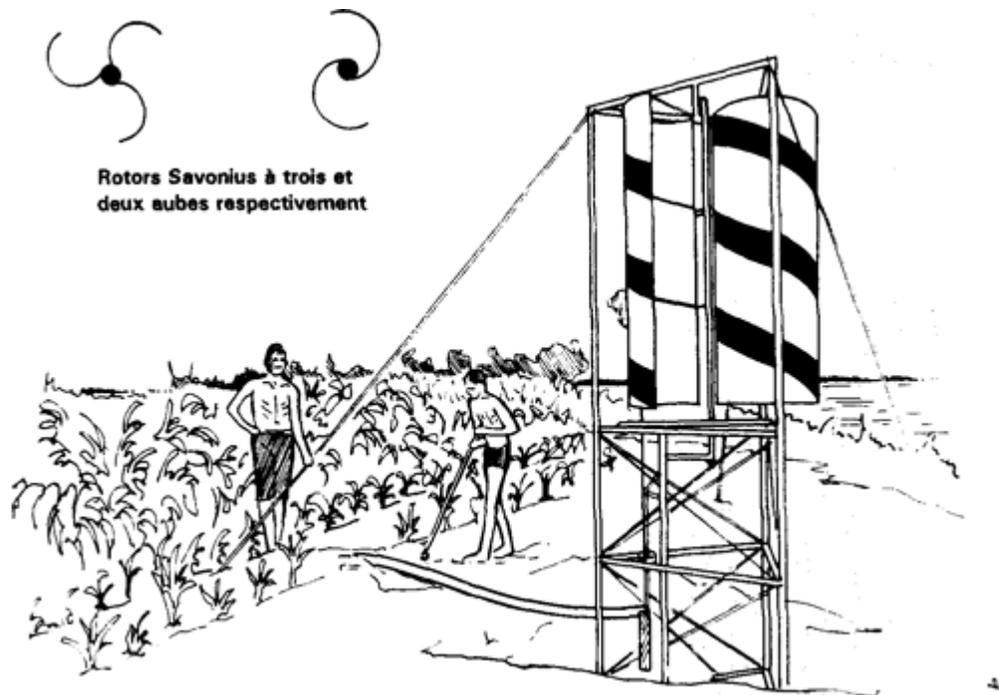
Toutefois, à tout instant et quelle que soit la vitesse du vent, l'énergie disponible est en règle générale proportionnelle à la puissance d'ordre trois cubes de la vitesse moyenne. Nous exposerons plus loin, au cours de la présente section, les méthodes de détermination de l'énergie utile que l'on peut obtenir à partir d'un régime de vent donné agissant sur une éolienne déterminée.

Conversion de la puissance éolienne en puissance mécanique

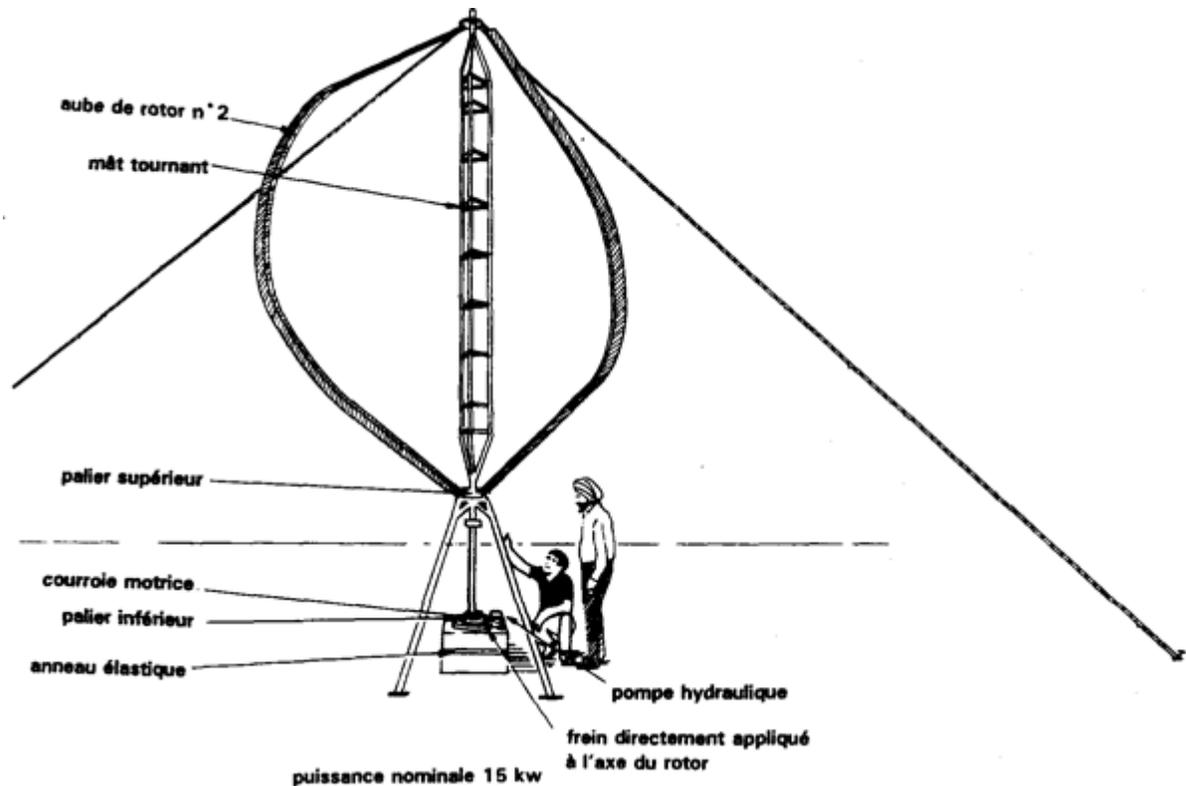
L'énergie cinétique du vent peut être transformée en énergie mécanique en faisant appel à deux principaux mécanismes, qui consistent à ralentir le régime du vent pour transformer l'énergie cinétique en énergie mécanique. La technique la plus élémentaire et la moins efficace est basée sur le principe de la force de traînée. Une force de traînée apparaît dès qu'un obstacle fait face au vent créant ainsi un phénomène de turbulence. Cette force de traînée a la même direction que le vent. Les éoliennes les plus anciennes et les plus élémentaires, connues sous le nom "panamones" présentent d'un côté du rotor une surface plane, l'autre côté étant protégé (par exemple en abaissant les voiles). La force de traînée différentielle qui en résulte provoque la rotation du rotor.

