

**I.T. DELLO**

# **LES ÉOLIENNES DE POMPAGE**

**Théories, matériels et réalisations**

Nouvelle édition revue et corrigée par

**Marie-Noëlle Reboulet**

Mars 1989

Collection « Le point sur les Technologies »



**GRET**

**LES  
ÉOLIENNES  
DE POMPAGE**

La collection « **Le Point sur les technologies** » est co-publiée par le **Ministère de la Coopération et du Développement** (République Française) et le **Groupe de Recherche et d'Échanges Technologiques (GRET)**, association privée à but non lucratif.

Les titres publiés dans cette collection sont principalement destinés aux techniciens et décideurs, mais peuvent être utiles aux scientifiques, professeurs et étudiants. Ils sont rédigés et conçus de telle façon que :

- l'essentiel du contenu est accessible à des personnes n'ayant pas suivi d'études supérieures scientifiques ;
- les technologies sont situées dans le contexte économique, social et culturel dans lequel elles peuvent contribuer au développement ;
- le lecteur trouve en annexes d'abondants renseignements pour l'aider dans sa démarche d'information (bibliographie, adresses de centres de recherche, de spécialistes, de constructeurs...).

Cette collection succède aux collections « **Le Point sur...** », publiée par le GRET entre 1984 et 1988, et « **Technologies et Développement** » publiée par le Ministère de la Coopération entre 1979 et 1988.

Les éditeurs examineront avec intérêt les documents qui pourraient leur être présentés pour publication. Soucieux d'élargir la diffusion et le rayonnement de cette collection, ils sont ouverts à toute collaboration avec d'autres institutions.

#### **LE CENTRE TECHNIQUE DE COOPÉRATION AGRICOLE ET RURALE**

Le Centre Technique de Coopération Agricole et Rurale (CTA) est installé depuis 1983 à Ede/Wageningen au titre de la Convention de Lomé entre les États Membres de la Communauté européenne et les États du groupe ACP.

Le CTA est à la disposition des États ACP pour leur permettre un meilleur accès à l'information, à la recherche, à la formation ainsi qu'aux innovations dans les secteurs du développement agricole et rural et de la vulgarisation.

CTA  
Postbus 380  
6700 AJ Wageningen  
Pays-Bas

**Ouvrages déjà parus dans la collection  
"TECHNOLOGIES ET DÉVELOPPEMENT"**

- Evaluation des énergies renouvelables pour le développement (1981) 100 F
- Energies nouvelles et développement (1978) 30 F
- Sahel et technologies alternatives (1977) 40 F
- Biomasse : comparaison des valorisations des sous-produits agricoles pailles de mil, de riz, coques d'arachide (1979) 57 F
- Biogaz : éléments de bibliographie (1980) 30 F
- Energies renouvelables au Sahel : évaluation des projets (1982) 70 F
- Les énergies de pompage : approvisionnement en eau et énergies renouvelables (1985) 80 F
- Biogaz (1984) 90 F
- Systèmes photovoltaïques pour les pays en développement : manuel d'installation et d'utilisation (1983) 80 F
- Les pompes à main en hydraulique villageoise (1987) 80 F
- Alternatives pour la transformation du maïs (1980) 44 F
- Nourrir autrement : pari sur une démarche appropriative (1981) 69 F
- Cultures associées en milieu tropical : éléments d'observation et d'analyse (1982) 70 F
- Equipements pour la transformation des produits agricoles à petite échelle et nouvelles formes de coopération industrielle (1988) 80 F
- La chaux : sa production et son utilisation dans l'habitat (1981) 70 F
- Le plâtre : sa production et son utilisation dans l'habitat (1982) 80 F
- La pierre : la connaître et savoir l'utiliser (1982) 80 F
- Bioclimatisme en zone tropicale (1986) 96 F
- Le cocotier : production et mise en oeuvre dans l'habitat (1986) 120 F
- Toitures en zones tropicales arides (1985) 80 F
- Le ronier et le palmier à sucre (1987) 110 F

Ces ouvrages sont disponibles à :

La Documentation Française

29-31, quai Voltaire

75007 PARIS

FRANCE

Tél. : (1) 40.15.70.00

**Ouvrages déjà parus dans la collection  
"LE POINT SUR"**

- DOSSIER N° 1 - Les éoliennes de pompage (1984) 60 F
- DOSSIER N° 2 - La transformation des fruits tropicaux (1984) 40 F
- DOSSIER N° 3 - L'extraction des huiles végétales (1984) 40 F
- DOSSIER N° 4 - La construction de citernes (1984) 40 F
- DOSSIER N° 5 - Les harnais pour la traction animale (1984) 40 F
- DOSSIER N° 6 - Briques et tuiles (1985) 40 F
- DOSSIER N° 7 - Techniques d'impression à coût modéré (1986) 60 F
- DOSSIER N° 8 - Le séchage solaire (1986) 60 F
- DOSSIER N° 9 - Les mini-laiteries (1986) 60 F
- DOSSIER N° 10 - Le captage des sources (1987) 80 F
- DOSSIER N° 11 - L'apiculture (1987) 120 F
- DOSSIER N° 12 - La maîtrise des crues dans les bas-fonds (1988) 190 F

**Ouvrage déjà paru dans la collection  
"LE POINT SUR LES TECHNOLOGIES"**

- Du grain à la farine (1988) 140 F

Ajouter 15 F par titre pour frais de port en Europe, 20 F par titre pour port hors d'Europe.

Ces ouvrages sont disponibles au :

**GRET**  
213, rue Lafayette  
75010 PARIS  
FRANCE  
Tél. : (1) 40.35.13.14.

## PRÉFACE

Les "éoliennes de pompage" appartiennent d'abord au monde de l'image avec sa poésie et sa magie... avec sa rigidité, sa fixité aussi. Comme sur une image, les idées semblent figées. L'éolienne de pompage serait une technique connue depuis l'antiquité, largement utilisée par les systèmes agricoles de tous les pays, mais aujourd'hui délaissée pour des équipements plus puissants... Sympathie, nostalgie des temps anciens mais en fin de compte abandon d'une technique dite du passé.

Cet ouvrage serait-il alors celui de nostalgiques bien intentionnés ? Ces passésistes seraient bien nombreux, si l'on en juge par le rapide épuisement de la première édition.

Non, s'intéresser aux éoliennes, c'est au contraire faire preuve de modernisme. En effet, même dans les pays industrialisés, soucieux de limiter les gaspillages d'énergie, on se penche actuellement avec intérêt sur ces techniques qui retrouvent les lettres de noblesse dont on les avait déchues.

Mais ce dossier s'adresse surtout à ceux, nombreux dans les "pays du vent", qui savent qu'il existe des systèmes d'exploitation agricoles où les éoliennes de pompage offrent encore aujourd'hui le meilleur compromis pour satisfaire les besoins en eau : investissement limité, technicité restreinte, fiabilité et facilité d'usage.

Il est destiné à ceux qui connaissent la valeur sociale d'un "service de l'eau domestique ou pastorale", ceux qui savent le prix de cette denrée si précieuse.

En un mot, ce dossier est réservé aux convaincus, aux hommes qui maintenant veulent agir. Pour eux, point de philosophie mais des préoccupations concrètes : comment exploiter un site bien venté, pour quel usage, à quelles conditions ?

C'est en suivant cette logique opérationnelle que les auteurs donnent ici une information pragmatique, patiemment rassemblée et puisée dans leur expérience accumulée depuis de longues années en Afrique et en Asie.

*René Massé*  
*GRET*



## Sommaire

	page
<b>Le vent, source d'énergie</b>	1
<b>Connaître les vents</b>	3
Une répartition inégale	3
Choisir le meilleur site	10
Évaluer la vitesse du vent	19
<b>L'énergie éolienne : un peu de théorie</b>	23
La puissance disponible	23
La vitesse de rotation des rotors	24
L'aérodynamisme	28
Les efforts subis par la structure	31
<b>Connaître les matériels</b>	35
<b>Le pompage</b>	37
Comprendre le principe	37
Les pompes volumétriques	43
Les turbomachines	51
<b>Les principaux types d'éoliennes</b>	56
Les éoliennes rapides ou aérogénérateurs	56
Les éoliennes lentes ou multipales	58



---

Les spécificités de chaque rotor	61
<b>Choisir l'association pompe-rotor</b>	<b>65</b>
Des adaptations judicieuses	65
Les principales associations possibles	66
<b>Installer une éolienne de pompage</b>	<b>73</b>
<b>Identifier les besoins</b>	<b>76</b>
Évaluer les besoins de pompage	76
Calculer le stockage de l'eau	80
<b>Assurer le fonctionnement</b>	<b>83</b>
Prévoir la maintenance	83
Favoriser l'insertion sociale et économique	85
<b>Choisir les matériels</b>	<b>89</b>
Dimensionner l'éolienne	89
Choisir la pompe	93
Choisir le type d'éolienne	94
<b>Des réalisations à connaître</b>	<b>97</b>
<b>D'anciennes éoliennes toujours actives</b>	<b>99</b>
La production de sel en Thaïlande	99
Les éoliennes crétoises	101
Les éoliennes américaines du XIXème siècle	102

<b>Des initiatives récentes</b>	104
La Sahores : le choix de l'autoconstruction	104
La Wind Energy Unit	107
ITDG : comment lancer un fabricant	110
Cap Vert, une richesse : le vent	113
En bref : quelques expériences intéressantes	115
<b>Les leçons de l'expérience</b>	119
<b>Annexes</b>	121
<b>Adresses utiles</b>	123
<b>Les constructeurs</b>	149
<b>Bibliographie</b>	169



## INTRODUCTION

La force du vent est une des plus anciennes sources d'énergie utilisées par l'homme. Ainsi les Chinois et les Perses utilisaient déjà des éoliennes pour moulinier le grain et pomper l'eau. Cette énergie gratuite et renouvelable a aussi largement contribué à l'essor de l'agriculture européenne et américaine. En témoignent les moulins typiques du paysage hollandais et les éoliennes multipales qui font partie du paysage des grandes plaines américaines.

Dans de nombreux pays l'accès à l'eau reste un besoin essentiel à satisfaire pour améliorer la santé des populations, faciliter l'abreuvement du bétail et accroître la production agricole. Dans les zones mal desservies ou enclavées les éoliennes de pompage peuvent grandement faciliter l'exhaure de l'eau. Lorsque la région est suffisamment ventée et que les besoins journaliers en eau ne sont pas très importants, elles pompent l'eau à un coût très avantageux. Moins onéreuses à l'achat que les pompes solaires, elles ne dépendent pas, comme les pompes à moteur, d'un approvisionnement en carburant souvent irrégulier.

Autonome dans son fonctionnement, une éolienne de pompage l'est aussi pour sa maintenance. Une fois installée, l'entretien peut être assuré par un mécanicien doté d'une formation adéquate. La fabrication des éoliennes les plus simples et leur maintien en état de marche favorisent ainsi le développement de l'artisanat d'une région rurale équipée de plusieurs éoliennes.

Un point d'eau muni d'une éolienne de pompage non seulement fournit plus d'eau que s'il est équipé d'une pompe manuelle mais il donne aussi une eau de meilleure qualité. En effet, il n'est pas contaminé par les cordes ou par les puisettes polluées comme les puits ouverts.

Pour les régions où souffle le vent, l'utilisation des éoliennes pour remonter l'eau concurrence avantageusement les autres techniques de pompage. La mise au point de nouveaux modèles et prototypes permet aujourd'hui de disposer de technologies plus opérationnelles et plus fiables.

Cependant toute introduction d'une technique nouvelle a des contraintes. Afin de s'assurer de la pérennité de ces installations, il reste nécessaire d'étudier au préalable les aptitudes du site mais aussi les conditions économiques et sociales de l'implantation. Seule la

conjonction favorable de ces différents critères permet de s'assurer que l'éolienne de pompage est la solution à retenir.

Cet ouvrage a été conçu pour faciliter le travail des techniciens des Etats ou des Organisations Non Gouvernementales qui souhaitent implanter des éoliennes. Ils y trouveront expliqués les éléments théoriques indispensables à connaître pour mener à bien l'étude d'une installation. Les caractéristiques des matériels (éoliennes et pompes) sont détaillées dans la seconde partie tandis que le troisième chapitre facilite le choix de l'éolienne de pompage la mieux adaptée aux objectifs poursuivis. Enfin les leçons à tirer des réalisations, qui sont présentées en dernière partie, permettent d'éviter les écueils déjà rencontrés par d'autres.

# Le vent, source d'énergie

1

	page
<b>Connaître les vents</b>	3
<b>Une répartition inégale</b>	3
Les vents autour de la terre	3
Les variations locales	8
Des irrégularités dans le temps	8
<b>Choisir le meilleur site</b>	10
S'éloigner des obstacles	10
Consulter les relevés météo	11
Calculer la vitesse moyenne	12
<b>Évaluer la vitesse du vent</b>	19
Utiliser un anémomètre	19
Effectuer une campagne de mesures	21
<b>L'énergie éolienne : un peu de théorie</b>	23
La puissance disponible	23

---

<b>La vitesse de rotation des rotors</b>	24
Le rapport d'avance	25
La puissance maximale	25
Le coefficient de performance	25
La solidité	26
<b>L'aérodynamisme</b>	28
Portance et traînée	28
Éoliennes à traînée : les plus simples	29
Éoliennes à portance : les plus performantes	29
<b>Les efforts subis par la structure</b>	31
Efforts statiques : la traînée	31
Efforts quasi-statiques : la force centrifuge	32
Efforts dynamiques : l'irrégularité du vent	32

## CONNAÎTRE LES VENTS

Le vent est une masse d'air en mouvement. Ce mouvement trouve son origine dans les différences de température et de pression de l'atmosphère en divers points du globe. En effet, le soleil chauffe l'air de façon inégale suivant l'inclinaison de ses rayons, la composition des couches d'air et le degré d'absorption de l'énergie solaire par les mers d'une part, les terres d'autre part.

Le vent est donc l'une des manifestations de l'énergie solaire sur la terre. Bien qu'à peine 2 % de l'énergie solaire reçue par la terre soit convertie en énergie éolienne, cela représente un gisement mondial d'environ 1000 milliards de kilowatts-heure par an, ... ce qui nous suffit largement!

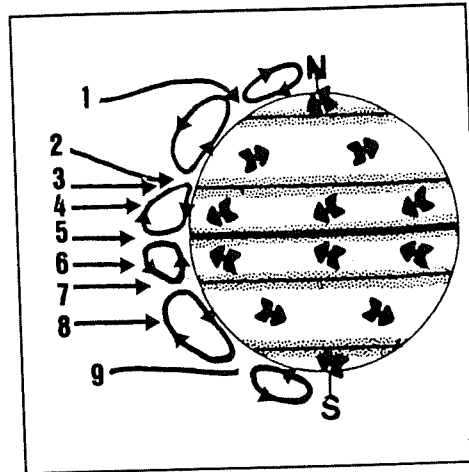
### UNE RÉPARTITION INÉGALE

### LES VENTS AUTOUR DE LA TERRE

De manière globale, les vents tendent à redistribuer la chaleur inégalement absorbée aux divers endroits du globe terrestre (fig.1). Les énormes masses d'air chaud équatorial s'élèvent et se dirigent vers les pôles, tandis que l'air polaire s'affaisse et se dirige vers l'équateur. Cette circulation générale, théorique, est profondément modifiée par la rotation de la terre. Celle-ci conduit à la création de ceintures de vents dominants. Ces vents dominants se déplacent et changent de direction avec les saisons. Ils sont, de plus, affectés par les particularités du relief terrestre telles que les chaînes de montagnes, les calottes glaciaires et les zones de discontinuité terre-mer près des côtes.



Figure 1: la circulation des vents autour de la terre



- 1 Courant polaire d'Est
- 2 Courant tempéré d'Ouest
- 3 Calmes subtropicaux
- 4 Alizés de Nord Est
- 5 Calmes équatoriaux
- 6 Alizés de Sud Est
- 7 Calmes subtropicaux
- 8 Courants tempérés d'Ouest
- 9 Courant polaire d'Est

La figure 2 montre la répartition moyenne annuelle de l'énergie éolienne sur le globe. Les données sont grossières et cette carte ne doit être utilisée qu'avec prudence. On peut remarquer, cependant, que de nombreuses régions du monde possèdent un excellent potentiel énergétique éolien, tout particulièrement les zones côtières. Les régions des grands déserts tropicaux sont, en revanche, assez peu ventées.

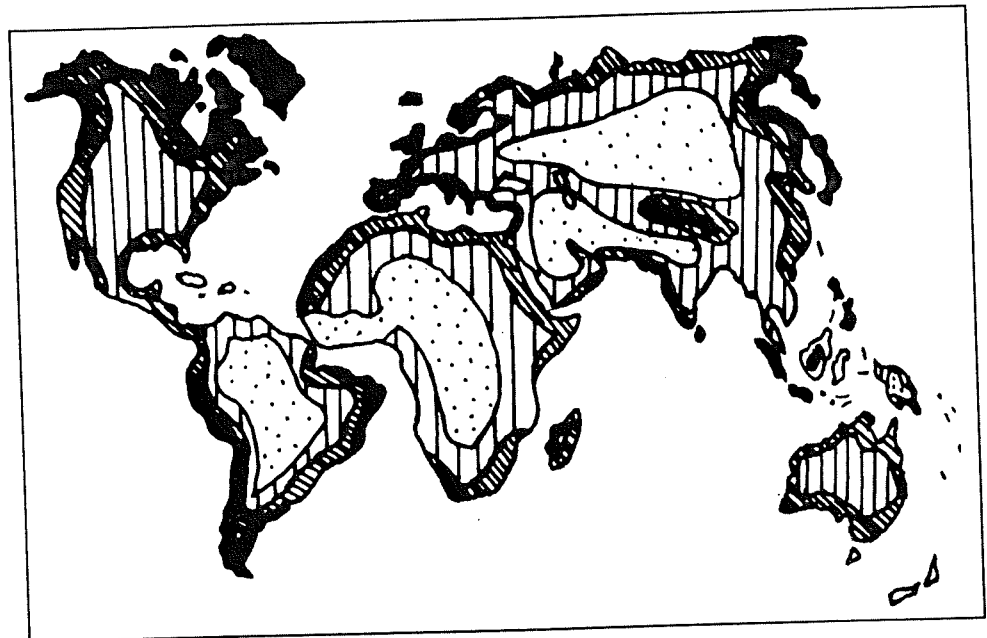


Figure 2: le gisement éolien mondial

Zone très favorable



Zone favorable



Zone peu favorable



Zone défavorable



Figure 3: le gisement éolien en France

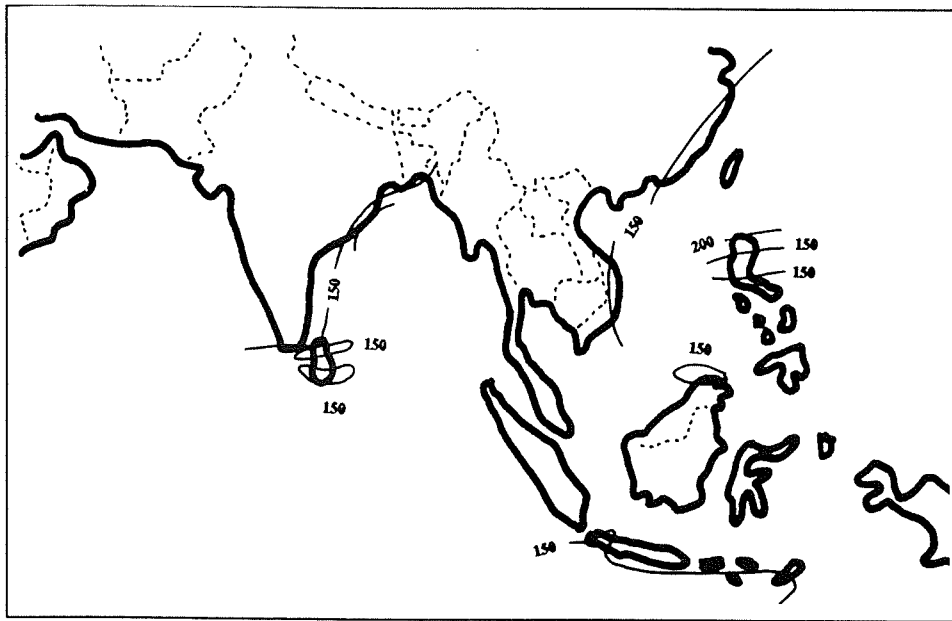
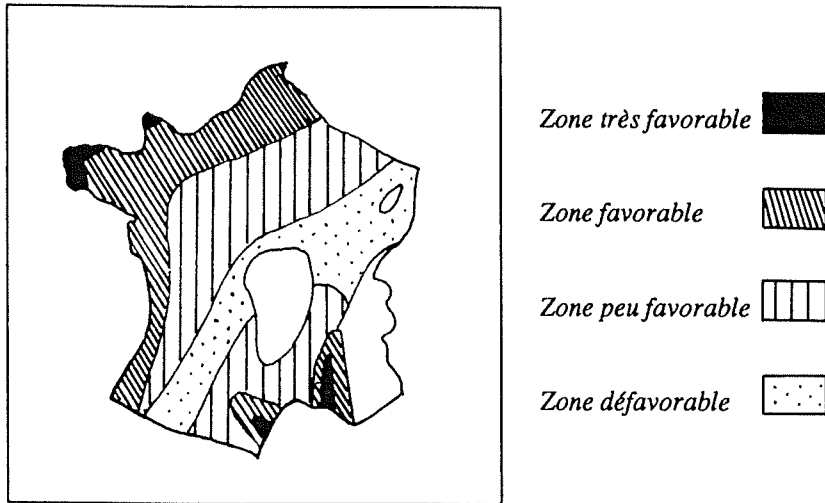


Figure 4: le gisement éolien en Asie  
densité d'énergie éolienne moyenne annuelle ( $W/m^2$ )

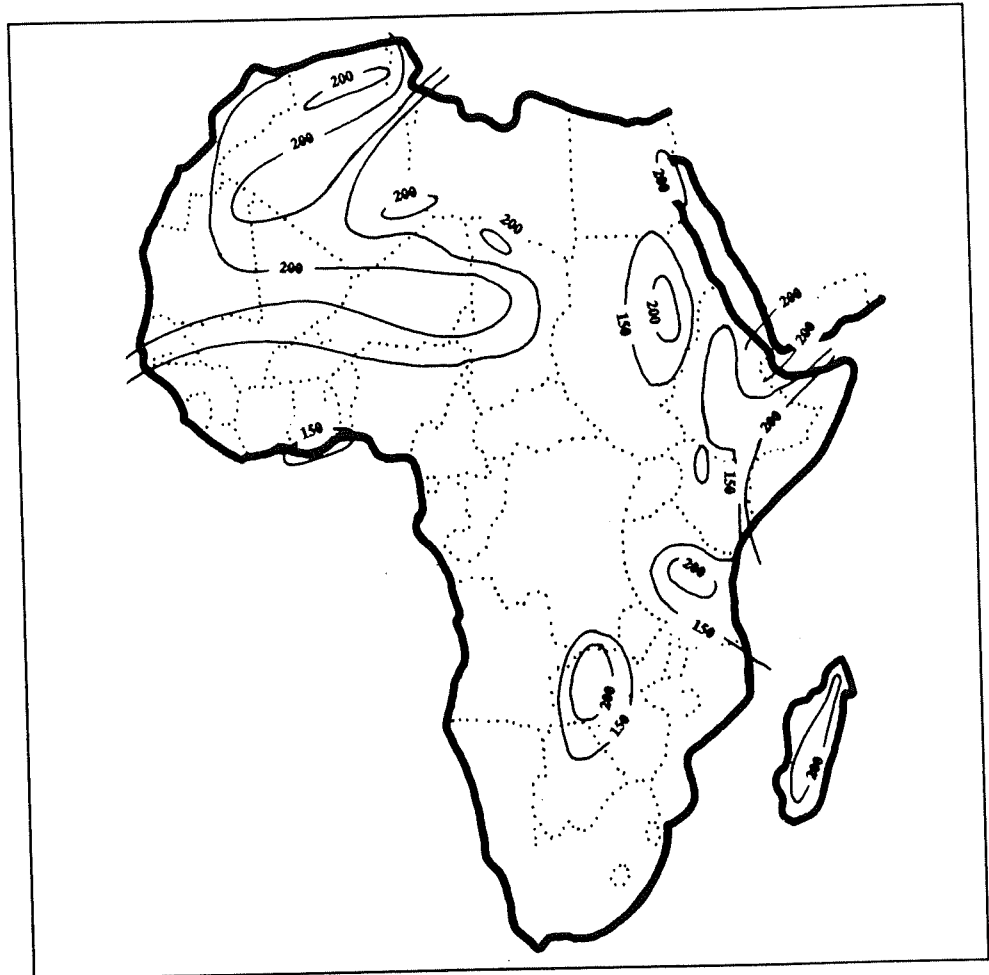


Figure 5: le gisement éolien en Afrique  
densité d'énergie éolienne moyenne annuelle ( $W/m^2$ )



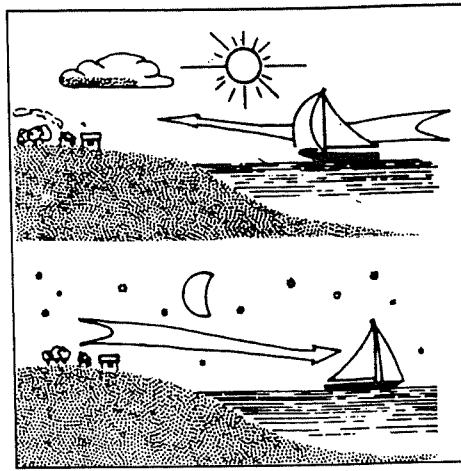
Figure 6: le gisement en Amérique du Sud  
densité d'énergie éolienne moyenne annuelle ( $W/m^2$ )

## LES VARIATIONS LOCALES

Certaines situations locales entraînent presque à coup sûr la formation de vents : bords de mer ou de lac, reliefs.

La mer s'échauffe, le jour, de 2 à 3<sup>0</sup> tandis que la terre, dans le même temps, gagne une dizaine de degrés. L'air au-dessus de la terre s'élève alors et est remplacé par de l'air marin plus froid: c'est la brise de mer. La nuit, la terre se refroidissant plus rapidement que l'eau, le système s'inverse. La brise de mer souffle donc généralement de 10 à 18 heures, et la brise de terre de 21 à 7 heures. Le même mécanisme s'applique aux lacs (fig.7).

Figure 7:  
alternance  
de la brise  
de mer et  
de terre

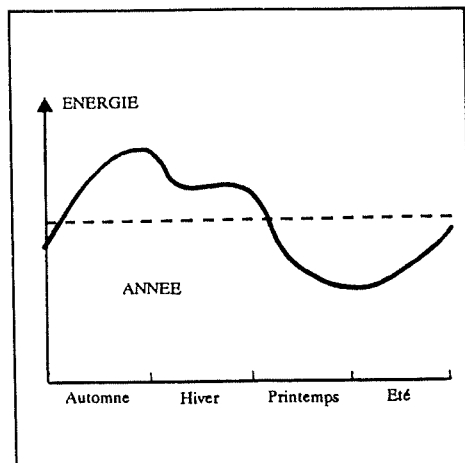


Les vents locaux dûs au relief s'expliquent par un échauffement plus rapide des pentes du relief que de l'air de la vallée. Il s'ensuit une alternance quotidienne : vents montant le jour et descendant la nuit.

## DES IRRÉGULARITÉS DANS LE TEMPS

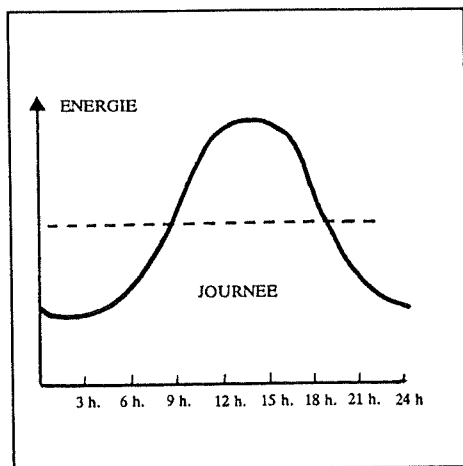
Sur des périodes importantes, de l'ordre de l'année, l'énergie éolienne est pratiquement constante : il n'existe pas d'année peu ou très venteuse, et ceci à 20% près. Par contre l'énergie disponible varie au cours de l'année. On peut voir, en considérant un site caractéristique comme Lille (fig.8), que l'énergie moyenne durant le semestre d'hiver est, en France, 1,5 fois celle du semestre d'été. Ainsi durant le mois de janvier on récupère deux fois plus d'énergie que durant le mois de juin.

**Figure 8:**  
répartition  
annuelle de  
l'énergie  
fournie par  
le vent  
(Lille,  
France)



En revanche, à l'échelle du mois et du jour, l'irrégularité est très importante. On peut cependant dégager des grandes tendances (fig.9).

**Figure 9:**  
répartition  
journalière  
de l'énergie  
fournie par le  
vent



Entre 12 et 16 heures, il y a trois fois plus d'énergie éolienne disponible qu'entre minuit et 3 heures du matin : ceci est facilement compréhensible si on se souvient de l'origine solaire du vent.

De même, en zone tropicale et subtropicale côtière, le vent peut être presque nul la nuit et croître au cours de la matinée pour se calmer progressivement en fin de journée.

Enfin, le vent présente des variations à l'échelle de la minute, les rafales, et de la seconde, les turbulences dues à l'effet de sol.

Les variations au cours du temps du régime du vent à l'échelle de la journée dépendent très fortement des conditions locales. Cette irrégularité temporelle peut nécessiter, pour une installation éolienne, suivant les cas, un mécanisme de régulation (pour encaisser les variations à courte période) et une installation de stockage. De plus, l'éolienne sera soumise à des efforts qui varient rapidement, il faudra donc en tenir compte pour le dimensionnement de la structure.

## ■ CHOISIR LE MEILLEUR SITE

Le choix du site conditionne très fortement les performances d'une éolienne étant données les fortes variations locales que l'on peut enregistrer. La position de l'éolienne sur un site doit être soigneusement choisie, de manière à récupérer le maximum d'énergie qu'offre le vent.

## □ S'ÉLOIGNER DES OBSTACLES

Les obstacles (habitations, arbres, ruptures de relief) freinent beaucoup le vent et il est nécessaire d'éloigner au maximum le pylône supportant l'éolienne des zones tourbillonnaires créées par ces obstacles.

En rase campagne, on veillera à se dégager des obstacles en plaçant l'éolienne à une distance égale de 5 à 8 fois la hauteur de l'obstacle, dans la direction des vents dominants.

Certaines formes de relief sont toutefois favorables à une accélération des filets d'air : colline à pente faible, rétrécissement de vallée. Lorsque ces accidents de terrain sont orientés dans le sens des vents dominants, ils constituent des sites de prédilection pour une éolienne.

Par contre, une colline abrupte ou une falaise constituent plutôt une gêne par les turbulences qu'elles créent.

Sur un site donné, la vitesse du vent augmente avec l'altitude, le sol freinant le vent par frottement. Cette variation est importante dans les endroits où le vent est faible. Le freinage du vent dépend de la rugosité moyenne du sol.

En prenant comme référence un site en rase campagne à 10 mètres de hauteur, on récupérera environ:

- 4 fois plus d'énergie au-dessus de la mer, à la même hauteur
- 7 fois moins d'énergie au-dessus d'une ville à la même hauteur.

Toujours en rase campagne par rapport à 10 m de hauteur, on récupérera :

- 2 fois moins d'énergie à 5 m du sol,
- 1,8 fois plus d'énergie à 20 m du sol.

A 5 m de hauteur, le vent est deux fois plus fort en terrain dégagé qu'en zone de taillis ou de broussailles. La hauteur idéale sera le résultat d'un compromis entre le surplus d'énergie récupérée et les inconvénients (d'ordre économique) d'une augmentation de la taille du pylône de l'éolienne.

## CONSULTER LES RELEVÉS MÉTÉO

Ces différentes remarques permettent de choisir l'endroit précis le plus propice à l'installation d'une éolienne. Au niveau de la zone en général, on peut souvent obtenir de la part des services météorologiques des relevés très précieux sur le gisement éolien. Les plus importants de ces relevés sont :

- **le relevé quotidien** : plusieurs fois par jour, toutes les 3 ou 6 heures, vitesse et direction du vent sont relevées. Les résultats portés sur un tableau mensuel permettent d'apprécier les variations du vent au cours de la journée.
- **le tableau des fréquences moyennes du vent (tab.1)** dressé à partir des relevés quotidiens. Ils indiquent, pour chaque plage de vitesse, la fréquence des vents. Ces tableaux sont les plus utiles : ils donnent une idée des périodes de fonctionnement de l'éolienne et de la puissance qu'elle peut fournir.

Vitesse du vent en m/s	<3	3	4	5	6	7	8	9	10
Janvier	28	14	14	18	12	7	3	1	2
Février	16	12	17	20	16	10	6	4	2
Mars	10	11	14	22	18	11	8	4	6
Avril	12	8	13	16	15	15	8	4	6

Tableau 1: fréquence moyenne des vents en % des mesures effectuées (Thiès, Sénégal)

Le tableau se lit de la façon suivante: à un moment quelconque du mois de février, on a 16% de chances d'observer un vent dont la vitesse est comprise entre 6 et 7 m/s.



Les tableaux de fréquence moyenne permettent aussi de repérer :

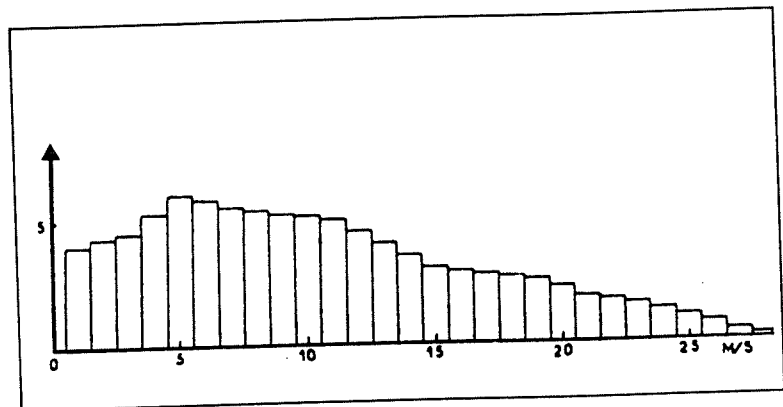
- les périodes de calme : il s'agit des périodes sans vent qu'il faut estimer pour pouvoir prévoir la capacité de stockage nécessaire,
- Le vent maximal : c'est une donnée importante pour déterminer le type de support et les dispositifs de sécurité de l'éolienne à mettre en place.

## ▬ CALCULER LA VITESSE MOYENNE

Avec le tableau des fréquences moyennes classées par vitesse de vent, on est en présence de deux paramètres : la vitesse du vent ( $v$ ) et le temps. Ce dernier se déduit directement des fréquences : lorsque les relevés sont effectués toutes les 3 heures, chaque observation est supposée représenter la valeur moyenne du vent au cours de ces 3 heures de temps ce qui, portant sur un très grand nombre d'observations, se révèle être une moyenne statistique relativement juste.

On peut alors tracer le diagramme annuel (fig. 10 et 11) qui donne pour chaque vitesse de vent, la durée totale (le nombre d'heures) pendant laquelle cette vitesse a été enregistrée. A partir des vitesses, on déduit, par une formule sur laquelle nous reviendrons plus loin, les puissances disponibles.

**Figure 10:**  
répartition  
des vitesses  
de vent au  
mont  
Ventoux  
(France)  
(N en % du  
temps - Vn  
10 m/s)



Différentes considérations, explicitées plus loin, limitent la récupération de cette énergie : (fig.12)

- la vitesse de démarrage : vitesse à laquelle la machine commence à fournir de l'énergie,

- la vitesse nominale : vitesse à partir de laquelle la puissance de l'éolienne est maintenue constante par la régulation,
- la vitesse maximale : vitesse à laquelle on arrête le fonctionnement de l'éolienne par souci de sécurité.

Figure 11:  
répartition  
des vitesses  
de vent à  
Châteaudun  
(France)  
(N en % du  
temps -  $V_n$   
4,5 m/s)

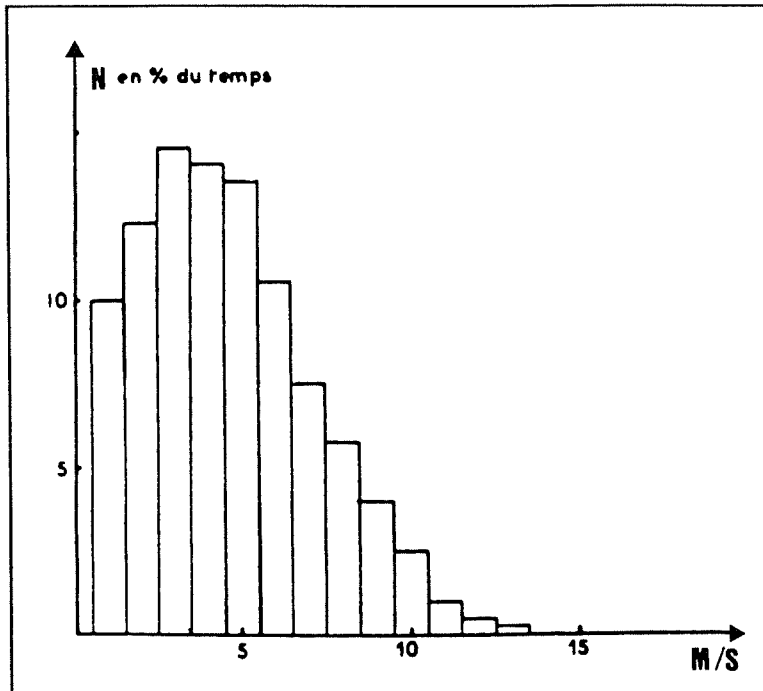
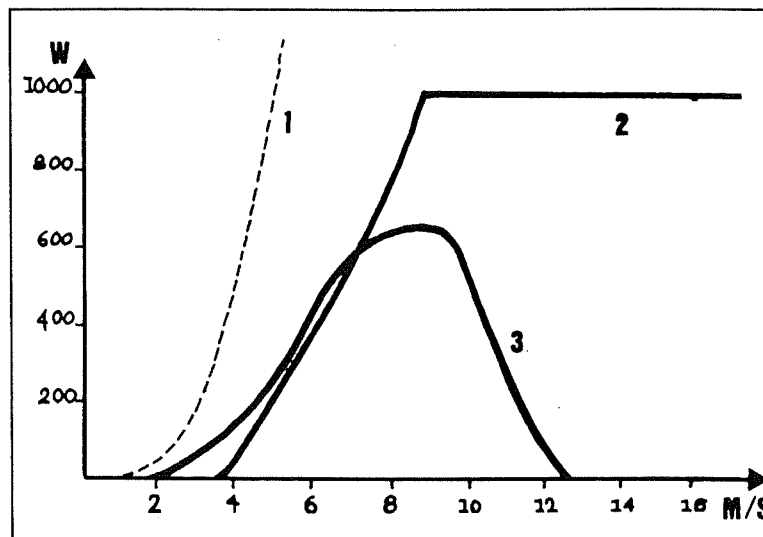


Figure 12:  
récupération  
de l'énergie  
par les  
éoliennes  
en fonction  
de la vitesse  
du vent  
1 Maximum  
théorique  
selon Betz  
2 Eolienne  
rapide  
3 Eolienne  
multipale



Les calculs de puissance et d'énergie disponible se fondent sur la notion de "vitesse moyenne du vent", notion très floue dont les résultats varient avec le type de calcul et le mode d'utilisation.

Nous verrons que dans le calcul de l'énergie fournie par le vent, la vitesse du vent est élevée au cube. Lorsque la vitesse du vent double, l'énergie fournie est donc multipliée par huit. La moyenne des vitesses du vent est donc très différente, et inférieure, à la moyenne des puissances fournies. Par exemple:

Un vent de 1 m/s fournit une puissance de:  $1^3 \times X = X$ .

Un vent de 2 m/s fournit une puissance de:  $2^3 \times X = 8X$ .

La vitesse moyenne  $\frac{1+2}{2} = 1,5$  fournirait une puissance de:

$$1,5^3 \times X = 3,4X,$$

très différente de la puissance moyenne  $\frac{X+8X}{2} = 4,5X$ .

Donc le calcul d'une moyenne arithmétique de tous les relevés effectués sur une période conduit à sous-estimer l'énergie disponible. De plus, tous les vents ne sont pas utilisables par une éolienne ; nous verrons que pour la plupart des éoliennes classiques, les vents utilisés sont de 3 à 7-8 m/s.

Pour tenir compte de ces éléments, il est préférable d'utiliser des méthodes statistiques telle que l'établissement de la courbe de fréquence des vents selon la distribution de Weibull. On en déduit un temps probable de fonctionnement et l'estimation de l'énergie fournie pour un intervalle de vitesse de vent (par exemple entre 3 et 7,5 m/s). Finalement on en déduit la vitesse moyenne sur l'année pour ces conditions.

Pour un même site, trois ou quatre vitesses moyennes de vent peuvent être annoncées... et être exactes, car elles ne proviendront pas du même calcul.

**Retenez que :**

- l'énergie disponible est fonction de la vitesse du vent au cube,
- les vents trop faibles et trop forts sont inutilisables par une éolienne,
- une éolienne ne fonctionne pas 24h sur 24h.

Afin d'évaluer l'intérêt des méthodes statistiques, nous vous proposons un exemple pratique de calcul de la distribution de Weibull pour la station de Rosso, en Mauritanie.