FIGURE 117

Pompe éolienne à axe vertical à rotor de Savonius utilisée en Ethiopie

**FIGURE 118**

Modèle type d'une turbine éolienne à axe vertical à rotor Darrieus (profil troposkien)



L'autre méthode utilisée dans les éoliennes les plus performantes, consiste à créer une force verticale portante. Dans ce cas la voile ou la surface plane est légèrement inclinée par rapport à la direction du vent, ce qui imprime ce dernier d'une légère déviation et il en résulte deux forces, la plus importante est perpendiculaire à la direction du vent, l'autre est une force de traînée nettement plus petite. C'est ce principe qui fait que le bateau à voile peut filer à une vitesse plus rapide que le vent. La portance sert principalement à faire dévier le vent et à en extraire l'énergie cinétique avec le moins de turbulence, elle permet aussi, mieux que la traînée, d'extraire d'une manière plus efficace l'énergie éolienne.

Il est à noter que l'énergie cinétique éolienne maximale pouvant théoriquement être utilisée par une turbine éolienne "parfaite" s'élève à 60% environ. En effet, il est impossible d'arrêter complètement le vent, ce qui limite la proportion de l'énergie cinétique que l'on peut en extraire.

Rotors à axes horizontal et vertical

Les éoliennes tournent soit autour d'un axe vertical, ou bien d'un axe horizontal. Toutes les éoliennes actuellement en service et que l'on vient de décrire sont à axe horizontal. Les efforts de recherche entrepris actuellement visent la mise au point d'éoliennes à axe vertical. En effet, on n'aurait plus à les orienter face au vent, puisqu'elles offrent la même section transversale dans toutes les directions. Cette particularité constitue néanmoins un inconvénient, puisqu'en cas de tempête, il serait alors impossible de protéger le rotor pour réduire la force qui lui est appliquée.

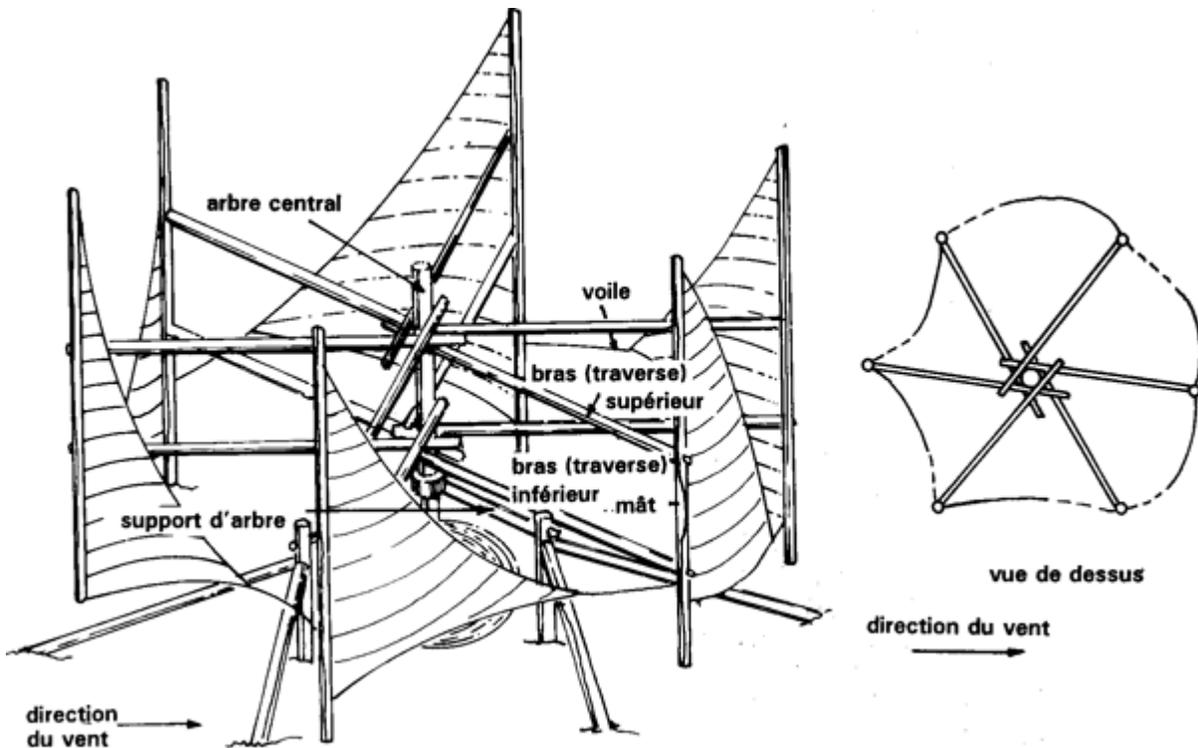
Il existe trois principaux types d'éoliennes à axe vertical. Les panamones à traînée différentielle (déjà décrites ci-haut), l'hélice (ou rotor) de Savonius ou rotor en "S" (figure 117), et la turbine éolienne de Darrieus (figure 118). Le rotor de Savonius comprend deux et même parfois trois pales courbes entrecroisées autour d'un axe central entre deux coiffes d'extrémité. Son principe de fonctionnement repose sur l'utilisation conjointe d'une traînée différentielle et d'une force portante. Le rotor de Savonius a eu son essor en tant que dispositif facile à monter sur place avec des moyens très simples. Mais en réalité cette simplicité est plutôt apparente que réelle. En effet, des problèmes importants peuvent surgir lors de l'installation d'un rotor inévitablement lourd sur les paliers, ainsi que lors de l'accouplement de l'axe vertical de l'éolienne à une pompe volumétrique (car sa vitesse de rotation est trop faible pour qu'elle puisse être accouplée à une pompe centrifuge). D'autre part, les principaux inconvénients de l'éolienne à rotor Savonius sont doubles:

son rendement est médiocre, et sa fabrication requiert une importante masse de matériau vue sa taille importante. Ce qui lui confère rapport coût-efficacité moins bon comparé aux autres types de rotors, il est difficile de la protéger contre les survitesses en cas de tempête et son envolée en éclats.