**Calcul de la vitesse moyenne du vent et de l'énergie récupérable à Rosso en Mauritanie.**

Pour décrire le comportement aléatoire des phénomènes climatiques (vent, pluie, débits des rivières, ensoleillement), des méthodes mathématiques (modèles) ont été mises au point en étudiant, a posteriori, les caractéristiques statistiques de ces phénomènes naturels. Les équations, qui les décrivent à partir de phénomènes saisonniers et géographiques, permettent d'établir des caractéristiques "moyennes" plus fiables que les simples observations du phénomène. Elles permettent aussi d'effectuer des prévisions. La méthode de Weibull s'applique particulièrement à la ressource éolienne

\*ASECNA :  
Agence pour  
la sécurité de  
la navigation  
aérienne en  
Afrique et à  
Madagascar

Dans le cas présent, les relevés trihoraires de vent sont fournis par l'ASECNA<sup>o</sup> de Nouakchott pour la période 1980-1986.

Ils permettent d'établir un tableau des fréquences observées :

Tableau 2:  
fréquences  
observées à  
Rosso  
(Mauritanie)

vitesse	V > 3m/s	V > 4m/s	V > 7m/s	3 < V < 7
J	0,81	0,63	0,20	0,61
F	0,80	0,64	0,20	0,60
M	0,75	0,62	0,26	0,49
A	0,835	0,74	0,22	0,61
M	0,83	0,71	0,23	0,60
J	0,71	0,49	0,16	0,55
J	0,61	0,47	0,16	0,45
O	0,55	0,35	0,11	0,44
S	0,52	0,39	0,09	0,43
O	0,56	0,40	0,07	0,49
N	0,55	0,37	0,11	0,44
D	0,70	0,58	0,20	0,50

Ainsi en janvier, 81% des vents sont supérieurs à 3 m/s, contre seulement 52% en septembre. On peut dire que la probabilité d'avoir un vent supérieur à 3m/s est de 0,81 en janvier.

En appliquant la distribution de Weibull à cette répartition des vitesses de vent, la probabilité pour que  $v$ , vitesse du vent, soit supérieure à une vitesse  $V$  donnée,

$$p(v > V) = \exp \left[ - \left( \frac{V}{b} \right)^a \right] \quad (1)$$

*a et b sont 2 coefficients caractéristiques du site, a : paramètre de "forme", b: paramètre de vitesse (analogue à la vitesse moyenne). a et b sont calculés à partir du tableau des fréquences précédent. Ainsi pour le mois de Janvier, les deux équations :*

$$p(v > 3) = \exp \left[ - \left( \frac{V}{b} \right)^a \right] = 0,81$$

$$p(v > 4) = \exp \left[ - \left( \frac{V}{b} \right)^a \right] = 0,63$$

*permettent de calculer a et b. On obtient :*

$$a = 2,73$$

$$b = 5,31$$

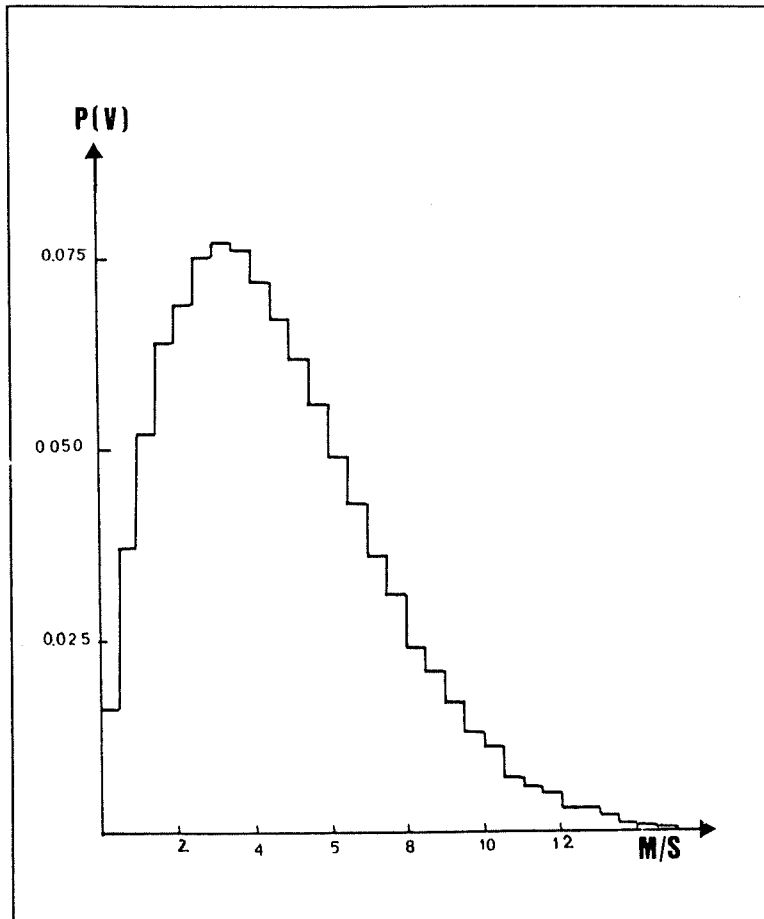
*On obtient donc un tableau des coefficients a et b sur l'année*

**Tableau 3:**  
coefficients  
a et b sur  
l'année

	J	F	M	A	M	J	J
a	2,73	2,41	1,76	1,78	2,11	2,55	1,47
b	5,31	5,59	4,24	7,25	6,65	4,57	4,24
	A	S	O	N	D	Année	
a	1,95	1,27	1,59	1,77	1,47	1,77	
b	3,90	4,19	4,23	5,01	6,05	5,195	

*Connaissant a et b, on peut représenter par le graphique suivant la distribution de Weibull des fréquences (fig.13).*

Figure 13:  
distribution  
des vitesses  
de vent



Distribution de Weibull à deux paramètres :

$$p(v > \bar{V}) = \exp \left[ - \left( \frac{V}{5,195} \right)^{1,77} \right]$$

Calcul des heures de fonctionnement et de l'énergie récupérable

L'énergie se définit par :

$$\begin{aligned} \text{Energie} &= \text{Puissance} \times \text{temps} \\ &= 0,1 \cdot V^3 \cdot t / \text{m}^2 \text{ de rotor (1) pour une éolienne multipale} \\ V &= \text{vitesse moyenne en m/s} \\ t &= \text{temps en h} \\ \text{Energie en Wh} \end{aligned}$$

Pour appliquer la distribution de Weibull, on choisit des intervalles de vitesse de vent ( $v_i$ ) écartés de 0,5 m/s dans cet exemple. Sur cet intervalle, sont calculés la vitesse moyenne théorique ( $V_{mi}$  : moyenne arithmétique des cubes) et les probabilités correspondantes  $p(V_i)$ .

Tableau 4:  
calculs  
intermédiaires

pour $v_i =$	$p(v_i) =$	$V_{mi} =$	$(V_{mi})^3 \cdot [p(v_{i+1}) - p(v_i)]$
3	0,685		2,69
3,5	0,608	3,27	4,07
4	0,532	3,77	5,57
4,5	0,460	4,26	7,24
5	0,393	4,763	9,03
5,5	0,331	5,262	10,71
6	0,275	5,761	12,02
6,5	0,226	6,26	13,28
7	0,183	6,76	13,70
7,5m/s	0,147	7,27	= 64,61

Le nombre d'heures de fonctionnement entre 3 et 7,5 m/s est égal à :

$$8760 \text{ heures/an} \times [p(7,5) - p(3)] = 8760 \times 0,538 = 4712 \text{ heures}$$

L'énergie récupérable est :

$$0,1 \times (V_m^3 \times 0,538) \times 8760 = 56,6 \text{ kwh/an par } m^2 \text{ de rotor}$$

$$\text{avec } V_m^3 \times 0,538 = 64,61.$$

Calcul de la vitesse moyenne annuelle :

D'après (1) :

- pour un fonctionnement effectif de 4712 h/an, soit 12,4 h/jour,

$$V_m^3 = \frac{56600}{0,1 \times 4712}, \text{ soit } V_m = 4,93 \text{ m/s.}$$

- pour l'ensemble de l'année (8760 h),

$$V_m^3 = \frac{56600}{0,1 \times 8760}, \text{ soit } V_m = 4,01 \text{ m/s.}$$

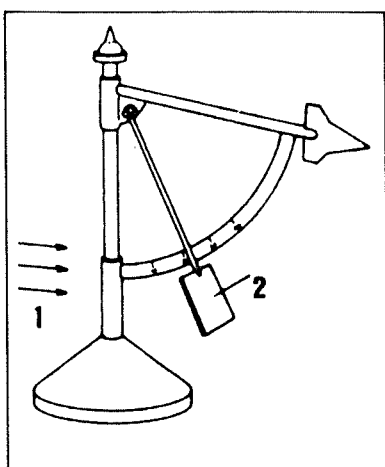
## ÉVALUER LA VITESSE DU VENT

### UTILISER UN ANÉMOMÈTRE

#### Différents principes de fonctionnement

Pour évaluer la vitesse du vent on peut mesurer :

Figure 14:  
anémomètre  
à pression  
1 vent  
2 palette



- la pression (proportionnelle au carré de la vitesse) avec un anémomètre à plaque ou à tube (fig.14),

- la vitesse de rotation d'une petite éolienne (proportionnelle à la vitesse du vent) avec un anémomètre à rotation : c'est la méthode la plus simple et la plus fiable.

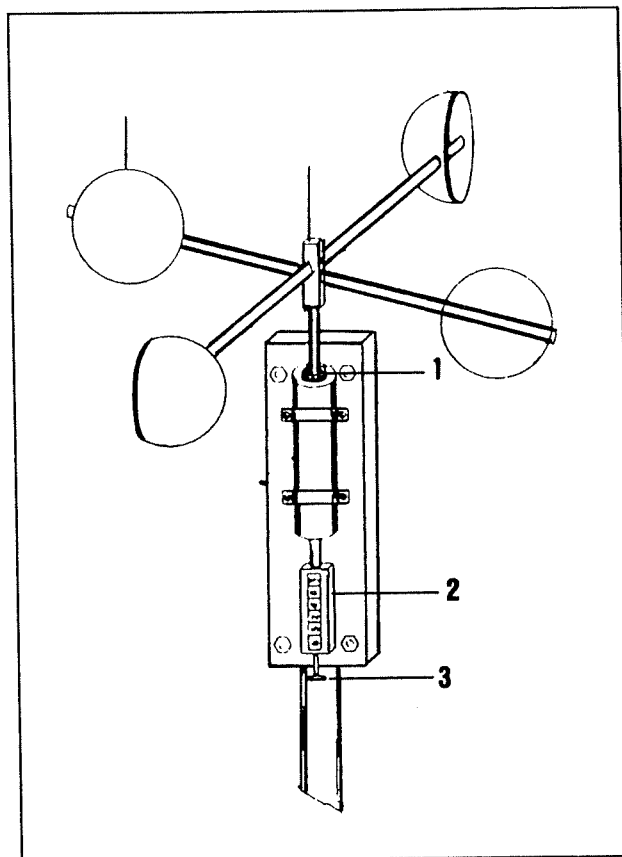
Le plus connu est l'anémomètre à coupelles où la différence de poussée sur les faces concave et convexe des coupelles entraîne un mouvement de rotation.

En mesurant cette vitesse de rotation, on obtient la vitesse instantanée. Une vitesse moyenne est obtenue simplement en totalisant le nombre de tours effectués pendant un laps de temps donné. De plus, son axe de rotation étant vertical, cet anémomètre permet de mesurer le vent dans toutes les directions sans dispositif d'orientation. Il peut entraîner un compteur, de type compteur de vélo, ou enclencher un contact à chaque rotation (fig.15).

On place parfois une girouette pour connaître la direction des vents : dans la plupart des cas, cette indication a peu d'intérêt. La direction des vents dominants est bien plus facilement connue en se renseignant auprès des gens qui habitent le lieu.



**Figure 15:**  
**anémomètre**  
**totalisateur**  
**à fabriquer**  
**soi-même**  
**(Arusha)**  
 1 Roulement  
 à bille  
 2 Compteur  
 à 6 chiffres  
 3 Remise à  
 zéro



Certains anémomètres sont à enregistrement :

- mécanique : la rotation du rotor à coupelles entraîne le déplacement d'un stylet traçant une courbe sur un rouleau de papier mû par un mécanisme d'horlogerie,
- électronique : un dispositif électronique permet de transformer les indications du rotor en impulsions enregistrées ensuite sur bandes magnétiques.

Ces données peuvent être exploitées sur ordinateur ou micro-ordinateur.

#### Les principaux fournisseurs

Mécaniques ou électroniques, les anémomètres enregistreurs sont assez coûteux (plus de 10 000 FF), alors que les appareils à lecture directe valent environ 1 000 FF.

Voici les adresses de quelques fournisseurs d'anémomètres en France :

**STRC** 4 allée Harvey  
92350 Le Plessis Robin

**Vedeo** 55 rue St Nicolas  
17005 La Rochelle

**Plastimo** 15 rue de l'ingénieur Verrière  
56104 Lorinet

Au Danemark :  
**ED Service Center**  
Ostergade 38  
DK-4000 Roskilde  
DANEMARK  
Tél : 02 36 15 15

## EFFECTUER UNE CAMPAGNE DE MESURES

Une campagne d'évaluation du gisement éolien doit s'étaler au minimum sur une année entière. Pour que les résultats soient significatifs il est nécessaire de faire plusieurs relevés par jour (8), toujours aux mêmes heures.

A chaque relevé, il est prudent d'effectuer une série de mesures (5 ou 10) sur une période de quelques minutes et de prendre la valeur moyenne des résultats comme valeur de l'observation. L'Organisation Météorologique Mondiale (OMM) conseille des périodes de 10 minutes. Il est nécessaire de veiller également à ce que l'appareil soit situé à la même hauteur que le rotor de la future éolienne (4 à 6 m pour une petite éolienne de pompage). Consulter également les données qualitatives de l'échelle de Beaufort (fig.16).

Dans tous les cas, avant de placer un anémomètre, il faut se renseigner auprès des habitants. Leur expérience vaut souvent bien plus que des mesures inutilisables et permet de trouver un bon site à partir des seules données qualitatives.

	Echelle Beaufort	m./s.	Désignation	Caractéristiques
vent improductif	2	1,8-3,3	Léger	à peine perceptible sur le visage
	3	3,4-5,2	Faible	les feuilles bougent légèrement
	4	5,3-7,4	Modéré	les petites branches bougent
vent productif	5	7,5-9,8	Frais	donne une sensation désagréable; on entend le vent siffler
	6	9,9-12,4	Fort	il faut élever la voix pour s'entendre; arbres courbés
	7	12,5-15,2	Très fort	feuilles arrachées
	8	15,3-18,2	Coup de vent	branches arrachées
	9	18,3-21,5	Fort coup de vent	le vent hurle; arbres abattus
	10	21,6-25,1	Tempête	le vent hurle; arbres abattus
	11	25,2-29	Violente tempête	maisons endommagées
	12	29 et plus	Ouragan	

Figure 16: échelle de Beaufort

## L'ÉNERGIE ÉOLIENNE : UN PEU DE THÉORIE

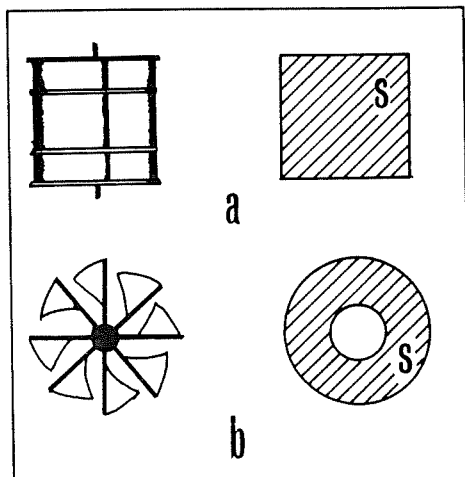
### LA PUISSANCE DISPONIBLE

Une éolienne est une machine qui transforme l'énergie d'une masse d'air en mouvement, en énergie mécanique. **La puissance disponible est proportionnelle au cube de la vitesse du vent.** Ceci signifie qu'un doublement de la vitesse du vent multiplie par huit la puissance disponible ! On peut se reporter à la démonstration mathématique qui figure dans l'encadré suivant.

La puissance disponible est simplement proportionnelle en revanche, à la surface balayée. Cette surface ( $S$ ) est celle engendrée par la partie tournante (le rotor) au cours d'une rotation complète (fig.17). Ainsi, lorsque l'on double le diamètre du rotor, on multiplie par quatre la puissance.

Figure 17:  
*a: surface  
balayée par  
une éolienne  
Savonius*

*b: surface  
balayée  
par une  
multipale  
à axe  
horizontal*



L'énergie éolienne est l'énergie cinétique du vent qui traverse le rotor.  
 Cette énergie cinétique a pour expression générale :

$$E = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2$$

où M est la masse d'air en kg  
 V est la vitesse en m/s  
 E est l'énergie en J

Si l'on prend : m = masse d'air traversant le rotor en 1 seconde, la puissance est :

$$P = \frac{1}{2} \cdot m \cdot V^2$$

où  $m = S \cdot V \cdot \rho$   
 S est la surface du rotor en m<sup>2</sup>  
 ρ est la masse volumique de l'air = 1,25 kg/m<sup>3</sup>

$$\text{Donc : } P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3$$

Cette puissance n'est fonction, théoriquement, ni de la forme, ni du nombre de pales. En pratique, chaque type de rotor est affecté d'un coefficient de performance, comme nous allons le voir plus loin, car il y a différents types de pertes et toute l'énergie du vent ne peut être récupérée.

## LA VITESSE DE ROTATION DES ROTORS

La vitesse de rotation d'une éolienne est fonction de la vitesse du vent jusqu'à ce que les dispositifs de sécurité entrent en action. Toutefois, pour un vent donné, des éoliennes de type différent tourneront à une vitesse différente suivant la résistance qu'elles opposent à la rotation.

De plus, pour un type de rotor donné, plus le rotor est grand, plus l'éolienne tourne lentement.

La vitesse de rotation dépend donc de trois facteurs qui sont liés par la relation suivante :

$$\text{vitesse de rotation} = \omega = \frac{V \cdot X}{R}$$

avec ω : vitesse de rotation en radians/seconde  
 (1 rd/s = 9,5 tr/min)

$V$  : vitesse du vent (m/s)

$\bar{R}$  : rayon maximal du rotor (m)

$X$  : rapport d'avance, caractéristique de la forme de l'éolienne.

## LE RAPPORT D'AVANCE

Il représente le rapport entre la vitesse du bord extrême de la pale et la vitesse du vent. Ce rapport varie de 1 à 10 suivant le type d'éolienne : certaines éoliennes ont donc une vitesse en bout de pale dix fois supérieure à celle du vent !

Pour chaque type d'éolienne, il existe une vitesse de rotation optimale (et donc un rapport d'avance optimal) pour laquelle la puissance recueillie est maximale.

$$\text{Rapport d'avance} = X = \frac{\bar{R}\omega}{V}$$

## LA PUISSANCE MAXIMALE

Elle s'écrit (P) en reprenant la formule vue plus haut :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \cdot C_p$$

où  $S$  est la surface du rotor en  $m^2$   
 $V$  est la vitesse du vent en m/s  
 $C_p$  est le coefficient de performance de l'éolienne.

## LE COEFFICIENT DE PERFORMANCE

Il varie de 0,15 à 0,70 suivant le type d'éolienne (donc, en particulier, suivant le rapport d'avance  $X$  avec lequel elle tourne).

## LA SOLIDITÉ

Ce facteur influe aussi sur les performances d'une éolienne. Il s'agit d'un nombre noté  $\sigma$  donnant le rapport entre la surface active de l'éolienne et la surface balayée (S).

Par surface active, on entend la surface des éléments (pales ou autres) placés dans le vent pour en transformer l'énergie.

$$\text{solidité} = \sigma = \frac{\text{surface active du rotor}}{\text{surface balayée}}$$

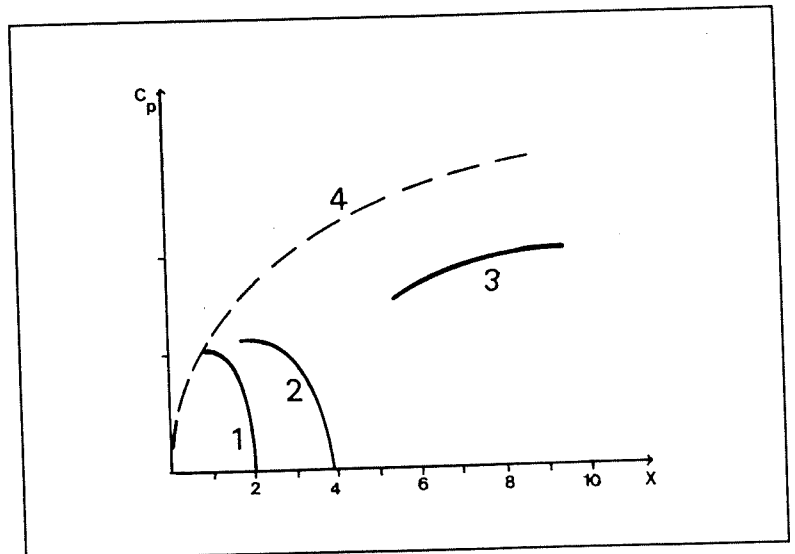
Une éolienne très solide a donc une grande surface de tôle (ou autre) offerte au vent : c'est à dire un grand nombre de pales et/ou une grande surface réelle de pales. Son rapport d'avance X est petit, elle tourne lentement par rapport au vent.

N.B. La "solidité" n'est pas en rapport direct avec la robustesse.

Une éolienne "solide" est donc moins sensible aux efforts centrifuges dus à la rotation, mais plus exposée au vent à l'arrêt, le vent exerçant sa poussée sur une surface importante.

On peut, dès lors, faire une comparaison entre les différents types d'éoliennes sur la base des relations entre coefficients de performance ( $C_p$ ), rapport d'avance (X) et solidité ( $\sigma$ ). Grossièrement, plus une éolienne est élancée (solidité faible), plus elle tourne vite (x) et plus son rendement est élevé (fig.18).

**Figure 18:**  
coefficients de performance des éoliennes  
1 éoliennes multipales  
2 éoliennes tripales  
3 hélice tripale  
4 courbe théorique



Il est habituel de classer les éoliennes en :

- **éoliennes lentes** : rapport d'avance inférieur à 2,5; solidité supérieure à 0,5,
- **éoliennes rapides** : rapport d'avance supérieur à 3,5 ; solidité inférieure à 0,3.

**Tableau 5:**  
caractéristiques  
techniques  
des éoliennes  
lentes et  
rapides

Caractéristiques	Eoliennes lentes	Eoliennes rapides
solidité = surface pales surface balayée	0,3 à 0,9	0,1 à 0,25
rapport d'avance $X = \text{vitesse bout}$ de pales/vitesse de vent	0,8 à 2	4 à 8
nombre de pales	4 à 24	2 à 3
$C_p$ , coeff. de performance	0,2 à 0,3	0,3 à 0,4
vent minimal	2 - 3 m/s	4 - 5 m/s
vent nominal	5 - 7 m/s	7 - 10 m/s
vent maximal	10 m/s	15 - 20 m/s
Puissance disponible (avec $D = \text{diamètre du rotor}$ )	$0,1 \cdot D^2 \cdot V^3$	$0,15 \cdot D^2 \cdot V^3$
rendement	faible	élevé
contraintes	effort de poussée du vent élevé	contraintes mécaniques élevées
matériaux	beaucoup de matière dans le vent, donc poids de structure élevé	structure utilisant des matériaux nouveaux



## L'AÉRODYNAMISME

Les rotors présentent une grande diversité de formes et de dimensions mais une distinction fondamentale peut être effectuée à partir des considérations de portance et de traînée.

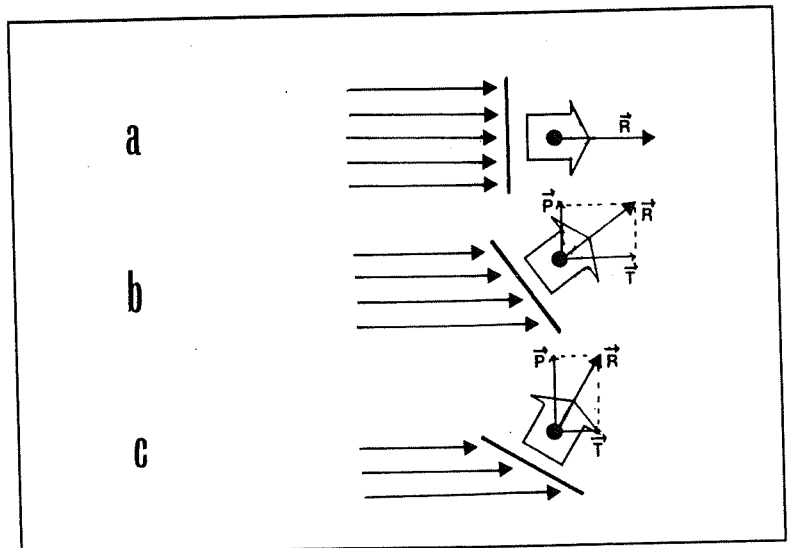
### PORTANCE ET TRAÎNÉE

Si l'on place un objet dans le vent, il est soumis à une poussée. On peut projeter cette force parallèlement ou perpendiculairement à la direction du vent. La projection de la poussée aérodynamique parallèlement au vent s'appelle la traînée (force qui résiste au vent dans le cas d'une voiture, le "Cx"), l'autre projection caractérise la portance, qui tend à soulever l'objet.

A titre d'exemple, les caravelles de Christophe Colomb utilisaient la force de traînée et ne pouvaient donc se déplacer que dans le même sens que le vent et à une vitesse inférieure à celui-ci. Les dériveurs et les voiliers modernes dévient le vent et utilisent la force de portance : ils peuvent se déplacer dans toutes les directions, sauf face au vent, et ceci à une vitesse pouvant être plus grande que celle du vent.

Ces deux forces sont proportionnelles au carré de la vitesse du vent ; c'est à dire que quand la vitesse du vent double, traînée et portance sont multipliées par quatre (fig.19).

**Figure 19:**  
portance et traînée d'un objet dans le vent  
a: portance nulle  
b: portance et traînée moyenne  
c: portance élevée, traînée faible



La force résultante  $\bar{R}$  qui s'applique sur l'objet dans le vent se décompose en une portance  $P$  (perpendiculaire au vent) et une traînée  $T$  (parallèle au vent).

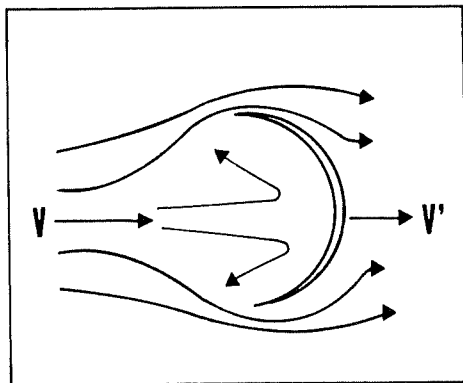
## ÉOLIENNES A TRAÎNÉE: LES PLUS SIMPLES

Les éoliennes les plus simples sont des systèmes mus par la traînée, en fait par la pression du vent sur leur surface. Pour obtenir une machine tournante, il suffit d'utiliser des formes ayant des traînées différentes suivant l'angle du vent et placer ces formes à égale distance d'un arbre de rotation vertical.

C'est le cas de l'anémomètre à coupelles que nous avons vu précédemment : pendant qu'une coupelle présente sa face convexe (qui "traîne" moins) l'autre présente sa face concave où le vent s'engouffre, donc qui traîne beaucoup (fig.19).

Le déséquilibre dans ces deux forces entraîne la rotation : ce sont des éoliennes à traînée différentielle.

Figure 20:  
machine  
élémentaire  
à traînée



*Lignes de courant du vent  
autour d'une aube*

*V = vitesse du vent*

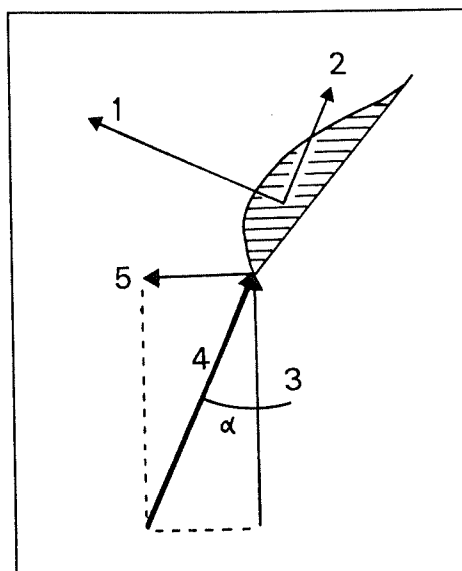
*V' = vitesse de l'objet en  
mouvement*

*V' < V*

## ÉOLIENNES A PORTANCE : LES PLUS PERFORMANTES

L'éolienne à portance est beaucoup plus efficace que l'éolienne à traînée. Prenons un morceau de pale d'une hélice : le vent qui s'applique est la composition géométrique du vent apparent que crée l'hélice en tournant ( $Rw$ ), et de la vitesse du vent naturel ( $V$ ), ce vent, appelé relatif (relatif au morceau de pale que nous avons pris), fait une incidence et induit une portance et une traînée (fig.21).

Figure 21:  
portance et  
traînée sur  
un profil en  
mouvement



- 1 Portance
- 2 Traînée
- 3 Vent réel
- 4 Vent relatif
- 5 Déplacement du profil

La portance étant dirigée vers l'avant du profil, elle tend à faire tourner l'hélice normalement autour de son axe horizontal. La traînée dirigée vers l'arrière est une force inutile, compensée par la réaction du support de l'éolienne. On voit donc que les perfor-

mances seront d'autant plus grandes que le rapport portance/traînée sera élevé. Ceci signifie un rapport d'avance  $X$  élevé (vitesse de rotation élevée), un profilage et un état de surface des pales excellents.

Les profils aérodynamiques ont des formes spéciales, calculées puis expérimentées, qui permettent d'obtenir des rendements élevés. Les éoliennes à "portance" utilisent ce type de profil : il est évident que l'inconvénient de ce type d'éolienne est leur plus grande difficulté de réalisation.

La fabrication d'une pale, en respectant les cotes précises du profil, n'est pas une mince affaire, d'autant plus que, dans le cas de l'hélice, le problème se complique. En effet, le vent relatif a une intensité et une direction variables suivant la position de l'élément de pale choisi. La vitesse que se crée cet élément dépend de sa distance au centre du moyeu. Pour garder un angle optimal et obtenir partout une efficacité maximale, on est amené à vriller la pale et à en diminuer la largeur au fur et à mesure que l'on s'éloigne du centre. Les problèmes de fabrication deviennent rapidement très difficiles à résoudre.

## LES EFFORTS SUBIS PAR LA STRUCTURE

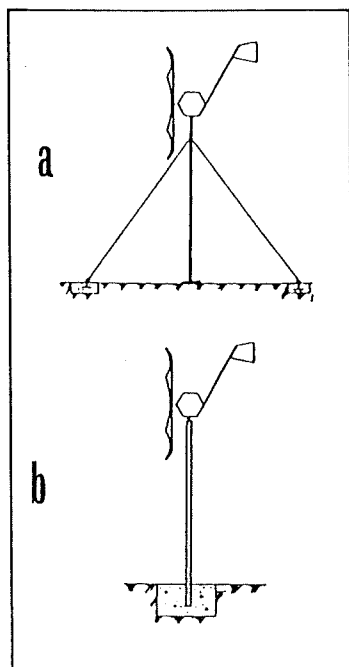
On insiste trop souvent sur le rotor d'une éolienne sans trop s'attarder sur la structure qui permet à ce rotor de tourner. Pourtant cette structure est soumise à des efforts dont il faut tenir compte si on ne veut pas avoir trop de surprises. Les efforts appliqués sont de trois types : statiques, quasi-statiques et dynamiques.

### EFFORTS STATIQUES : LA TRAÎNÉE

L'effort statique prépondérant, mis à part le poids propre de la structure, est celui de la traînée de l'éolienne.

Cet effort est proportionnel au carré de la vitesse du vent. Il s'agit de bien connaître la vitesse maximale à laquelle l'éolienne doit résister. Ainsi en France, le vent maximum est de 182,5 km/h (50m/s) (prescrit par les règles techniques N.V.65). Pour ce vent extrême, la poussée par  $m^2$  d'éolienne dans le vent est de 200 kg. Les efforts sont donc très importants.

**Figure 22:**  
a pylône en treillis soudé: forte traînée réduite par le haubanage  
b encastrement du pylône pour réduire la traînée



La force de traînée s'exerce sur :

- la structure porteuse : un treillis soudé traîne bien plus qu'un tube,
- le rotor : une roue lente traîne plus qu'un rotor rapide (2 ou 3 pales).

Il existe plusieurs solutions pour supporter cette pression. Les deux principales sont le haubanage et l'encastrement (fig.22).

Sur une éolienne haubanée, les câbles (ou haubans) reprennent l'effort sur le mât qui est alors soumis à un effort de compression. Celui-ci est, dans ce cas, simplement posé au sol. Pour une éolienne encastree, le mât porteur est planté dans un massif de fondation en béton.

La structure haubanée est plus légère que la structure encastree. Mais elle pose, pour des éoliennes rapides en tout cas, des problèmes de vibration des haubans qui, en outre, prennent de la place au sol en nécessitant 3 ou 4 ancrages éloignés de l'éolienne.

### EFFORTS QUASI-STATIQUES : LA FORCE CENTRIFUGE

Ce sont les efforts qui tendent à faire éclater la pale de l'éolienne sous l'effet de la force centrifuge. Ils ne concernent, en général, que les éoliennes rapides dont les pales devront être construites en un matériau léger et résistant.

La contrainte est en effet proportionnelle à la densité du matériau et au carré de la vitesse de déplacement de la pale. Une pale d'éolienne rapide de 5 mètres de diamètre est soumise à un effort de tension maximal d'une tonne pour un matériau de densité 1,9 (composite résine/stratifié).

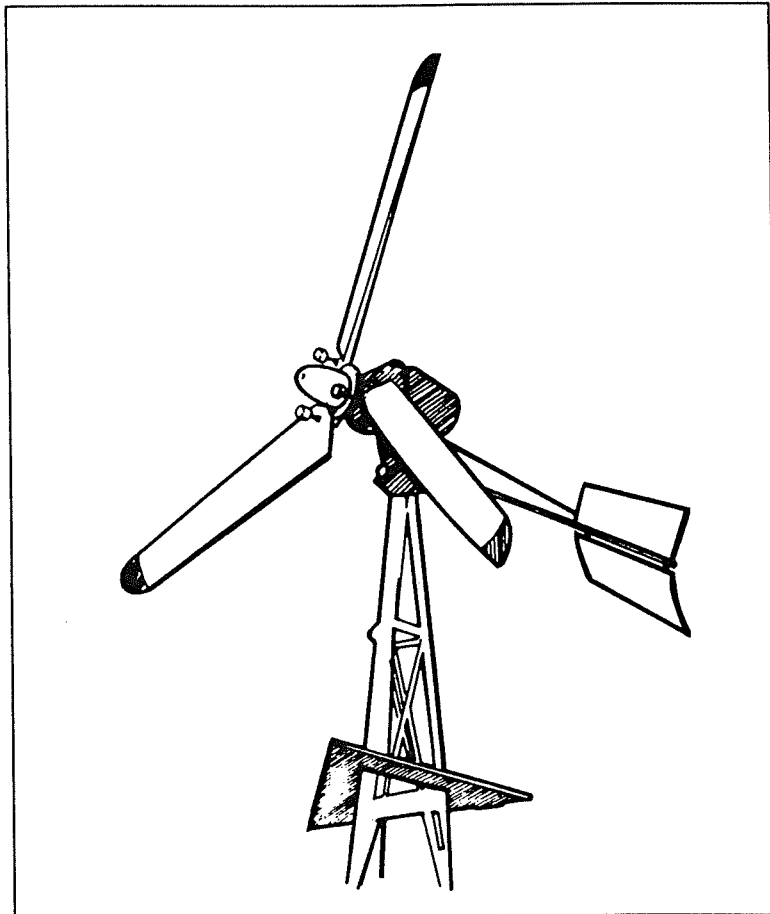
### EFFORTS DYNAMIQUES : L'IRRÉGULARITÉ DU VENT

Ces efforts sont les plus dangereux, ils sont à l'origine des "casses d'éoliennes". Le vent, par son irrégularité (tourbillons, rafales, changement soudain de direction), soumet la structure à des efforts répétés et irréguliers. Ceux-ci entraînent une fatigue des matériaux des pales. De plus, les pales sont soumises en même temps à la force centrifuge, le tout en un milieu parfois hostile (intempéries, sel, sable).

Ces efforts dynamiques entraînent également des vibrations de la structure, liées aux vibrations d'excitation des pales. Si l'un de ces modes vibratoires entre en résonance avec un mode propre de la structure, c'est la fin de la machine. Le pont de Tacoma s'est ainsi brisé au passage d'un régiment marchant au pas cadencé. Ces vibrations affectent plus particulièrement les modèles bi-pales. Les modèles tri-pales n'en sont tout de même pas exempts. Mais les risques étant moins importants sur les tri-pales, les précautions à prendre pour éviter les vibrations (équilibrages) permettent une fabrication plus simple (fig.23).

Les efforts dynamiques et les efforts dus à la force centrifuge sont surtout sensibles pour les éoliennes rapides, ils sont de moindre importance pour des éoliennes lentes.

Figure 23:  
un  
aérogénérateur  
(extrait de  
P.Fraenkel -  
Water pumping  
devices)



# Connaître les matériels

# 2

	page
<b>Le pompage</b>	37
<b>Comprendre le principe</b>	37
Hauteur géométrique et hauteur manométrique	37
Les pertes de charge	39
La puissance utile	42
<b>Les pompes volumétriques</b>	43
Pompes à mouvement alternatif	43
Pompes à mouvement rotatif	48
<b>Les turbomachines</b>	51
Les pompes centrifuges	52
Les pompes à hélice	53
<b>Une pompe pour chaque usage</b>	54
<b>Les principaux types d'éoliennes</b>	56
Les éoliennes rapides ou aérogénérateurs	56
Les éoliennes lentes ou multipales	58





---

<b>Les spécificités de chaque rotor</b>	61
<b>Choisir l'association pompe-rotor</b>	65
<b>Des adaptations judicieuses</b>	65
Adaptation des couples moteur et résistant	65
Adaptation des vitesses de rotation	66
Des technologies proches	66
<b>Les principales associations possibles</b>	66
Eolienne multipale - pompe à piston	66
Couplage électrique	71

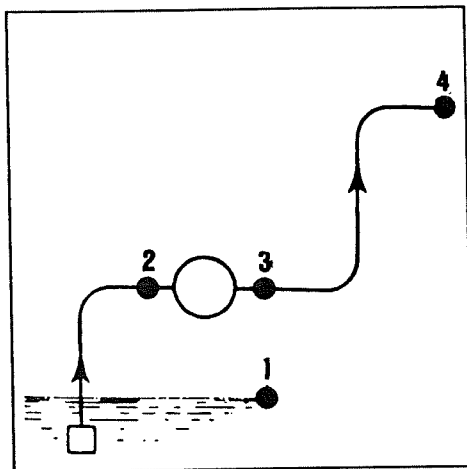
## LE POMPAGE

### COMPRENDRE LE PRINCIPE

#### HAUTEUR GÉOMÉTRIQUE ET HAUTEUR MANOMÉTRIQUE

Le problème du pompage est simple. Il s'agit de remonter, sur une certaine hauteur, un certain débit, c'est-à-dire un certain volume d'eau en un certain temps. Dans le cas général, l'eau aspirée à travers un filtre (ou crépine) arrive à l'entrée de la pompe par le conduit d'aspiration. La pompe refoule alors l'eau vers l'utilisation.

Figure 24:  
hauteur  
géométrique  
de pompage



La différence de hauteur entre le niveau de l'eau à l'aspiration (point 1) et le niveau de l'eau au refoulement (point 4) est la hauteur géométrique sous laquelle travaille la pompe (fig.24).

En plus de cette hauteur géométrique, la pompe doit vaincre divers frottements:

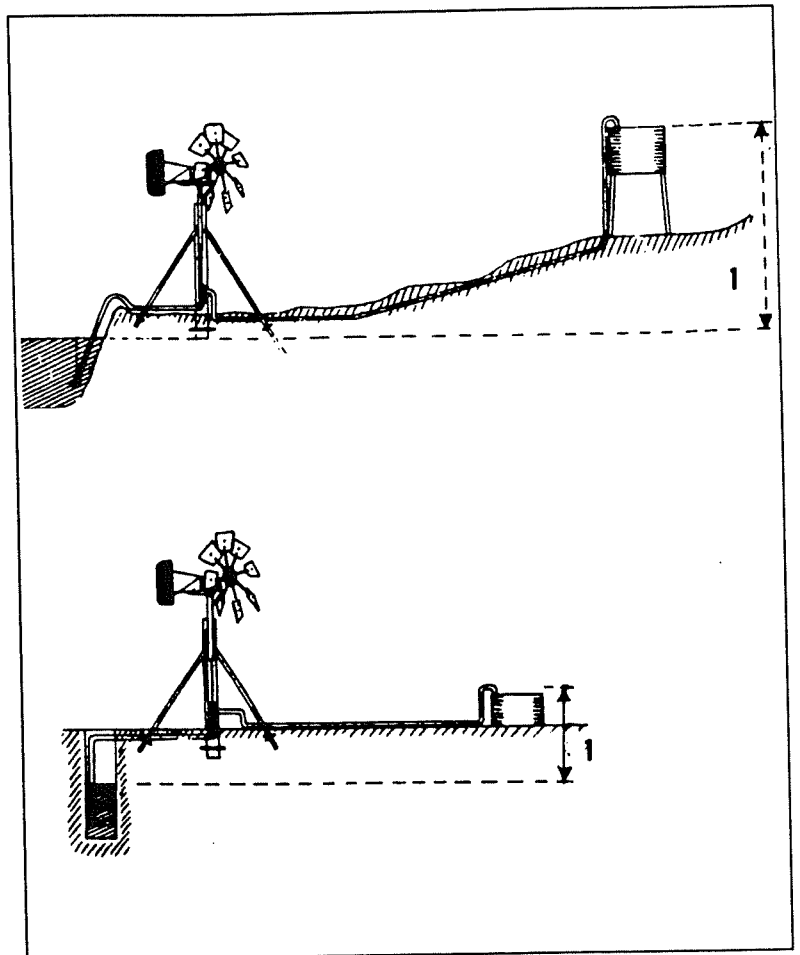
- dans les tubes: ce sont les pertes de charge régulières. Elles sont faibles, lorsque la section du tube est importante et la vitesse de l'eau faible,

- dans les obstacles que rencontre l'eau: coudes, vannes, variations de diamètres, clapets, filtres. Ce sont les pertes de charge singulières.