La turbine éolienne de Darrieus est munie de pales à section transversale portante qui est profilée d'une manière analogue aux ailes d'un avion. Ces pâles peuvent être rectilignes, dans ce cas la machine aurait un profil en forme de H. Mais en réalité, la plupart des pales d'éoliennes de ce type sont en forme de "batteur d'oeufs" ou profil "troposkien" tel qu'indiqué sur la figure. Le choix de cette forme s'explique essentiellement par le fait que la force centrifuge due à la rotation aurait tendance à fléchir les pales droites, alors que la forme troposkienne ou le profil en corde à sauter des pales courbes offre une plus grande résistance aux efforts de flexion. Les turbines à axe vertical du type Darrieus ont un très bon rendement, puisque leur fonctionnement repose uniquement sur l'utilisation des forces portantes créées par l'interception du vent par les pales. Comme elles tournent avec une vitesse 3 à 5 fois supérieure à celle du vent, la direction du vent fera avec la surface d'une pale un angle suffisamment petit pour produire une portance et non une traînée. L'éolienne de Darrieus a été précédée par une autre éolienne à axe vertical beaucoup plus rudimentaire à voile triangulaire (Bermuda) utilisée dans les Iles Turques et Caïques aux Antilles (figure 119). Ce dispositif représente une meilleure illustration du principe de fonctionnement de l'éolienne de Darrieus, puisque l'on voit mieux comment les voiles triangulaires produisent une force motrice lorsqu'elles interceptent le vent, tout à fait comme pour un bateau à voile. D'ailleurs, l'éolienne de Darrieus fonctionne exactement selon le même principe.

FIGURE 119

Rotor à voile à axe vertical des Iles Turques et Caïques (d'après UNESCAP [51])



Il y a aussi deux autres classes de turbines éoliennes Darrieus qui sont munies de pales droites. Ces deux modèles sont protégés contre les survitesses et les dommages qui en résultent surtout au niveau des pales, par un dispositif de protection contre les vitesses excessives. Il s'agit là de la Turbine Eolienne à Axe Vertical à Géométrie Variable (TEAVGV) mise au point par Musgrove au Royaume-Uni et de la Turbine Eolienne à Axe Vertical à Pas Variable (TEAVPV) Gyromill mise au point par Pinson aux Etats-Unis. Bien que le modèle (TEAVGV) de Musgrove ait été utilisé comme pompe éolienne par P. Y. ingénierie, tous les travaux de perfectionnement en cours sont axés sur la mise au point de générateurs éoliens à axe vertical de moyenne à forte puissance destinés à la production de l'énergie électrique. Donc la tendance générale de perfectionnement de ces turbines éolienne n'est que d'un intérêt assez limité pour l'irrigation par pompage.

Les éoliennes à axe vertical sont très rarement utilisées en pratique, bien qu'elles constituent un thème de recherche très en vogue. Les efforts de recherche déployés pourraient se justifier principalement dans la mesure où elles pourraient apporter certaines simplifications par rapport aux éoliennes à axe horizontal, par suite une optimisation probable du rapport coût-efficacité, ce qui reste encore à prouver.

La plupart des rotors à axe horizontal sont mis en marche par les forces de portance créées par l'inclinaison des pales axiales ou des hélices en forme d'ailes d'avion, de sorte qu'à la vitesse de rotation optimale ces pales font un petit angle avec la direction du vent et la force portante créée serait tangentielle. Comme les extrémités du rotor tournent plus vite que son centre, elles se présentent au vent suivant un angle plus faible, pour cela il faut que les pales d'un rotor à axe horizontal soient en forme irrégulière pour se présenter au vent suivant un angle constant, depuis le centre du rotor jusqu'à son extrémité. Les pales ou les voiles des machines tournant lentement peuvent être très simples (voir figure 107). Mais pour les dispositifs plus rapides un profilage

précis est impératif (figure 113 et 114). Néanmoins, dans le cas des trois exemples décrits ci-haut le principe de fonctionnement est toujours le même.

Rendement, Puissance et Couple

Chaque turbine éolienne ou éolienne est caractérisée par les courbes de puissance en fonction de la vitesse de rotation tracées à des vitesses de vent différentes (figure 120 A). De la même manière, le couple fourni par un rotor d'éolienne peut être représenté par une série de courbes, comme celle reproduite à la figure 120 B.

Le rendement maximum correspond à la puissance maximale obtenue pour une vitesse du vent donnée. Le rendement est généralement défini comme un nombre sans dimension défini comme le rapport de la puissance mécanique divisée par la puissance éolienne traversant la section d'un disque de forme circulaire ou bien toute autre forme correspondant à la section verticale du rotor de l'éolienne. Ce rapport est appelé coefficient de puissance C_p et sa valeur numérique est donnée par la relation:

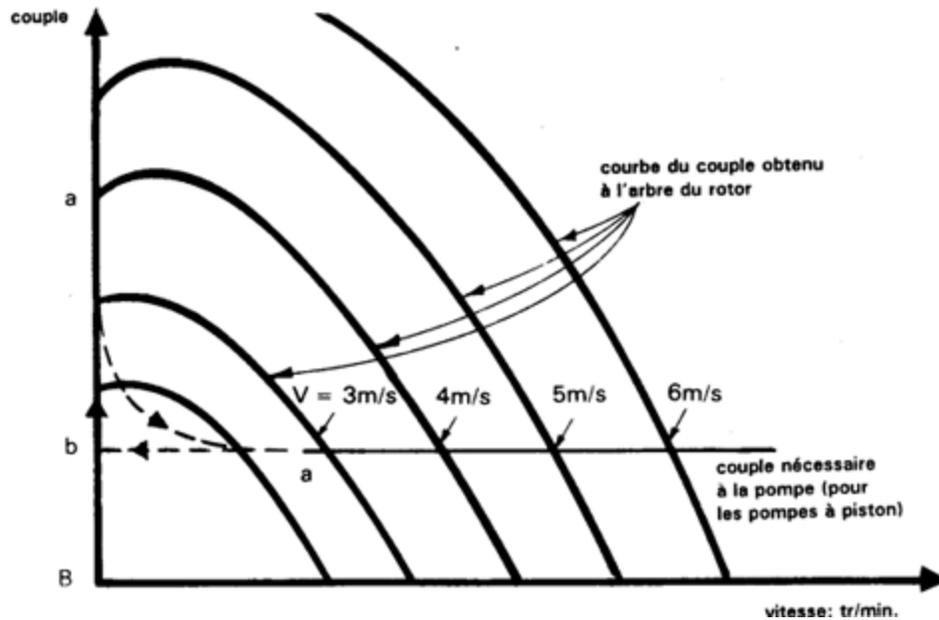
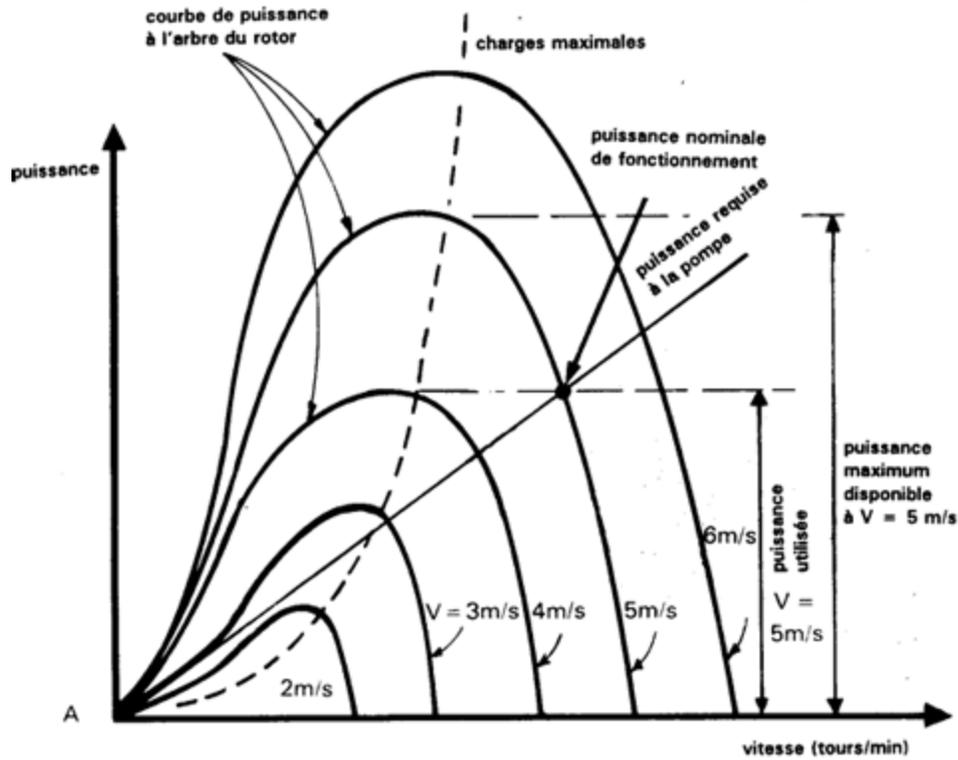
$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AV^3}$$

La vitesse est conventionnellement représentée par un nombre sans dimensions égal au coefficient de vitesse de l'extrémité des pales. Il s'agit du rapport de la vitesse de l'extrémité d'une pale de rotor d'éolienne à la vitesse V du vent, pour un rayon R et une vitesse de rotation (ω) en radians/seconde, cette vitesse s'écrit donc:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V}$$

FIGURE 120

La puissance (A) et le couple (B) d'un rotor d'éolienne en fonction de la vitesse de rotation correspondant à différentes vitesses du vent



Lorsque le rotor de l'éolienne est fixe, son coefficient de vitesse est lui aussi nul et le rotor est bloqué. C'est ce qui arrive lorsque le couple produit par le vent n'atteint pas le seuil nécessaire pour vaincre la résistance due à la charge appliquée. Un coefficient de vitesse égal à l'unité 1 signifie que les extrémités se déplacent à la même vitesse que le

vent, le vent dans ces conditions frappe les pâles avec un angle de 45°. Lorsqu'il est égal à 2, ceci veut dire que les extrémités des pales tournent à une vitesse double de celle du vent, etc.

Les courbes C_p en fonction de X pour trois types de rotors et pour différents profils A, B, C, D, E1, E2 et F, sont représentées à la figure 121. La deuxième série de courbes représente le coefficient du couple qui est une grandeur sans dimensions relative au couple obtenu pour un rotor et une vitesse du vent donnés (le couple est la force de torsion appliquée à l'arbre moteur). On définit le coefficient de couple C_t par la relation:

$$C_t = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho AV^2 R}$$

avec T: Couple effectif correspondant à la vitesse V du vent pour un rotor donné de rayon R.

Solidité du rotor

La "Solidité" (δ) est un terme représentant la surface pleine balayée par le rotor d'une éolienne. Elle est définie généralement comme le rapport de la somme de la largeur (ou bien des "cordes") de toutes les pales, au périmètre du rotor. Autrement dit, 24 pales dont la corde (distance mesurée du bord d'attaque au bord de fuite) est de 0.3 m montées sur un rotor de 6 m de diamètre, auraient pour coefficient de solidité:

$$\delta = \frac{(24 \times 0,3)}{6\pi}$$

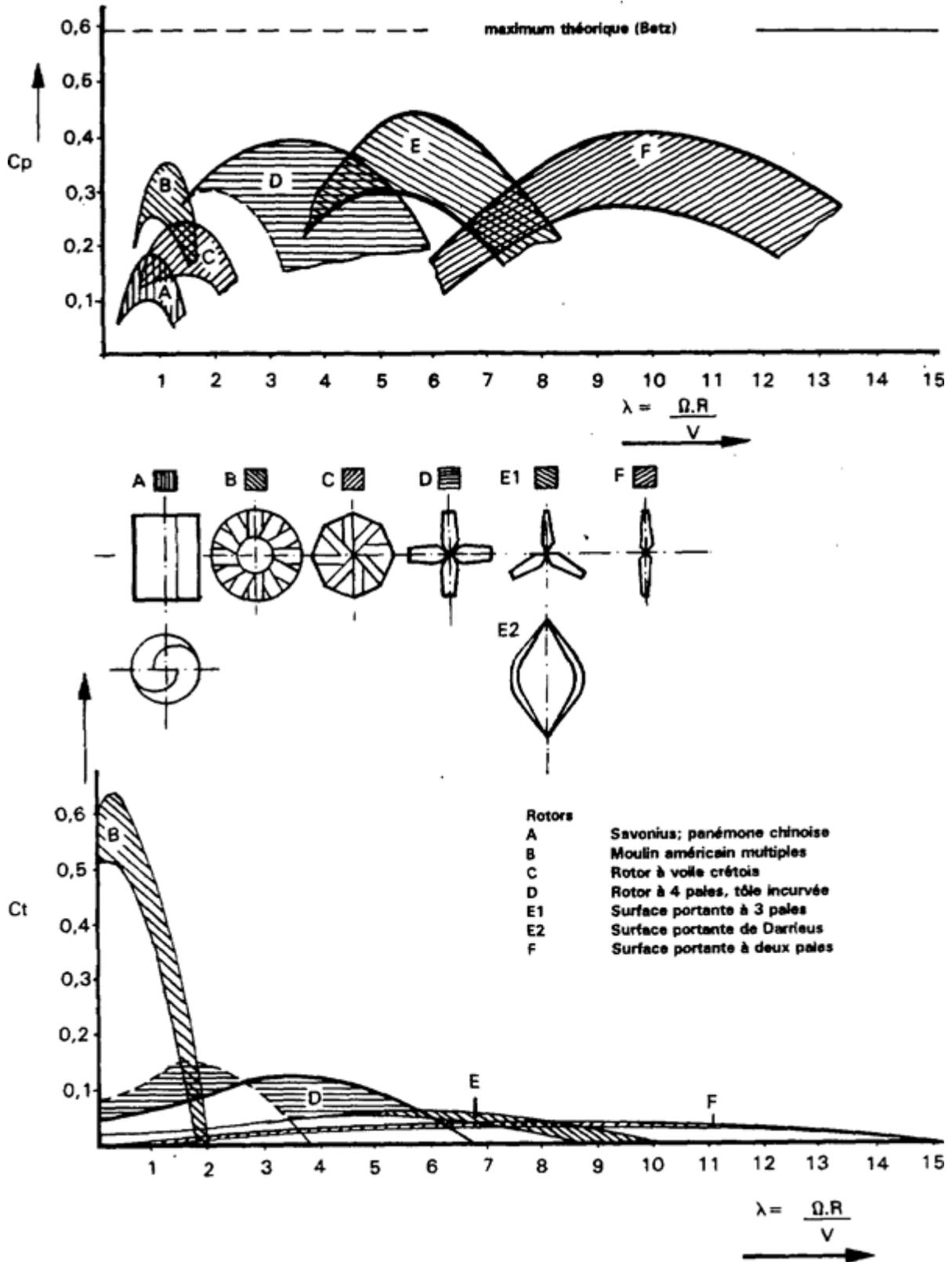
Les rotors multipales, comme ceux des pompes éoliennes, (voir rotor "B" de la figure 121) sont à coefficient de solidité élevé, car une proportion importante de la surface balayée par le rotor est pleine. Ces machines fonctionnent à des vitesses relativement faibles, pour cela leurs pales font un petit angle avec le plan de rotation, comme dans une vis à filetage fin. Ceci correspond à un coefficient de vitesse faible au rendement maximal, de l'ordre de 1.25. Le rendement maximum est sensiblement inférieur à celui des rotors plus rapides tels que les rotors "D", "E" et "F" de la figure. En revanche, le rotor multipales a un coefficient de couple nettement plus élevé pour un coefficient de vitesse nul (0,5 à 0,6) que pour les autres types de rotors. Son couple de démarrage supérieur à celui en fonctionnement normal, joint à sa faible vitesse de rotation pour une vitesse de vent donnée, font de lui un dispositif est bien adapté à l'entraînement des pompes de forage à mouvement alternatif.

Par contre, les rotors E1 et F à deux ou trois pales et à faible coefficient de solidité, représentés à la figure 121 sont les plus efficaces (ceux dont les valeurs de C_p sont les plus élevées). Mais la vitesse à l'extrémité de pales doit être égale à 6 à 10 fois celle du vent pour obtenir le rendement optimal. A cet effet, elles sont donc légèrement inclinées par rapport au plan de rotation, comme une vis dotée d'un filetage fin, et elles ont ainsi une vitesse de rotation supérieure à celle d'un rotor à coefficient de solidité élevé, pour une vitesse de vent et un diamètre de rotor donnés. D'autre part, ces rotors ont un couple de démarrage très faible, pratiquement nul. Ce qui fait qu'ils ne peuvent fonctionner qu'avec des charges nécessitant un faible couple de démarrage, par

exemple des générateurs électriques (ou des pompes centrifuges) plutôt que des pompes volumétriques.

FIGURE 121

Coefficients de puissance (C_p) (ci-dessus) et coefficients de couple (C_t) pour divers types de rotors de turbines à éolienne, représentés en fonction du rapport des vitesses à l'extrémité des pales (λ) (d'après Lysen/CWD [45])



Malgré leur caractère apparemment théorique, ces considérations sont essentielles pour la conception des rotors d'éoliennes. Pour résumer, les rotors multiples à coefficient de

solidité élevé tournent lentement, et ils sont sensiblement moins efficaces que les rotors à faible coefficient de solidité et à pales moins denses. Mais ils ont par contre un couple de démarrage 5 à 20 fois plus important.