La pompe doit également fournir de l'énergie pour mettre l'eau en mouvement (énergie cinétique).

La somme de ces différentes grandeurs (hauteur géométrique, pertes de charge, énergie cinétique) est appelée : **Hauteur Manométrique Totale** (ou HMT en abrégé (fig.25)). Elle correspond à la valeur de la pression mesurée aux point 2 et 3 : entrée et sortie de la pompe. C'est la HMT qui limite le débit d'une éolienne.

**Figure 25:**  
**HMT=**  
**hauteur**  
**géométrique**  
**+pertes de**  
**charge**  
**+énergie.**  
**Elle varie**  
**avec la**  
**hauteur de**  
**refoulement**  
**de l'eau.**  
*1 Hauteur*  
*géométrique*



Dans le calcul de la hauteur géométrique, il faut tenir compte du rabattement de la nappe dans laquelle on pompe. En cours de pompage, le niveau de l'eau dans un puits se stabilise, en effet, à un niveau plus bas que son niveau d'équilibre. Ce rabattement est d'autant plus important que le débit du puits est faible. S'il devient trop important, il peut même assécher temporairement le puits. Un essai de pompage préalable est souhaitable. On mesure le rabattement pour différents débits.

### LES PERTES DE CHARGE (fig. 26)

- Les pertes de charge sont d'autant plus importantes que la vitesse de l'eau est grande : on évitera donc d'installer des tuyaux de trop petit diamètre.
- Plus le débit est grand et plus le diamètre des tubes doit être important, la vitesse de l'eau ne devant pas excéder une vitesse de 1 m/s.
- Les accidents de tuyauterie ont également une incidence non négligeable, en particulier les vannes et les robinets, les tés, les coudes serrés et les élargissements brusques. On cherchera à amortir leur effet le plus possible (courbes de grand diamètre par exemple). Le tableau 2 en donne quelques exemples.

Le tableau 6 permet de remplacer la pièce de tuyauterie spécifique (coude...) par une longueur équivalente de tuyauterie droite. Celle-ci sera ajoutée à la longueur totale de tuyauterie à partir de laquelle on calculera la valeur de la perte de charge en fonction de la figure 25 .

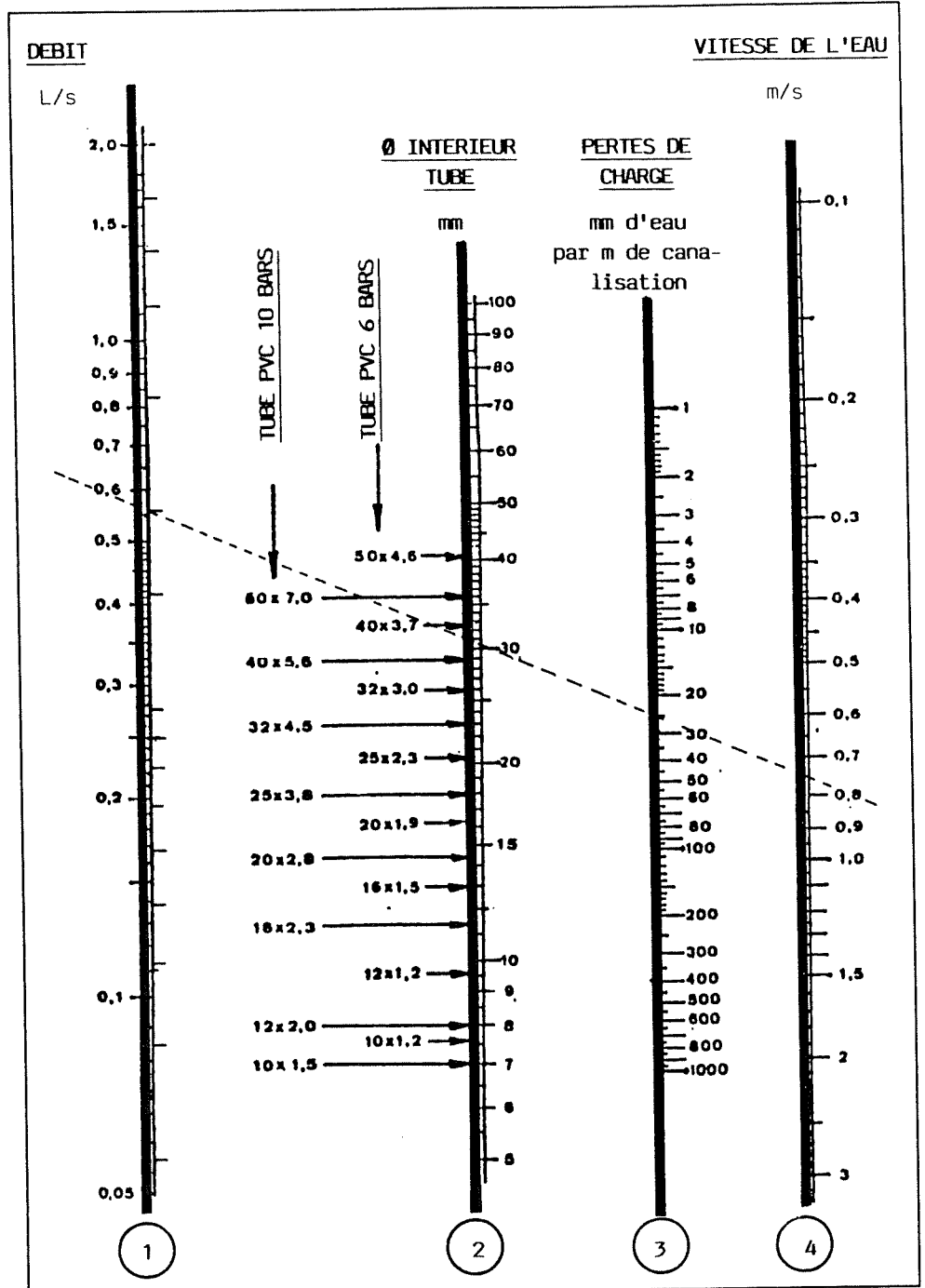


Figure 26: calcul des pertes de charge

Diamètre intérieur de la tuyauterie	15 mm	25 mm	35 mm	50 mm	65 mm	100 mm
Vanne sphérique ou robinet, à $\frac{1}{2}$ ouvert	30	5,0	6,5	10	17	30
Té	0,9	1,5	2,0	3,5	4,5	6,5
Coude serré 90	0,4	0,7	1,0	1,6	2,0	4,0
Elargissement (rapport des diamètres $\cdot \frac{1}{2}$ )	0,3	0,5	0,6	1,0	1,3	2,0
Rétrécissement (rapport des diamètres $\cdot \frac{1}{2}$ )	0,2	0,3	0,4	0,6	0,8	1,3
Coude 45°	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3

**Tableau 6: estimation approximative en mètres de tuyauterie de l'incidence de accidents de tuyauterie sur les pertes de charge**

#### *Exemple de calcul*

*L'éolienne débite  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  ( $0,56 \text{ l/s}$ ).*

*La hauteur manométrique totale est de 20 m (hauteur de pompage + pertes de charge de la pompe).*

*On veut faire une adduction d'eau de 100 mètres de longueur en ligne droite.*

*Comme la différence d'altitudes entre le bassin d'arrivée et la sortie d'eau à l'éolienne est de 25 mètres, on veut que la tuyauterie présente une perte de charge inférieure à ces 25 mètres.*

*Quel diamètre de tuyau choisir ?*

*Réponse graphique (d'après la figure 26)*

*La perte de charge maximale est de 2,5 m sur 100 mètres, soit 25 mm par mètre de tuyauterie. On sélectionne  $2 \text{ m}^3/\text{h}$  sur l'échelle 1, puis 25 mm sur l'échelle 3. La ligne droite qui passe par ces 2 points coupe l'échelle 2 au point : 31 mm qui représente le diamètre intérieur minimal de la tuyauterie. On pourra donc choisir un tube PVC (pression) de 40 mm de diamètre extérieur. Dans ce cas la HMT totale sera : 20 m + (19 mm x 100 m) : 21,90 m.*

Les tuyauteries métalliques ou PVC de mauvaise qualité (bosselé) présentent des pertes de charges un peu supérieures.

## LA PUISSANCE UTILE

L'énergie utile pour élever une masse d'eau (M) d'une hauteur (H) s'exprime ainsi:

$$W \text{ utile} = M.H.g$$

W = énergie en J  
H = hauteur (HMT) en m  
M = masse d'eau en kg  
g = 9,81 m/s

La **puissance utile** est l'énergie reçue par unité de temps, on introduit alors la notion de débit (Q) :

$$P \text{ utile} = Q.H.g$$

P = Puissance utile en W  
H = hauteur (HMT) en m  
g = 9,81 m/s  
Q = débit volumique en l/s

En fait, la puissance du moteur à installer doit être plus élevée que cette puissance utile car aucune pompe n'est parfaite. A l'intérieur de la pompe, il existe une perte de charges qui diminue l'énergie réellement transmise au fluide (rendement manométrique). De plus, des fuites ont lieu à l'intérieur de la pompe, par les joints d'étanchéité (rendement volumétrique). Enfin, les frottements mécaniques se traduisent par une dépense d'énergie (rendement mécanique).

Le produit de ces divers rendements donne le rendement effectif qui peut atteindre 90% pour des pompes importantes. Il peut descendre jusqu'à 40%, s'il s'agit de très petites pompes. Nous prendrons, dans la suite, un rendement effectif de 50% ce qui correspond à une petite pompe de construction artisanale.

La **puissance effective** à fournir à la pompe s'exprime alors ainsi:

$$P \text{ effective} = \frac{\text{Puissance utile}}{\text{Rendement effectif}} \text{ en W}$$

$$P \text{ effective} = \frac{\text{Puissance utile}}{0,5} = \frac{Q.H.g}{0,5}$$

En prenant  $g = 10$ , on a :

$$\text{Puissance effective} = \frac{Q.H.10}{0,5} = 20.Q.H$$

Remarquons que le constructeur de la pompe n'est pas responsable des pertes de charges dans les conduites de l'installation ; c'est à l'utilisateur d'installer convenablement les conduites d'aspiration et de refoulement. Une pompe parfaitement construite peut mal fonctionner si l'installation est défectueuse.

## LES POMPES VOLUMÉTRIQUES

Une pompe est dite volumétrique lorsque la quantité d'eau délivrée à chaque coup (ou chaque tour) est constante.

### POMPES A MOUVEMENT ALTERNATIF

Un coup dans un sens, un coup dans l'autre. Ce système est peu satisfaisant en théorie, en raison des efforts constamment inversés. Cependant, il est le plus répandu, parce qu'il est facile à mettre en œuvre, surtout sur éolienne, et qu'il s'adapte aisément à toutes profondeurs.

De nombreuses adaptations ont été réalisées pour tourner ses inconvénients : pompes à double effet, ensemble de contre-poids ou ressorts qui rentabilisent chacun des deux temps de travail du système; commande par volant rotatif, etc...

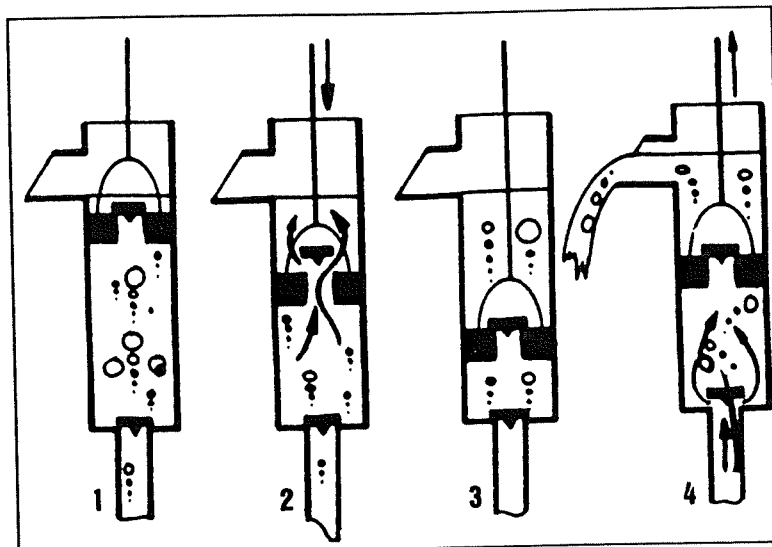
#### Les pompes à piston

Un piston commandé par un jeu de tringles coulisse dans un tube lisse. Ce piston est le plus souvent étanche grâce à un joint en cuir ou en plastique. Deux clapets (de pied et de refoulement) équipent le tube d'amenée de l'eau. Leur rôle est de ne laisser passer l'eau que dans un sens : vers le haut.

Le clapet de refoulement est le plus souvent placé sur le piston. Dans ce cas, l'eau est pompée de la façon suivante (fig.27).



Figure 27:  
principe de  
fonctionne-  
ment  
d'un piston  
de pompe



1 Premier temps

2 Deuxième temps

3 Fin du deuxième temps

4 De nouveau premier temps, l'eau accumulée au-dessus du piston est évacuée à l'extérieur

- 1er temps : le piston monte et fait monter avec lui la colonne d'eau qu'il supporte, car le clapet de refoulement se ferme. Il aspire l'eau au-dessous de lui, celle-ci vient occuper le corps de pompe en traversant le clapet de pied.
- 2ème temps : le piston descend, le clapet de pied se ferme, l'eau située en dessous du piston passe au dessus par l'intérieur du piston en soulevant le clapet de refoulement. La colonne d'eau supérieure est immobile. Le travail à fournir est pratiquement nul.

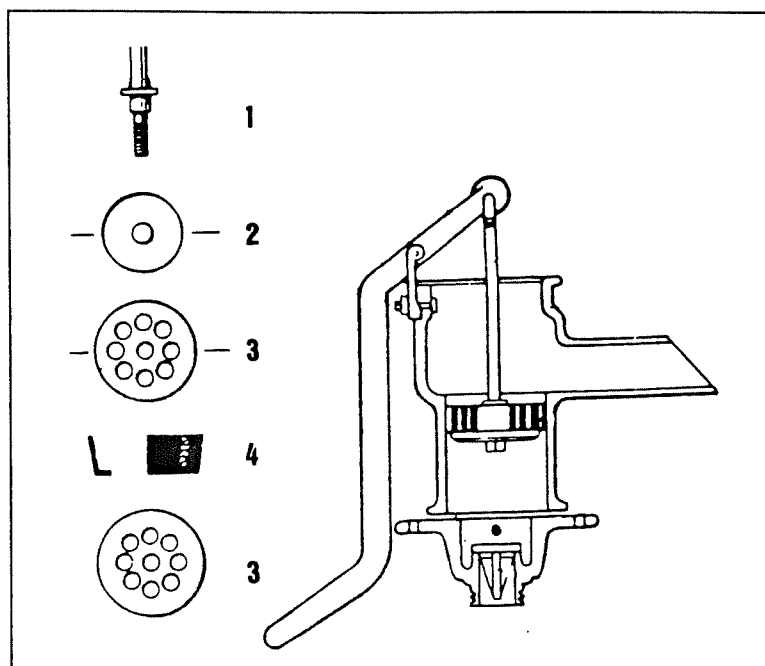
Dans le cas d'un tel montage, la tige de commande du piston travaille en traction. Par contre, lorsque le clapet de refoulement n'est pas sur le piston, le travail se fait à la descente du piston, et la tige travaille alors en compression.

La hauteur d'aspiration possible (distance entre le piston et le niveau de l'eau) peut atteindre le maximum théorique de 10,36 m. En pratique, toutefois, elle n'excède pas 6 à 7 m du fait des pertes de rendement et des conditions du milieu. Cette hauteur est encore réduite si l'installation est en altitude à cause de la diminution de la pression atmosphérique.

Cependant, il est toujours préférable, lorsque cela est possible, de placer le piston à la hauteur de l'eau : la pompe n'est alors pas aspirante mais seulement foulante et les risques liés au désamorçage sont supprimés.

Les pompes à piston sont les plus répandues car on peut atteindre de grandes profondeurs (100 - 150 m) simplement en augmentant les longueurs de tube et de tringlerie et en réduisant le diamètre du piston. La technologie utilisée peut être très simple (pompe en bois des Romains) ou tout à fait industrielle, selon le type de matériaux utilisés (fig.28).

**Figure 28:**  
éléments  
d'un piston  
1 Tige du  
piston  
2 Clapet  
3 Grilles de  
passage  
4 Joint du  
piston



L'entretien consiste à changer annuellement ou tous les deux ans les joints d'étanchéité du piston (cuirs). Lorsque le tube de refoulement est de même diamètre que le corps de pompe, on a la possibilité de retirer le piston sans pour autant démonter la pompe.

Les pannes les plus courantes concernent le bris des tiges de commande et le non fonctionnement des clapets.

La cadence d'une pompe à piston ne peut être trop importante : habituellement, on compte 50 à 60 coups maximum à la minute. Les éoliennes sont donc souvent conçues pour garder cette cadence à peu près constante.

Le débit théorique ( $Q_{th}$ ) de la pompe est le produit du nombre de coups à l'unité de temps par la quantité d'eau délivrée à chaque coup (cylindrée).

$$Q_{th} = N.V$$

$Q_{th}$  = débit théorique (l/s)  
 $N$  = nombre de coups par seconde  
 $V$  = cylindrée ( $dm^3$ ) =  $S \times l$

$$Q_{th} = N.S.l$$

$S$  = surface du piston ( $dm^2$ )  
 $l$  = longueur de la course (dm)

Il s'agit du débit théorique. Le débit réel s'établit généralement 5 à 10% en dessous. L'abaque ci-dessous indique les relations entre débit, cylindrée et diamètre du piston (fig.29).

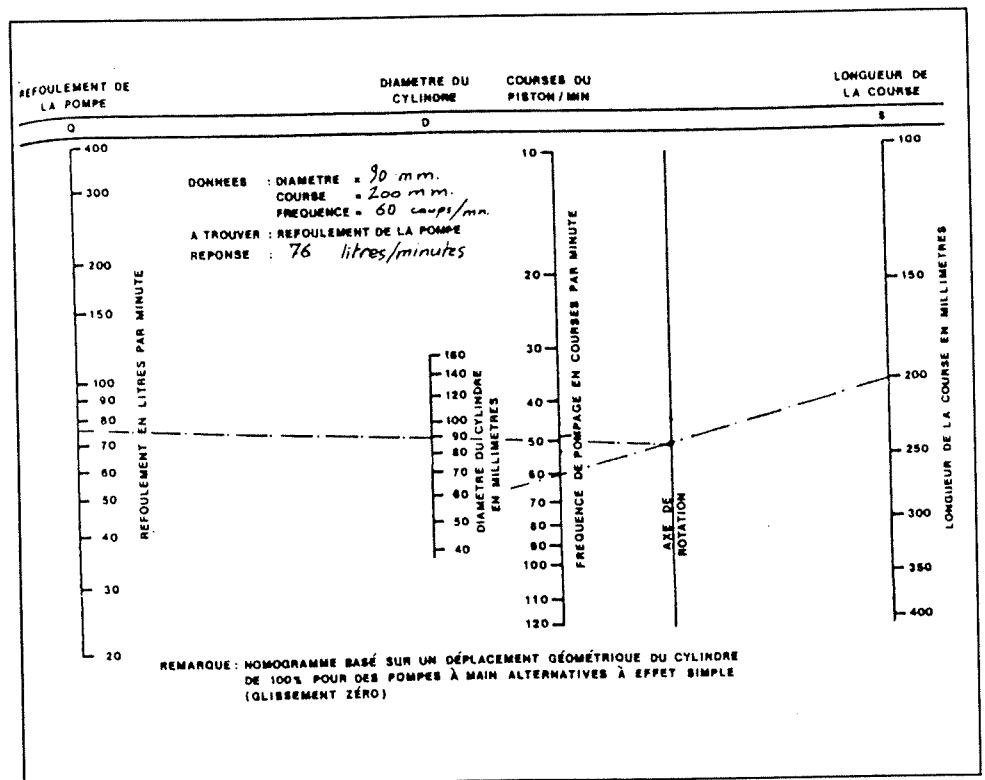


Figure 29: abaque de relations entre débit, cylindrée et diamètre du piston

Une des principales caractéristiques d'une pompe à piston est la valeur de la force à exercer sur la tige de commande. Cette force est proportionnelle à la profondeur de pompage et à la surface du piston.

$$F_{th} = P.S \quad F_{th} = \text{force théorique à exercer pour pomper (kgf)}$$

où

$$S = \text{surface du piston (cm}^2\text{)}$$

$$P = \text{pression sur le piston (kg/cm}^2\text{)}$$

Or,  $P = \frac{H. \rho}{10}$

où

$$H = \text{hauteur de refoulement (m)}$$

$$\rho = \text{masse volumique de l'eau (1kg/dm}^3\text{)}$$

L'expression de  $F_{th}$  devient:

$$F_{th} = \frac{H.S}{10}$$

La force qu'il faut réellement exercer est, en fait, plus importante que cette force théorique. Il faut compter tout d'abord le poids de l'ensemble de la tringlerie qui n'est pas négligeable.

D'autre part, le frottement du piston dans le corps de pompe, ainsi que la mise en vitesse de la colonne d'eau augmentent la force à exercer qui prend alors pour valeur 1,5 à 2 fois la valeur théorique  $F_{th}$ .

$$F \text{ réelle} = 1,5 F_{th} = 1,5 \frac{H.S}{10}$$

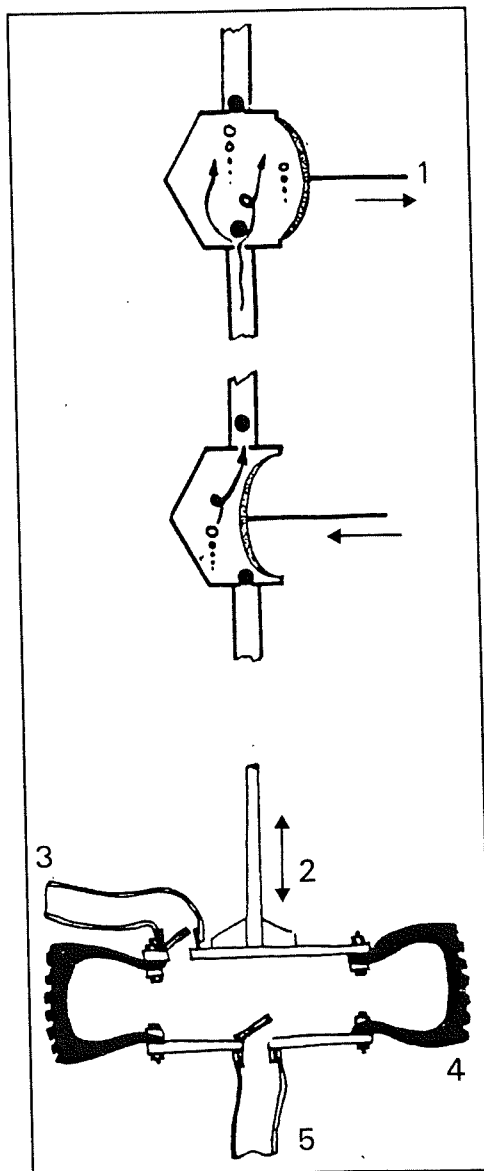
On constate qu'une forte vitesse de déplacement du piston entraîne une forte augmentation de la force de pompage (3 à 4 fois  $F_{th}$ ) et donc une perte d'énergie ainsi qu'un risque de casser les tringles. On prend en général 30 à 40 cm/s comme vitesse de déplacement du piston (jusqu'à 1 m/s).

### Les pompes à membrane

Le principe est identique à celui de la pompe à piston. La variation du volume d'eau compris entre les deux clapets est produite non pas par le déplacement d'un piston, mais par la déformation d'une membrane. Ce type de pompe accepte souvent une cadence de pompage plus élevée que les pompes à piston. La commande se fait par une tringle (fig.30).

**Figure 30:**  
principe de  
la pompe à  
membrane

- 1 Membrane  
souple
- 2 Vers  
l'éolienne
- 3 Refoulement
- 4 Pneu
- 5 Aspiration



Le corps de pompe est généralement plus encombrant que celui d'une pompe à piston et il est souvent placé à l'extérieur du puits. Il travaille donc en aspiration, ce qui limite à 6 m la profondeur d'exhaure. Ce n'est pas le cas des pompes Vergnet et Pétro dont la membrane allongée est placée à l'intérieur d'un tube (il faudra néanmoins disposer d'une hauteur d'eau suffisante dans le puits : environ 2 m).

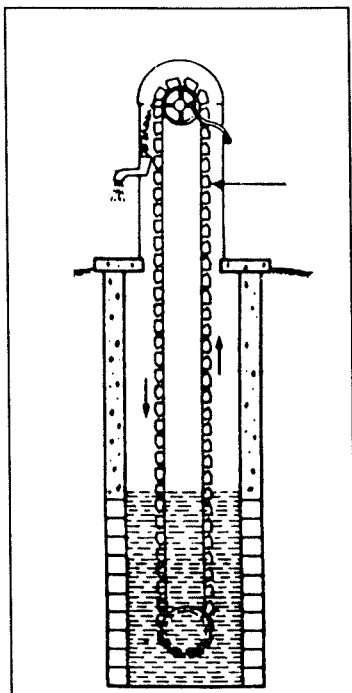
Sur ces deux types de pompe, piston et membrane, la commande à tringle est parfois remplacée par une commande hydraulique : cas de la pompe Vergnet ou de la pompe Wonder. Les pannes liées à la tringle sont alors éliminées. Il y a toutefois un piston supplémentaire, celui qui commande le circuit hydraulique. Les pertes de charge de l'ensemble sont donc augmentées ce qui diminue le rendement de la pompe.

### — POMPES A MOUVEMENT ROTATIF

L'avantage de ces pompes est de travailler sans à-coup, d'un mouvement uniforme, toujours dans le même sens.

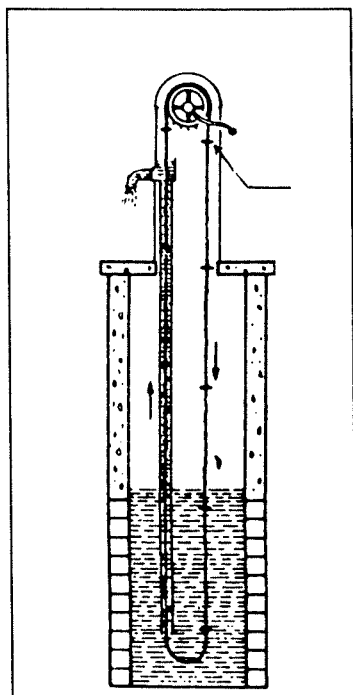
### Les pompes à godets et à chapelet

**Figure 31:**  
pompe à  
godets  
1 Godets



Sur une chaîne formant une boucle fermée (fig.31), sont disposés des godets. La chaîne est entraînée par une roue de grand diamètre dont l'axe horizontal tourne de façon uniforme et continu ; les récipients plongeant dans l'eau sont verticaux durant la remontée, puis se vident au niveau de la roue supérieure dans un bac récepteur de conception délicate. La hauteur d'exhaure de cette pompe à godets est d'environ 10 m. Elle peut être augmentée, si l'on dispose une seconde roue dans l'eau qui évite à la chaîne de se vriller.

**Figure 32:**  
pompes à  
chapelet  
1 Disques de  
caoutchouc



La pompe à chapelet (fig.32) fonctionne selon le même principe ; la chaîne est alors équipée de bouchons qui remontent dans un tube, chacun jouant le rôle de piston non étanche. Cette pompe est simple de construction, et présente l'avantage par rapport au système à godets, de ne pas employer de bac récepteur. La profondeur d'exhaure atteint 20 m. Le chapelet peut également être constitué d'une corde à noeuds.

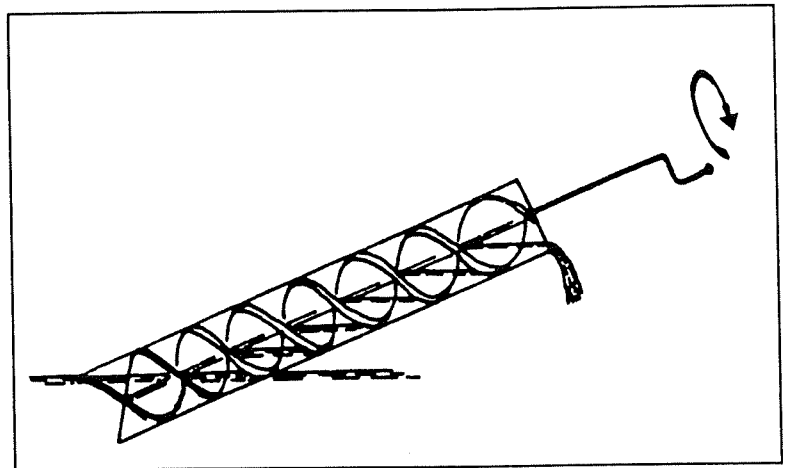
Ces pompes ne possèdent pas de clapet. Les diagnostics de panne sont immédiats.

### Les pompes à vis

Elles ne travaillent qu'en position inclinée. Il s'agit de pompes à installer sur une berge pour relever de quelques mètres l'eau d'une mare ou d'un cours d'eau.

C'est le cas de la vis d'Archimède : le volume d'eau compris entre deux filets de la vis se déplace linéairement vers le haut, lorsque celle-ci tourne. La vis est placée à l'intérieur soit d'une goulotte, soit d'un tube. Ces pompes sont très utilisées pour de gros débits à très faible hauteur (fig.33). On l'emploie couramment et depuis fort longtemps sur les bords du Nil.

**Figure 33:**  
la vis  
d'Archimède

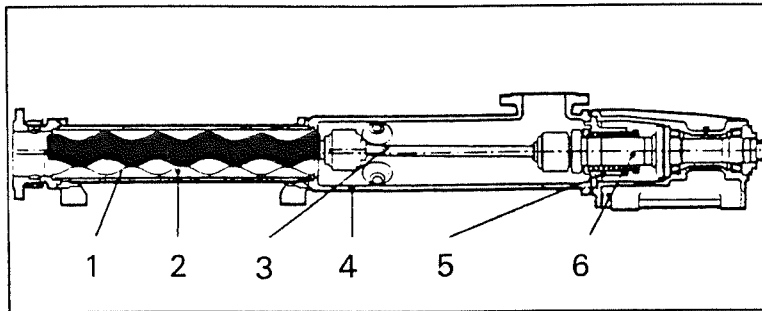


### La pompe Moineau

Il s'agit d'une pompe faisant exclusivement appel à une technologie industrielle. En effet, un rotor hélicoïdal tourne au sein d'un stator en caoutchouc à pas double de celui du rotor. L'usinage de ces deux pièces est délicat (fig.34).

C'est une des seules pompes rotatives à axe de rotation vertical. Elle peut équiper de petits forages jusqu'à 3 pouces (76 mm). La profondeur d'exhaure est importante : plusieurs dizaines de mètres. La vitesse de rotation peut varier considérablement : d'une centaine de tours par minute à 1500 (couplage avec un moteur électrique).

Figure 34:  
schéma de coupe de la  
pompe Moineau



1 Rotor  
2 Stator  
3 Bielle

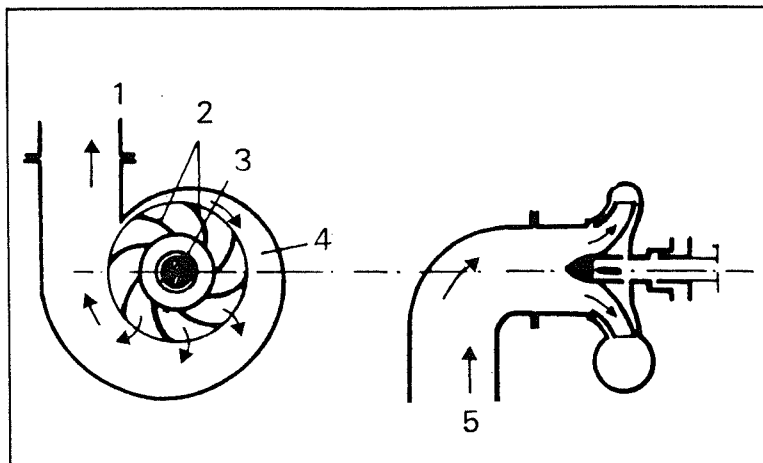
4 Corps  
5 Presse-étoupe  
6 Arbre de commande

## LES "TURBOMACHINES"

Une turbomachine comprend un rotor animé d'une vitesse de rotation uniforme entraînant l'eau qui s'écoule continuellement: vitesse de rotation permanente et écoulement permanent sont les caractéristiques essentielles des turbomachines. On supprime ainsi les forces alternatives qui s'exercent sur le piston et on a un couple moyen constant au cours d'une rotation (et non plus variable). Il existe de nombreux types de turbomachines. Nous limitons notre exposé aux pompes centrifuges et aux pompes à hélices (fig.35).

Figure 35:  
principe  
d'une turbo-  
machine

1 Refoulement  
2 Ailettes  
3 Rotor  
4 Diffuseur  
5 Aspiration





Pour toutes les turbomachines, la puissance absorbée est proportionnelle au cube de la vitesse de rotation. Le couple est donc proportionnel au carré de cette vitesse. Ceci signifie qu'aux petites vitesses, et en particulier au démarrage, la puissance demandée est très faible.

Les turbomachines peuvent exploiter tout type de hauteur de pompage. Toutefois, le profil de chacune est dessinée pour une HMT bien déterminée. On choisira donc le modèle en fonction de la HMT et du débit désiré (ce qui fixe, par conséquent, la puissance à fournir). Une pompe centrifuge ou à hélice est ainsi conçue pour un site donné et ne peut pas se transporter sur un site différent.

Les turbomachines sont conçues pour tourner à 1500 tours/mn. On peut parfois obtenir du fabricant des pompes prévues pour 750 t/mn.

## LES POMPES CENTRIFUGES

Dans le cas le plus général, la pompe centrifuge comprend :

- une roue garnie d'un certain nombre d'ailes qui transmet au liquide l'énergie nécessaire,
- un diffuseur garni, lui aussi, d'aubes fixes,
- une volute qui canalise le liquide à la sortie du diffuseur vers le tuyau de sortie.

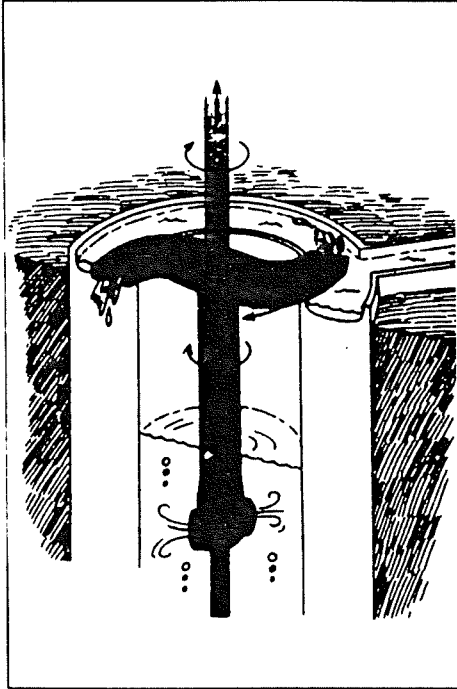
Les performances de cette pompe dépendent surtout du type de roue utilisée. La roue rejette l'eau à la périphérie de la pompe par la force centrifuge : ceci permet d'obtenir un débit fonction de la vitesse ainsi qu'un couple de démarrage minimal.

La construction artisanale est délicate : il faut en effet fabriquer une roue profilée ainsi qu'un diffuseur et maintenir entre la roue et le diffuseur un jeu très faible pour limiter les pertes.

Toutefois, la construction de machines artisanales sommaires sur ce principe reste possible (fig.36).

En général, on place sur l'arbre de la pompe un presse-étoupe pour l'étanchéité.

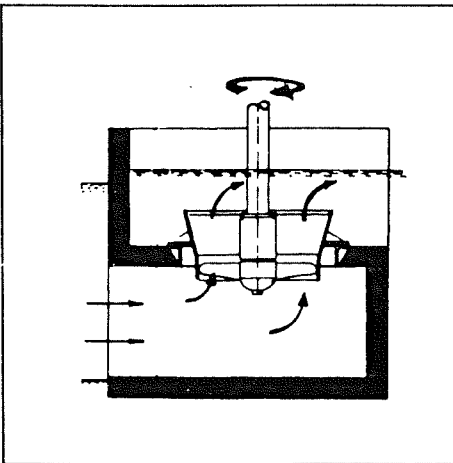
Figure 36:  
schéma de  
coupe d'une  
pompe  
centrifuge



## LES POMPES A HÉLICE

La pompe à hélice est constituée, comme son nom l'indique, d'une hélice analogue à celle d'un bateau. L'écoulement est parallèle à l'axe de rotation (contrairement à la pompe centrifuge où l'écoulement est perpendiculaire).

Figure 37:  
la pompe à  
hélice



Un exemple typique d'installation est présenté sur la figure 37 : il s'agit ici d'assainissement. L'eau drainée dans les champs est relevée de quelques mètres dans un canal qui l'évacue dans la mer (comme dans les Flandres et en Hollande).

L'arbre d'entraînement traverse le corps de la pompe pour entraîner l'hélice : il est monté sur des paliers en caoutchouc, lubrifiés par l'eau relevée (procédé Alta). Ce montage est très élégant et ne nécessite aucun entretien.

## ■ UNE POMPE POUR CHAQUE USAGE

Une pompe à eau ne sert pas seulement à remonter l'eau d'une nappe souterraine. Cette application particulière, nous l'appellerons pompage, pour la distinguer du relevage (élévation d'une eau de surface à un niveau légèrement supérieur), et de la surpression (élévation de la pression sans variation de niveau).

Par surpresseur, nous entendons l'utilisation suivante : disposant d'eau, en surface, en stockage ou en alimentation courante (pression normale de distribution), nous cherchons à obtenir une pression supérieure dans les jets, les rampes et le goutte à goutte. Le surpresseur permet d'obtenir une pression de plus de 50 mètres (5 bars), ce qui est suffisant.

On utilise, dans ce cas, une pompe centrifuge dont les caractéristiques sont tout à fait adaptées (le "circulateur", dans une installation de chauffage central à radiateurs à eau, est une pompe centrifuge).

Dans le cas où l'on a besoin de relever l'eau sur quelques mètres pour qu'elle s'écoule ensuite librement (assainissement, irrigation par canaux), la pompe à hélice, ou certaines pompes volumétriques, sont mieux adaptées.

UTILISATION	NOM GÉNÉRIQUE	TYPE DE POMPE
<b>Allimentation en eau</b> à partir d'une nappe profonde	Pompage	- Pompes à piston - Pompe Moineau - Pompes à membrane (Vergnet, Pétro)
<b>Allimentation en eau</b> à partir d'une nappe peu profonde	Pompage	- Pompes à piston - Pompes à membrane - Pompes à godets ou chapelet Pompes centrifuges
<b>Assainissement,</b> irrigation par gravité à partir d'un canal	Relevage	- Pompes à hélice Pompe à vis - Pompe à membrane ou piston
<b>Allimentation d'un</b> réservoir sous pression	Surpression	- Pompes centrifuges

Tableau 7: récapitulatif des types de pompes selon l'usage

## LES PRINCIPAUX TYPES D'ÉOLIENNES

### ■ LES ÉOLIENNES RAPIDES OU AÉROGÉNÉRATEURS

L'éolienne rapide ou aérogénérateur est, en général, utilisée pour la production d'électricité. La pièce majeure de l'aérogénérateur est le rotor, comparable à une hélice, qui comporte deux ou trois pales. Bien que réaliser deux pales soit plus simple et plus économique que construire trois pales, une hélice tripale est préférable pour limiter les risques de vibration. Les deux pales face à face ont, en effet, une fâcheuse tendance à amplifier mutuellement les vibrations auxquelles elles sont soumises.

Les pales ont un profil aérodynamique, elles sont réalisées en bois stratifié ou, de plus en plus, en matériaux composites. Le profil est constant sur toute la longueur et la largeur de la pale est de l'ordre du 10ème de sa longueur.

Les trois pales sont fixées sur un moyeu, monté sur des roulements, lui-même fixé au sommet du pylône sur un bâti (la nacelle) qui doit s'orienter au vent. La nacelle contient aussi le système de freinage (pour arrêter l'aérogénérateur par vent supérieur à 20-25 m/s) et les éléments de transmission électrique (multiplicateur, génératrice).

Avec une transmission électrique et l'utilisation de technologies de pointe, l'aérogénérateur est un matériel relativement nouveau dont la production industrielle s'est nettement développée ces dernières années.

On peut distinguer quatre gammes de matériels selon la puissance nominale.