Accouplement des rotors aux pompes

Les rotors à coefficient de solidité élevé sont normalement utilisés avec des pompes volumétriques (à piston), puisque comme nous l'avons déjà vu à la section *Pompes volumétriques alternatifs*, Chapitre 3, les pompes à piston à simple effet ont un couple de démarrage 3 à 5 fois supérieur au couple en régime normal. En revanche, les rotors à faible coefficient de solidité, conviennent davantage aux générateurs électriques, pompes centrifuges, et même aux pompes à pédales, aux pompes à chaînes et à disque dont le couple de démarrage est inférieur au couple de fonctionnement à la vitesse nominale. Le tableau 18 présente les différentes caractéristiques et les valeurs de C_p relatives aux types courants de rotors d'éoliennes qu'on vient de décrire.

Les courbes des schémas 120 A et B représentent les courbes de charge d'une pompe volumétrique à entraînement direct, superposées aux courbes de puissance fournies par un rotor à éolienne. La courbe en pointillé de la figure 120 A correspond au lieu géométrique des points de puissance maximale; pour un fonctionnement ininterrompu du système le point de fonctionnement doit se trouver à droite de la ligne de puissance maximale. Car à ce moment là toute baisse légère de la vitesse du vent entraîne le ralentissement de la machine et l'augmentation de la puissance absorbée par l'arbre, ce qui correspond à un fonctionnement stable. Le point de fonctionnement ne peut être à gauche de la courbe de puissance maximale que lorsque la vitesse du vent est forte. On peut noter aussi qu'en fonctionnement normal la pompe volumétrique exige un couple pratiquement constant de 10 Nm dans l'exemple considéré, et un couple de démarrage au moins trois fois plus important pour les raisons indiquées à la section *Pompes volumétriques alternatives*, Chapitre 3. Sur la figure 120 D, on voit qu'il faut une vitesse du vent de 5 m/s pour atteindre le couple de démarrage de la pompe éolienne, mais une fois la pompe amorcée, la vitesse du vent peut tomber à 3 m par seconde sans que le point de fonctionnement passe à gauche de la courbe de puissance maximale et que la pompe éolienne ne s'arrête. Notons que la courbe en pointillé "a-a" correspond à un régime transitoire qui correspond uniquement à la mise en marche ou au démarrage de la pompe éolienne.

Pour que la puissance fournie par une pompe éolienne soit à tout moment égale à la puissance maximale, il faut que le point de fonctionnement correspondant à la charge appliquée appartienne au (ou au voisinage du) lieu des points de puissance maximale (figure 120). Il ressort également de ces courbes que le point de fonctionnement correspond toujours à l'intersection de la courbe du rotor de la pompe éolienne à la vitesse du vent observée à un moment donné avec la courbe de charge de la pompe. Dans l'exemple considéré, le point d'utilisation correspond à une vitesse du vent de 5 m/s et l'on peut voir que la pompe n'utilise que les 2/3 environ de la puissance maximale pouvant être obtenue à cette vitesse du vent. En effet, le point de fonctionnement s'écarte trop du point de fonctionnement optimal (intersection de la courbe du troisième degré représentant la puissance maximale avec la courbe de puissance à $v = 5$ m/s). Cet écart résulte d'un défaut d'adaptation de la machine motrice (rotor d'éolienne) et de la charge (pompe). L'expression "rendement d'adaptation" désigne la fraction effectivement utilisée de la puissance disponible au rotor pour une vitesse du vent

donnée, traitent pour plus de détail voir Pinilla *et al.* [46]. Les courbes de la figure 120 ce défaut d'adaptation devient de plus en plus grave pour les vitesses fortes du vent. Le défaut en question est en fait moins grave qu'il ne le semble à première vue, car fort heureusement le rendement optimal est obtenu pour les faibles vitesses du vent. Lorsque le vent souffle trop fort, la vitesse de rotation de l'éolienne devient supérieure à celle nécessaire pour mettre en marche la pompe associée. Mais le rendement de l'installation sera réduit du fait de la mauvaise adaptation. Néanmoins, la puissance utile reste vraisemblablement largement suffisante, car l'augmentation de la puissance fournie du fait de l'accroissement de la vitesse compenserait la perte du rendement.

TABLEAU 18
Comparaison des divers caractéristiques de différents types de rotors

Type	Caractéristiques de fonctionnement	Conditions de fabrication	c_p	Coef. de solidité	c.v.p. (optimal)
A axe horizontal					
Voile de Crête ou palettes plates	Couple de démarrage moyen et vitesse faible	simples	0,05 à 0,15	50% 1,5-2,0	1,5-2,0
Pale cambré (moulin américain)	Couple de démarrage élevé et vitesse faible	moyennes	0,15 à 0,30	50 à 80%	1-1,5
Aérogénérateur à vitesse moyenne	Couple de démarrage peu élevé et vitesse faible	moyennes, un certaine précision étant cependant requise	0,20 à 0,35	5 à 10%	3-5
A axe vertical					
Panémone	Couple de démarrage moyenne et vitesse moyenne élevée	moyennes	0,15	100%	0,8-1
Rotor Darrieus	Couple de démarrage nul et vitesse moyenne	précises	0,25 à 0,35	10 à 20%	3-5
TEAVPV ou Gyromill	Couple de démarrage nul ou faible et vitesse moyenne	précises	0,25 à 0,35	15 à 40%	2-3

c.v.p. : coefficient de vitesse de l'extrémité de pale (λ)

On pourrait croire que les pompes centrifuges s'adaptent mieux à une éolienne que les pompes volumétriques, mais en réalité leur rendement tombe rapidement à zéro au-delà d'un certain seuil de vitesse de rotation pour une charge statique donnée. Autrement dit, il est difficile de faire fonctionner les pompes centrifuges avec un rendement acceptable dans un intervalle de vitesses suffisamment large couvrant pour pouvoir la plupart des rotors d'éoliennes. C'est pour cette raison que l'on n'utilise généralement pas les pompes centrifuges avec les éoliennes (sauf par l'intermédiaire d'une transmission électrique qui adapte la vitesse de rotation de la pompe à l'éolienne).

Il est bon de noter que l'adaptation d'une éolienne à une charge constituée par un générateur est plus facile à réaliser qu'avec les pompes. Ainsi les générateurs éoliens ont généralement à toutes les vitesses de fonctionnement, un meilleur rendement que les pompes éoliennes. Les lecteurs qui s'intéressent spécialement à ce sujet sont invités à consulter les ouvrages spécialisés, notamment Lysen [45].

Les performances globales des pompes éoliennes peuvent très facilement être améliorées par la mise au point de techniques permettant une meilleure adaptation du rotor à la pompe à l'intérieur d'un plus grand intervalle de vitesses du vent; plusieurs travaux sont en cours dans ce domaine et leur aboutissement pourrait se traduire par un accroissement considérable du rendement des pompes éoliennes. En attendant, le problème essentiel est de choisir la pompe qui s'adapte le mieux à une éolienne donnée, placée à un endroit défini et par un régime de vent dominant déterminé. Pour modifier la courbe de charge de la pompe, il suffit de changer l'effort moyen de traction exercé sur la tige de la pompe, soit en modifiant la course (en allongeant ou en raccourcissant la bielle), soit en changeant le diamètre de la pompe (figure 122). Le choix d'une course plus longue et/ou d'une pompe de plus gros diamètre accroîtra à la fois la force exercée sur la tige de pompe, la valeur moyenne du couple nécessaire, ainsi que la pente de la courbe de charge et inversement. De même, il ressort clairement de la figure 122 que l'accroissement de la charge entraîne en même temps l'augmentation de la puissance hydraulique aux vitesses élevées, ainsi que la vitesse de seuil V_s . (vitesse du vent nécessaire au démarrage). Par conséquent, la pompe C choisie dans notre exemple démarre avec un vent de vitesse nettement plus faible que pour les autres pompes. Mais par contre, elle fournit une puissance nettement plus faible aux vents forts, du fait de la faible pente de la courbe de charge dans ce cas. Il est donc important de trouver le bon compromis entre les deux contraintes contradictoires à savoir le démarrage à un vent suffisamment faible et l'obtention d'une puissance utilisable suffisante.

Les courbes caractéristiques typiques d'une pompe éolienne normale, reproduites à la figure 123, montrent que pour une vitesse du vent au démarrage égale à V_s , une pompe éolienne peut toujours fonctionner à une vitesse du vent légèrement inférieure V_{min} (tel qu'indiqué plus haut, dans le cas d'une pompe à piston). L'adaptation optimale est réalisée pour des vitesses du vent voisines de V_{min} (dont la valeur théorique est égale à $0,8 V_s$ [46], vitesse nominale du vent, et la puissance augmente pratiquement linéairement en fonction de la vitesse du vent jusqu'à une valeur V_f (vitesse du vent de base de l'éolienne). Aux vitesses plus fortes, il faut se protéger contre les fortes accélérations, sinon la machine risque d'être surchargée, endommagée voire détruite. Les différentes techniques utilisées à cet effet seront examinées dans la section suivante. Aux vitesses de vent particulièrement élevées, les mesures de sécurité les plus efficaces consistent à faire que l'éolienne "prendre du ris", "ferler" ou simplement s'arrêter. La figure 123 indique comment le processus en question débute à une vitesse du vent V_f (vitesse de ferlage) et se termine à une vitesse V_{sd} d'arrêt complet.

FIGURE 122

Le compromis entre la vitesse du vent au démarrage et la puissance utile des pompes éoliennes aux différentes charges