- < 1kw (1 à 5m de diamètre)
- de 5 à 50 kw (7 à 15m de diamètre)
- 50 à 200 kw (15 à 25m de diamètre)
- 200 kw (25 à 60m de diamètre)

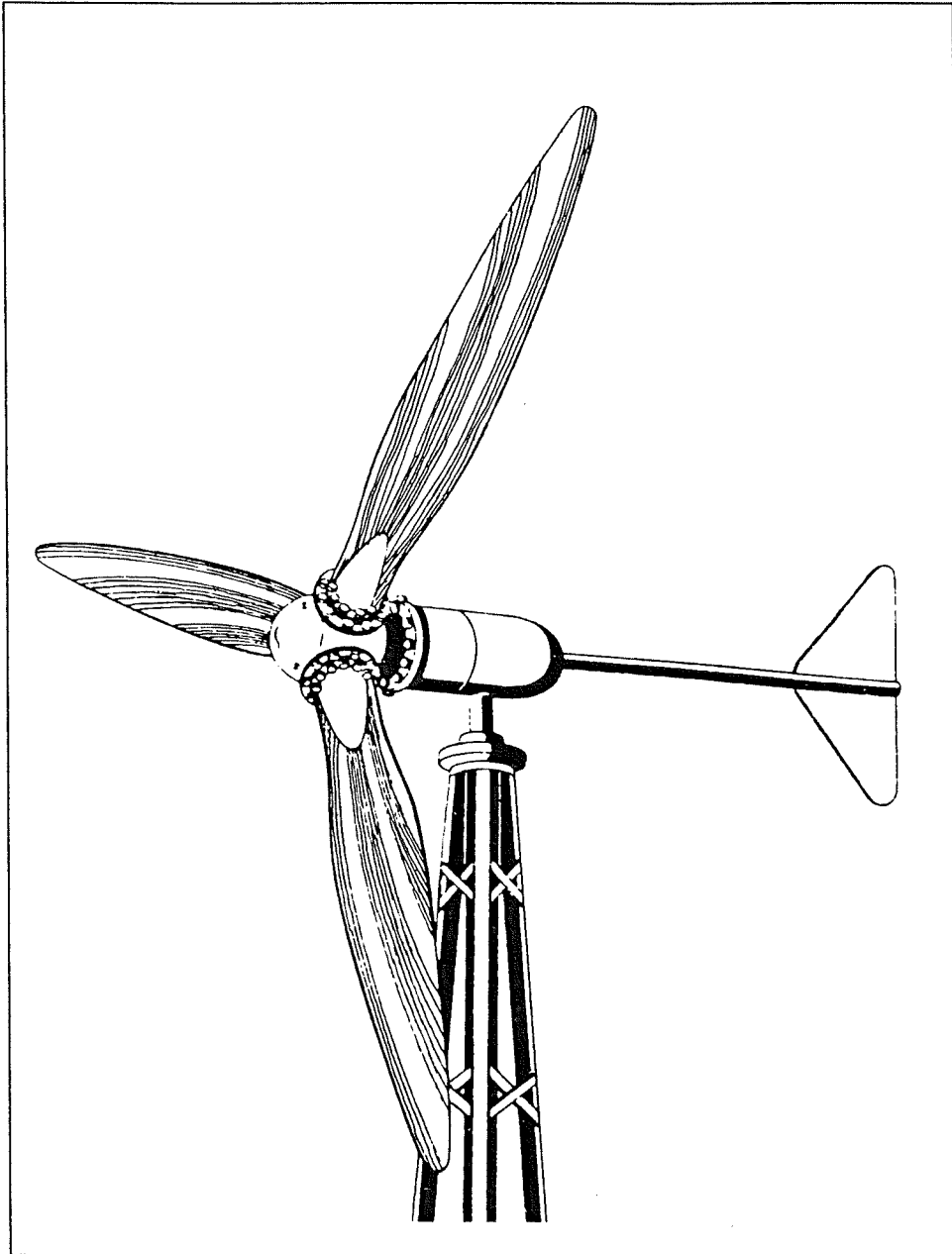


Figure 38: rotor d'une éolienne rapide ou aérogénérateur

Les principaux pays fournisseurs et utilisateurs d'aérogénérateurs pour la production électrique sont le Danemark, les Etats-Unis, les Pays-Bas, la Belgique, le Royaume-Uni.

L'utilisation d'aérogénérateurs pour le pompage dans les pays en développement est, jusqu'à présent, peu fréquente en raison, semble-t-il, du montant de l'investissement initial et, surtout, des difficultés de maintenance dans les zones rurales où les compétences électromécaniques manquent. Toutefois, récemment, des installations ont été faites en Inde, au Kenya et au Cap Vert.

A l'avenir, ce type de matériel pourra constituer une solution de progrès intéressante mais les contraintes d'installation, de maintenance et de coût seront totalement différentes de celles des éoliennes lentes à transmission mécaniques.

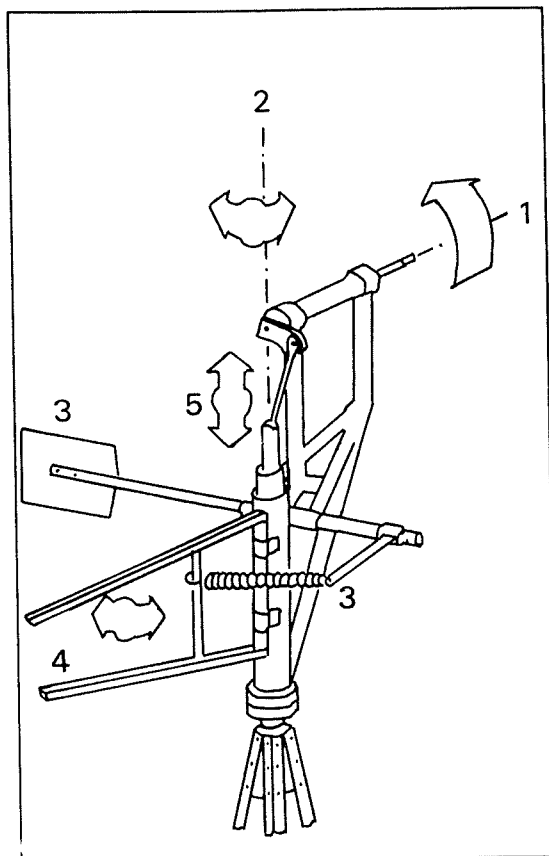
## LES ÉOLIENNES LENTES OU MULTIPALES

C'est la plus connue des éoliennes. Le rotor comporte de 6 à 24 pales légèrement cambrées, réalisées en tôle. Chaque pale est fixée sur un tube soudé sur le moyeu. Comme pour les éoliennes rapides, le moyeu est monté sur un bâti orientable au vent. La transmission du mouvement s'effectue par un système bielle-manivelle qui entraîne directement une pompe à piston (fig.39). Dans ce cas là on n'a guère le choix de la pompe (voir chapitre suivant). Le rotor est monté sur un pylône en cornières soudées, ou sur un mât haubané.

Il est aussi intéressant d'utiliser des voiles au lieu de tôles pour réaliser les pales (exemple : l'éolienne crétoise (fig.40)). Afin d'augmenter la longévité des voiles qui ne durent qu'un an ou deux si elles sont en coton, on peut utiliser des matériaux modernes (Dacron), de même pour les paliers (Téflon ou Nylon usinés). C'est à voir en fonction des possibilités locales, de l'environnement et du coût.

Un système de régulation est prévu afin de limiter la vitesse de rotation par vents forts et de mettre totalement la roue en drapeau par vent violent (supérieur à 15 m/s). Classiquement la roue pivote et vient se placer le long du gouvernail. Le pivotement est commandé, soit par une pale additionnelle placée perpendiculairement au vent et dimensionnée pour faire pivoter la roue lorsque le vent atteint 10 m/s par exemple, soit par

**Figure 39:**  
**tête**  
**d'éolienne**  
**multipale,**  
**ses fonctions:**  
 1 Supporter  
 la roue et  
 permettre la  
 rotation  
 2 Permettre  
 l'orientation  
 de l'ensemble  
 3 Supporter  
 le dispositif  
 de régulation  
 4 Supporter  
 la dérive et  
 assurer son  
 articulation  
 5 Guider la  
 tige de  
 commande



décentrage de l'axe du rotor. Des ressorts rappellent la roue en bonne position, quand le vent diminue (fig.41).

D'autres systèmes, existent, par exemple l'effacement de chaque pale au vent, celles-ci tournant automatiquement autour de leur rayon, ou bien des solutions manuelles pour des roues en toile où l'on serre les voiles.

Des milliers d'exemplaires existent et sont fabriqués : on peut en acheter pour un coût raisonnable ou copier un modèle existant (les brevets sur ce genre de matériel sont depuis longtemps tombés dans le domaine public).

Des machines très rustiques (paliers bois, matériaux légers) fonctionnent très bien, mais généralement au prix d'un entretien coûteux en main d'oeuvre.



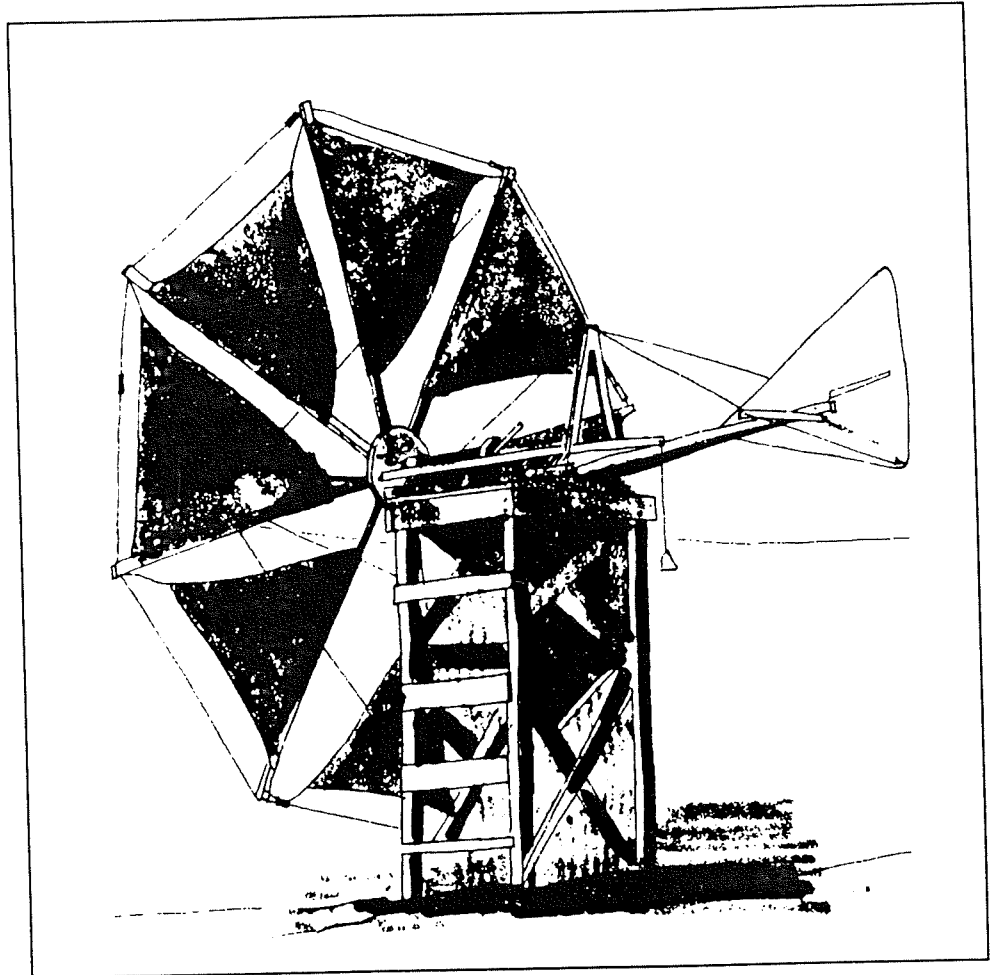
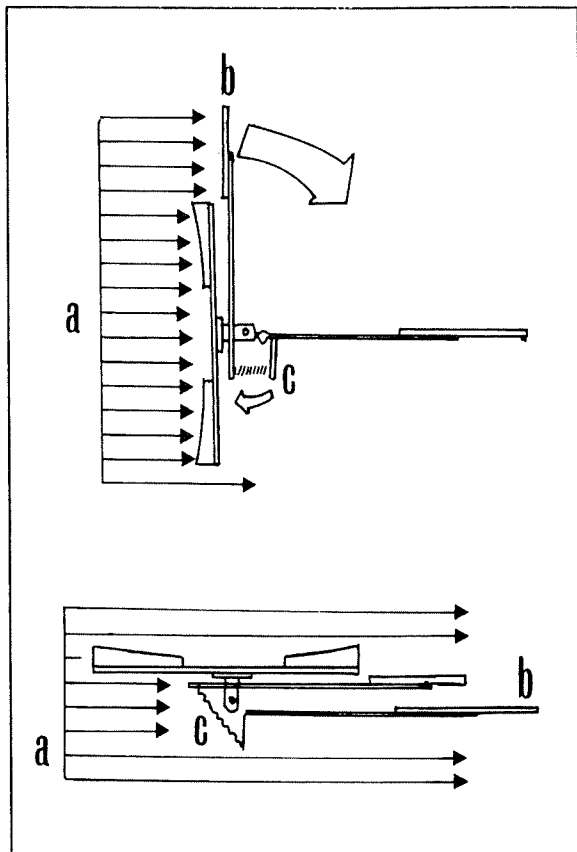


Figure 40: l'éolienne crétoise dispose de pales en toile que le paysan roule plus ou moins selon le vent

**Figure 41:**  
mise en drapeau d'une multipale par pale transversale. La force du vent (a) sur la pale additionnelle (b) entraîne, grâce à l'étirement du ressort (c), le déplacement de la roue vers une position parallèle au vent. C'est une position de sécurité quand le vent devient trop fort



## LES SPÉCIFICITÉS DE CHAQUE ROTOR

Chaque type de rotor présente des caractéristiques qui lui sont propres. Nous comparons ici deux rotors représentatifs des deux grandes familles d'éoliennes : éoliennes lentes et éoliennes rapides.

Les deux rotors ont tous deux 5 m de diamètre et travaillent de novembre à avril, pour couvrir une campagne de maraîchage par exemple.

- Birni N'koni, au Niger est un site faiblement venté et une multipale pompe plus d'eau qu'une hélice (sur l'ensemble de la campagne). Cette dernière en effet a des performances plus élevées mais ne sait pas exploiter les vents les plus fréquents du site (3 à 4 m/s) (fig.42 et 43).

- Nouadhibou, au bord de la côte mauritanienne est l'exemple d'un site bien venté qui justifie techniquement l'installation d'un rotor de type hélice.

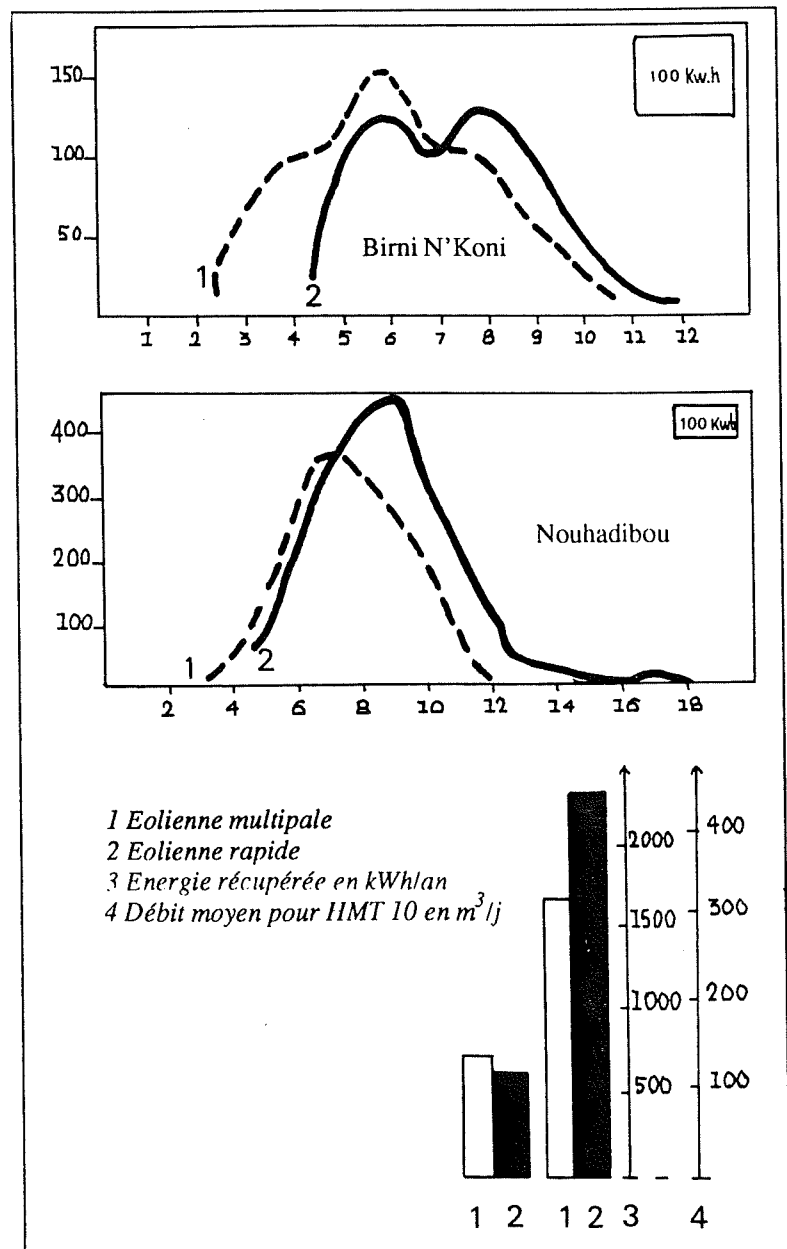


Figure 42: comparaison des caractéristiques des éoliennes lentes et rapides sur deux sites de vent

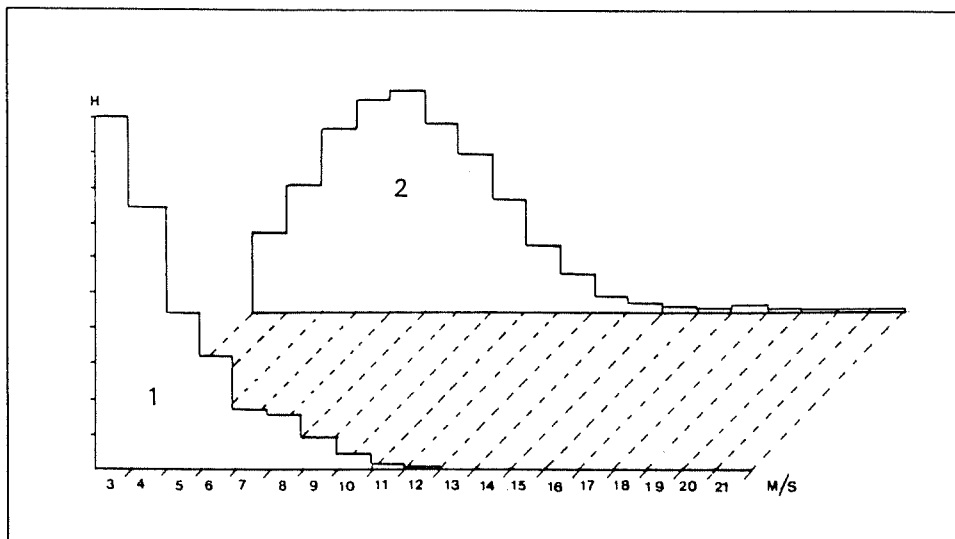


Figure 43: nombre d'heures de vent par plage de vitesse à Nouadhibou sur la période maraîchère (novembre à avril). Moyenne des années 1951-1955

1 Birni N'Koni

2 Nouadhibou

Pour un même diamètre, un rotor rapide fournit plus d'énergie, et donc plus d'eau, qu'un rotor lent. En effet, le rotor rapide valorise les vents forts (7m/s) les plus énergétiques. En revanche, le rotor lent démarre par vent faible (3m/s) et permet une fourniture d'eau plus régulière dans le temps (surtout dans les zones de vent moyen).

Multipale et aérogénérateur représentent deux technologies totalement différentes et les difficultés de maintenance dans les zones rurales isolées des pays en développement seront plus importantes pour l'aérogénérateur.

Moulin hollandais rapide 2-4 pales	Production d'électricité ou pompage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rotation rapide</li> <li>- faible couple</li> <li>- bon rendement</li> </ul>	Technologie assez avancée - coût élevé - quelques réalisations artisanales ont cependant été testées
Moulin américain multipale	Pompage	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rotation lente</li> <li>- couple élevé</li> <li>- rendement moyen</li> <li>- vent mini : 2-3 m/s</li> </ul>	Technologie simple voire rustique principe très ancien nombreuses réalisations artisanales coût généralement faible nombreuses références positives
Turbine multipale	Pompage ou électricité	<ul style="list-style-type: none"> <li>- rotation moyenne</li> <li>- couple élevé</li> <li>- rendement moyen</li> <li>- vent mini : 3-4 m/s</li> </ul>	Le coût est généralement faible et autoconstruction. Il existe de nombreuses versions dont certaines avec un déflecteur orientable.