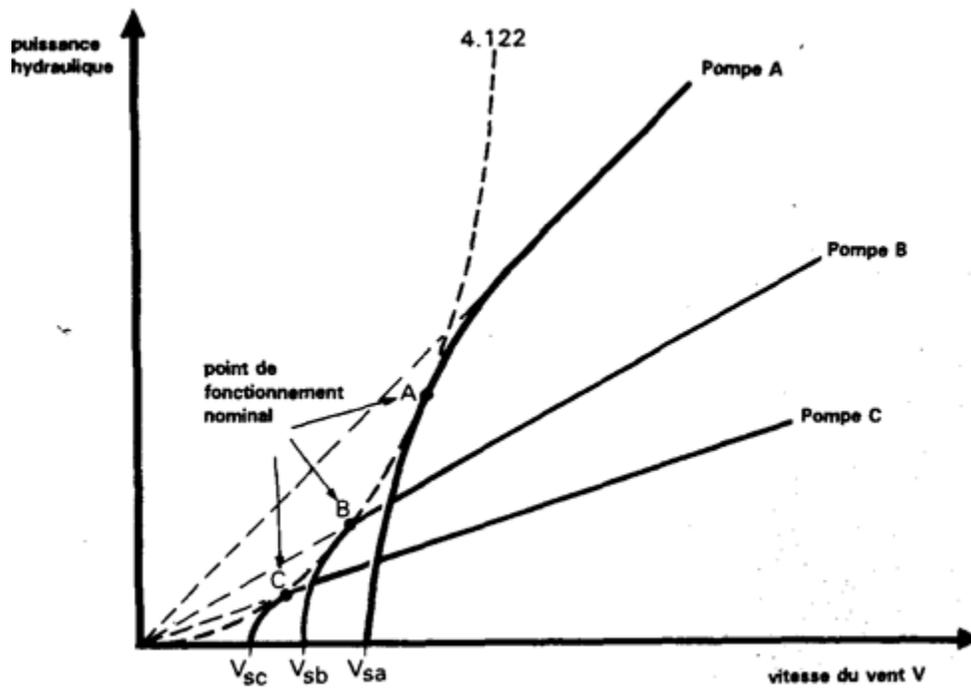
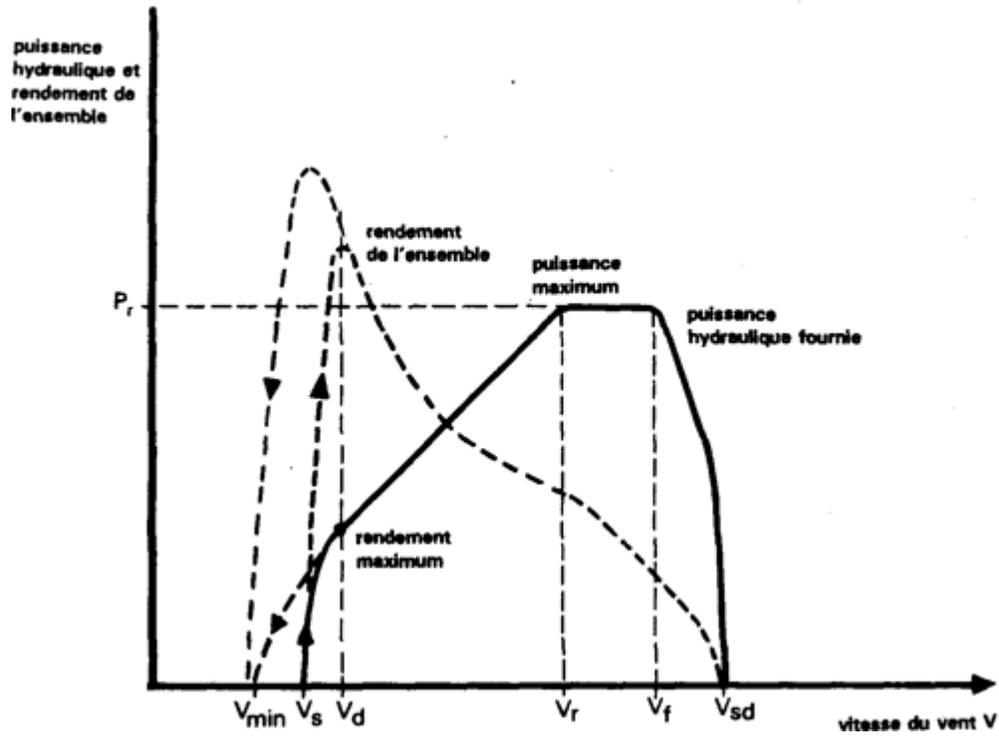


FIGURE 123

Courbe caractéristique d'une pompe éolienne montrant les variations de la puissance fournie et du rendement en fonction de la vitesse du vent



Méthodes de protection contre les tempêtes et le ferlage

Les éoliennes doivent être dotées d'un dispositif permettant de limiter la puissance fournie, sinon elles doivent être excessivement robustes (donc d'un coût prohibitif) rien que pour résister aux fortes puissances accidentelles obtenues en temps de tempête. Les bateaux à voile réduisent la superficie de leur voile en ferlant partiellement ou complètement les voiles (manuellement) lorsque le vent devient trop fort. De même, les éoliennes à voile Crétoise et les autres modèles traditionnels également simples adoptent normalement exactement la même méthode. Généralement aux vents forts, seulement quelques voiles seront mis en service, ou bien les voiles seront en ferlage partiel sur leurs mâts. Comme les éoliennes agricoles métalliques sont munies de pales en acier fixes, la solution adoptée le plus souvent dans ce cas consiste à installer le rotor légèrement décalé par rapport à l'axe du pylône de fixation de l'éolienne (figure 124), de sorte que le vent aurait toujours tendance à entraîner le rotor toujours derrière le pylône. Dans les conditions de fonctionnement normales, le rotor est maintenu dans le vent par un long empennage muni d'une girouette. Cette girouette est maintenue fixe à sa place au moyen d'un ressort préalablement tendu (voir figure). Lorsque la force exercée par le vent sur le rotor devient suffisante pour vaincre la tension préalable du ressort, l'empennage commence à tourner jusqu'à ce que le rotor présente son arête à la direction du vent (voir figure 124). Ce processus de ferlage commence dès que la puissance nominale est atteinte, et lorsque la vitesse du vent continue à augmenter, il se poursuit progressivement jusqu'au ferlage complet. Quand le vent baisse d'intensité, le ressort assure le rappel de la girouette et place le rotor de nouveau face au vent. Sur les éoliennes agricoles de fabrication industrielle, le fonctionnement de ce dispositif est habituellement entièrement automatique.

Les générateurs éoliens et les autres turbines éoliennes tournant à grande vitesse, et à coefficient de solidité élevé sont souvent munis d'un dispositif permettant de modifier le pas des pales. Par exemple, la machine Dunlite représentée à la figure 113 est équipée de petits contrepoids, placés à proximité du moyeu du rotor. Ces contrepoids permettent de neutraliser la réaction du ressort placé à l'intérieur du moyeu, afin de modifier la position des pales à la vitesse de ferlage pour obtenir un pas plus large sous l'action de la force centrifuge. Une autre solution consiste à déployer des volets de freinage destinés à empêcher les survitesses. Les turbines éoliennes de dimensions plus importantes ne sont pas équipées d'empennages stabilisateurs les maintenant face au vent. En effet, elles ne peuvent pas résister aux embardées rapides provenant du changement brusque de la direction du vent. Elles sont plutôt équipées d'un engrenage réducteur à vis semblable à celui d'une grue, qui les tourne doucement face au vent. Ce dispositif peut être entraîné soit par un moteur électrique commandé par les signaux électriques provenant d'une petite girouette, ou bien par un système analogue à celui monté sur le Windmatic reproduit à la figure 114. Ce système est adopté par les grandes éoliennes depuis plusieurs siècles, et il consiste à utiliser un rotor latéral qui déclenche le système de l'orientation chaque fois que le rotor principal n'est plus à angle droit par rapport à la direction du vent.

FIGURE 124

Système classique de protection d'une pompe éolienne contre les tempêtes consistant à dévier le rotor pour l'orienter de travers face au vent (vue en plan)