**Tableau 8: classification des éoliennes les plus courantes selon le type de rotor**

## CHOISIR L'ASSOCIATION POMPE-ROTOR

Chaque type de rotor a des caractéristiques qui lui sont propres. Certaines associations éolienne/pompe sont donc moins judicieuses que d'autres, voire totalement impossibles.

### ■ DES ADAPTATIONS JUDICIEUSES

#### □ ADAPTATION DES COUPLES MOTEUR ET RÉSISTANT

Il s'agit essentiellement d'adapter le couple moteur et le couple résistant. Une turbopompe, dont le couple est nul au démarrage et croît en même temps que la vitesse de rotation, est bien adaptée à une éolienne "rapide" dont le couple moteur présente exactement les mêmes caractéristiques. Le couple résistant d'une pompe à piston est, quant à lui, fort au démarrage, puis constant; il convient mieux à une éolienne "lente" qui développe un bon couple au démarrage.

D'autre part, il faut garder à l'esprit que l'ensemble rotor/pompe tourne à une vitesse donnée pour un vent donné. Il faut faire en sorte que cette vitesse de rotation pour les vents les plus fréquents soit celle qui conduise au meilleur rendement.

Le problème est le même que celui qui se pose au conducteur d'une voiture en montagne par exemple. Celui-ci doit adapter la puissance du moteur à la charge (côtes). Il dispose pour cela d'une boîte de vitesses qui permet, à tout moment, d'ajuster le fonctionnement du moteur, pour une meilleure efficacité et une moindre consommation.

Dans le cas d'une éolienne toutefois, il y a deux différences de taille. Il n'y a ni conducteur, ni boîte de vitesses : on est toujours dans le même

rapport. Le "moteur" étant libre comme l'air, ses variations sont beaucoup plus importantes. Il faudrait, soit une adaptation totale et automatique, ce qui pose de sérieux problèmes et représente une des voies de recherche, soit un système permettant un réglage manuel journalier ou plutôt saisonnier qui constitue un compromis donnant le meilleur débit moyen.

### ADAPTATION DES VITESSES DE ROTATION

A une éolienne rapide tournant à 300 trs/mn ou plus, on couple une pompe rapide (1500 trs/mn).

A une éolienne lente, qui tourne entre 30 et 60 tours/mn, on peut adapter des pompes lentes à piston, soit en prise directe, soit avec un faible rapport de démultiplication. On a effectivement intérêt à éviter des grands rapports.

### DES TECHNOLOGIES PROCHES

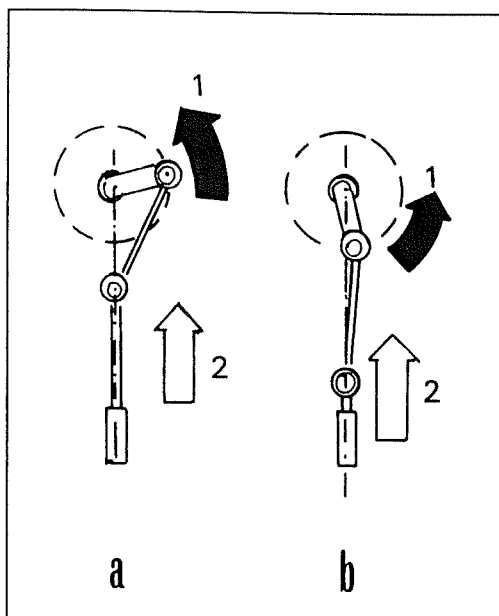
Les technologies utilisées pour la pompe et pour l'éolienne doivent rester les plus proches possibles. Ceci permet d'unifier le type de matériaux, le type d'entretien, le coût, et plus globalement l'attitude à adopter vis à vis du système de pompage.

## LES PRINCIPALES ASSOCIATIONS POSSIBLES

### ÉOLIENNE MULTIPALE - POMPE A PISTON

Le mouvement de rotation de la roue est transformé en mouvement alternatif par un système bielle-manivelle. De ce fait, l'effort à fournir, c'est à dire le couple résistant dû à la pompe varie énormément au cours d'une rotation : celui-ci est nul quand le bras de la manivelle est vertical et maximal quand il passe à l'horizontale (fig.44).

Figure 44:  
le système  
bielle-  
manivelle  
transforme  
le mouve-  
ment rotatif  
(la roue) en  
mouvement  
alternatif  
(la pompe)



*a le couple résistant est maximum*

*b le couple résistant est nul*

*1 Mouvement rotatif*

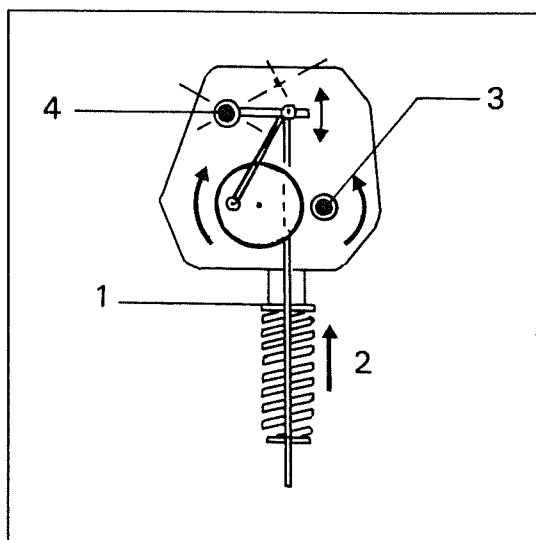
*2 Mouvement alternatif*

A vitesse très lente, c'est à dire au démarrage, c'est ce couple maximum qu'il faut vaincre. En cours de fonctionnement par contre, l'inertie de la roue absorbe ces écarts et on n'a plus à considérer qu'un

couple moyen résistant, égal au tiers du couple de démarrage.

On peut avantageusement faire en sorte que l'éolienne travaille autant à la montée qu'à la descente du piston : soit en installant une pompe à double effet, soit par un dispositif de ressort ou de contrepoids (fig.45). Ceci réduit alors de moitié la valeur du couple de démarrage à exercer : l'éolienne démarre par plus petits vents, tout en gardant le même débit par vent moyen.

Figure 45:  
un ressort  
réduit la  
valeur du  
couple de  
démarrage  
dans la  
transmission  
multipale  
sur pompe à  
piston



*1 Plaque de fixation du ressort*

*2 Sens de l'action du ressort sur la tige de commande*

*3 Axe de l'éolienne*

*4 Point fixe*



Le couple résistant moyen de l'éolienne en fonctionnement représente la charge (le "frein") de l'éolienne. Il est proportionnel à la hauteur de pompage et à la cylindrée de la pompe.

On se borne à dimensionner la pompe pour la valeur de la vitesse du vent nominale choisie. Tout le problème est de bien déterminer cette valeur. On prend celle qui permet à l'éolienne de tourner 50% du temps (par exemple 5m/s, si l'ensemble des vents de 5m/s et plus, souffle la moitié du temps). Il faut toutefois adapter cette règle selon les sites et les régimes de vent. Souvent, une pompe sous-dimensionnée permet à l'éolienne de tourner tout le temps mais pour un débit/jour finalement très faible.

Selon Dixon (Open University - 1978), on peut également agir comme suit : la pompe est dimensionnée pour une vitesse de vent de 1,5 fois la vitesse moyenne annuelle (ou vitesse moyenne sur la période) sur le site.

Dans la pratique, ce dimensionnement est réalisé par le constructeur en fonction des indications qui lui sont fournies. Quand il s'agit de réaliser le dimensionnement soi-même, on réalise un premier calcul théorique pour une vitesse de vent moyenne que l'on a au préalable estimée (tab.6).

Le couplage éolienne multipale - pompe à piston n'est pas très satisfaisant en théorie car il ne permet de récupérer que peu de puissance.

Toutefois, il possède le grand avantage de présenter un système robuste, simple, une technologie éprouvée depuis 150 ans et même beaucoup plus, si l'on songe aux éoliennes crétoises à voiles. Ses éléments sont faciles à mettre en oeuvre, faciles à réparer. Rustique, il est d'une technologie à portée d'auto-constructeurs, d'artisans ou de petits ateliers. Il a en outre, le grand avantage de travailler par petit vent ce qu'une hélice ne fait pas.

Faute de mieux, il s'agit de l'association aujourd'hui la plus fréquente et la plus fiable.

#### *Calcul de dimensionnement*

*Hypothèses :*

*Taille de l'éolienne = roue de 3m de diamètre*

*Vitesse de vent à exploiter = 5m/s.*

*Profondeur de l'eau sur le site = 10m.*

*Masse volumique de l'air = 1,25 kg/m<sup>3</sup>*

Puissance théorique =

$$\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 = \frac{1}{2} (1,25)(\pi \cdot 1,5^2)(5^3) = 551 \text{ W}$$

Nous considérons un rendement global du système (éolienne + pompe) de 15%. Nous avons ainsi la puissance utile du système. Dans tout le reste du calcul, nous ne prenons en compte que les efforts utiles (les efforts réels sont en fait plus importants, la différence se dissipant dans les frottements).

Puissance hydraulique réelle ( $P_{hyd}$ ) =

$$\frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V^3 \times 0,15 = 83 \text{ W}$$

La puissance hydraulique étant aussi donnée par :

$$P_{hyd} = 9,81 \cdot Q \cdot H$$

où  $Q$  est le débit et  $H$  la hauteur manométrique, on en déduit

$$Q = \frac{P_{hyd}}{9,81 \times H}$$

Pour trouver  $H$  aux 10m, nous ajoutons 1m pour la hauteur du bassin et 1m pour prendre en compte le rabattement de l'eau dans le puits,

donc  $H = 12\text{m}$

$$\text{soit } Q = \frac{83}{9,81 \times 12} = 0,7 \text{ l/s}$$

Ainsi nous savons qu'un vent de 5m/s doit nous donner à 12m un débit de 0,7 l/s. Il s'agit d'un bon débit pour ce type de matériel.

L'éolienne tourne environ à 50 trs/minute (N). La cylindrée de la pompe doit donc être :

$$\text{cylindrée} : \frac{Q \times 60}{N} = \frac{0,7 \times 60}{50} = 0,84 \text{ l} = 840 \text{ cm}^3$$

La surface du piston (S) dépendra de la course que nous allons retenir, si celle-ci est de 20 cm par exemple :

$$S = \frac{840}{20} = 42 \text{ cm}^2$$

Ceci signifie qu'il faut un corps de pompe de 70 mm de diamètre intérieur.

Revenons-en aux efforts réels pour dimensionner le contrepoids. La force (F) à développer pour faire monter le piston est :

$$F = 1,5 \cdot \frac{H \cdot S}{10}$$

$$F = 1,5 \cdot \frac{12,42}{10} = 75 \text{ kg}$$

A ce chiffre, il faut ajouter ou retrancher le poids des tringleries selon le montage. Le contrepoids destiné à faciliter le démarrage sera donc d'une quarantaine de kilos (37,5 kg). A ce contrepoids correspond un couple réel résistant maximum de 3,75 m.kg, soit, pour une vitesse de rotation de 50 trs/mn, une puissance réelle moyenne fournie à la roue de l'éolienne de 180 W.

Une fois le montage réalisé, on vérifie que l'effort est le même sur chaque demi-tour, au démarrage. En fait, comme la vitesse est lente, il est possible qu'il faille alléger le contrepoids. La présence de ce dernier est importante au démarrage seulement. Pour les vents plus forts, l'inertie du rotor rend son action inutile.

Il reste à tester divers réglages de la cylindrée de part et d'autre de cette valeur théorique de 840 cm<sup>3</sup>, et à constater à quel moment la production journalière est la meilleure. En effet, nous avons pris comme vitesse de vent nominale 5 m/s. Mais nous ne savons pas exactement si c'est ce dimensionnement qui donne le meilleur débit/jour, et c'est ce qu'il faut affiner par l'expérience.

DÉBITS, ordres de grandeur :

Sur site faiblement venté, pour une profondeur de pompage de 10m, compter :

- 200 l/h d'eau pompée par  $m^2$  de surface balayée  
ou
- 1 à 2  $m^3$ /jour/ $m^2$

Ce débit est inversement proportionnel aux profondeurs.

## COUPLAGE ÉLECTRIQUE

Il s'agit d'associer un aérogénérateur qui produit du courant électrique à une pompe électrique classique du commerce. Plusieurs cas de figures sont possibles pour la transmission.

- Pour des rotors supérieurs à 2m de diamètre, prévoir un multiplicateur, entre le rotor et la génératrice, pour augmenter la vitesse de rotation.
- Avec une génératrice asynchrone, le courant alternatif doit alimenter un réseau (même local), le moteur de la pompe est couplé sur ce réseau.  
En revanche, avec un alternateur synchrone, le courant (220/380 V, 50 Hz) peut alimenter directement le moteur.
- Enfin, s'il s'agit d'une dynamo, on produit du courant continu utilisable de deux manières :
- le moteur (et donc la pompe) est alimenté directement "au fil du vent"; on stocke l'eau pour les périodes sans vent suffisant ;
- des batteries stockent l'énergie, un régulateur de charge est placé entre ces batteries et la dynamo, le moteur s'alimente sur ces batteries.

Le principal avantage d'un aérogénérateur est de pouvoir être installé hors du point d'eau, sur un point mieux venté, et de pouvoir remplacer le stockage d'eau par le stockage d'énergie.

Mais il présente des inconvénients :

- le rendement de la transmission (multiplicateur, génératrice, batteries, moteur) est faible : de 0,4 - 0,5 avec des batteries, à 0,65 en courant continu "au fil du vent", contre 0,8 - 0,85 pour le système bielle-manivelle,
- cette installation exige des dispositifs de sécurité (disjoncteur, fusibles ...) et des matériels de transport (câbles, poteaux) coûteux,
- la maintenance demande plus de compétences qu'une transmission mécanique, ainsi qu'un outillage plus sophistiqué. Elle est donc plus coûteuse et souvent plus difficile à assurer dans des zones rurales isolées et mal équipées.

Le couplage aérogénérateur-pompe électrique permet d'utiliser des puissances beaucoup plus élevées que dans le cas des multipales. On trouve aujourd'hui sur le marché des matériels fiables. Des installations ont été réalisées en Chine, en Inde et au Kenya...Mais la maintenance exigera toujours plus de compétences que les multipales avec pompes à piston. Elle sera donc plus difficile dans les zones rurales trop isolées.

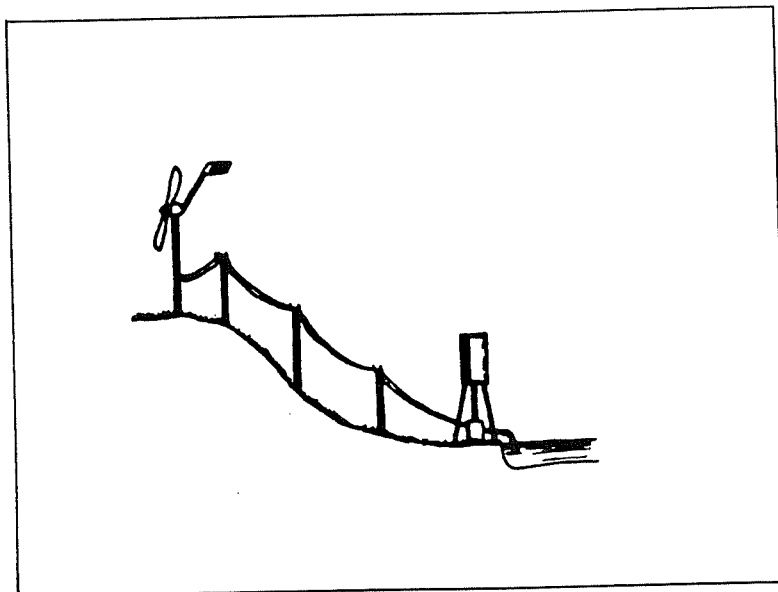


Figure 46: couplage électrique

# Installer une éolienne de pompage

# 3

	page
<b>Identifier les besoins</b>	76
<b>Évaluer les besoins de pompage</b>	76
L'hydraulique villageoise	76
L'hydraulique pastorale	77
L'irrigation	78
Les besoins familiaux individuels	78
L'assainissement ou relevage	79
<b>Calculer le stockage de l'eau</b>	80
<b>Assurer le fonctionnement</b>	83
<b>Prévoir la maintenance</b>	83
L'entretien technique	83
Le financement de la maintenance	84
<b>Favoriser l'insertion sociale et économique</b>	85
L'appropriation par les villageois	85
Évaluer les impacts économiques	85

---

<b>Choisir les matériels</b>	89
<b>Dimensionner l'éolienne</b>	89
<b>Choisir la pompe</b>	93
<b>Choisir le type d'éolienne</b>	94

Le choix d'un système de pompage résulte du type de besoins à satisfaire, des points d'eau à équiper, du vent et de l'environnement économique et social.

Tous ces points sont à étudier pour savoir si l'éolienne est la solution à retenir et quelle éolienne choisir.

Le site d'installation doit bien entendu être suffisamment venté : une vitesse moyenne supérieure ou égale à 3 m/s pendant la période d'utilisation désirée est conseillée.

Pour plus de détails sur les mesures, voir le chapitre 1.

Des données sur le vent peuvent être obtenues auprès de :

Météorologie Nationale (pour la France)  
2 Avenue Rapp  
75007 Paris

ASECNA (pour France et Afrique francophone)  
75 Rue de la Boétie  
75008 Paris  
Tél.43.59.49.40  
ou BP 3144  
Dakar  
SÉNÉGAL  
Tél.: 23 1040

Organisation Météorologique Mondiale  
41 av. Giuseppe Motta  
1211 Genève 20  
SUISSE  
Tél.: 34 64 00



## IDENTIFIER LES BESOINS

### ÉVALUER LES BESOINS DE POMPAGE

Il faut évaluer pour chaque cas:

- le volume nécessaire par heure ou par jour,
- le volume minimal indispensable, en particulier pour supporter les périodes sans vent ; sur quelle durée sont-elles tolérables ?
- la répartition des besoins dans l'espace et dans le temps,
- les contraintes particulières.

Pour vous guider, nous avons distingué cinq grands types de besoins :

- l'hydraulique villageoise collective,
- l'hydraulique pastorale,
- l'irrigation, villageoise et de grandes surfaces,
- les besoins familiaux individuels,
- l'assainissement ou relevage.

Dans aucun cas, on ne peut pomper plus d'eau que le puits n'en débite.

### L'HYDRAULIQUE VILLAGEOISE COLLECTIVE

Objectif :

mettre à la disposition des villageois une eau saine en quantités suffisantes pour couvrir les besoins humains et les besoins de quelques animaux domestiques sédentaires.

Quantités :

20 l/habitant/jour au moins, non compris les animaux (voir ci-dessous les besoins des animaux).

Contraintes :

- il faut avoir un approvisionnement régulier toute l'année, donc prévoir un réservoir et un pompage d'appoint pour les jours sans vent, et si possible, un accès libre au point d'eau,
- la fiabilité doit être excellente car les sites sont généralement isolés,
- le coût initial peut être un peu élevé si l'entretien est réduit et la fiabilité bonne,
- il faut prévoir des aménagements pour que l'eau pompée reste propre,
- le pompage se fait souvent sur des puits ou des forages de plus de 15 mètres de profondeur.

## L'HYDRAULIQUE PASTORALE °

\*voir  
bibliographie 1  
p. 96

Objectif :  
mettre à la disposition des éleveurs nomades ou sédentaires des points d'eau adaptés à l'abreuvement du bétail.

Quantités :  
40 l/bovin/jour et 5 l/ovin-caprin/jour.

Contraintes :

- la fiabilité doit être excellente car les sites sont très isolés,
- il faut prévoir un système d'appoint,
- le coût de l'eau est à comparer aux revenus de l'éleveur,
- les besoins sont très concentrés dans le temps (à l'arrivée des troupeaux),
- dans le cas de troupeaux nomades, les besoins sont concentrés sur la saison sèche et il est difficile d'identifier les responsables et donc de gérer l'équipement,
- les puits ou forages sont profonds à très profonds (jusqu'à 100 à 200 m).

## L'IRRIGATION °

\*Voir  
bibliographie 2  
p. 96

### Objectif :

pour les cultures maraichères, les céréales (riz) ou les cultures de rente. On distingue les petits périmètres irrigués (PPI) inférieurs à 10 ha (irrigation villageoise) et les grands périmètres (GPI) de une à plusieurs centaines d'hectares.

### Quantités:

elles varient avec les cultures, le nombre de récoltes par an, le stade cultural, le sol et le climat. On évalue généralement les besoins à 50 à 80 m<sup>3</sup>/ha/j pour la plupart des cultures, et jusqu'à 150 m<sup>3</sup>/ha/j pour le riz.

### Contraintes :

- l'eau est en général abondante et peu profonde,
- le coût du mètre-cube d'eau pompée doit être compétitif par rapport aux motopompes et faible, compte tenu des prix agricoles,
- le pompage s'effectue surtout pendant les mois de saison sèche,
- la présence fréquente des utilisateurs permet d'assurer plus facilement la maintenance.

## LES BESOINS FAMILIAUX INDIVIDUELS

### Objectif :

permettre le pompage dans un puits familial, ou un cours d'eau, pour les besoins domestiques et le jardinage.

### Quantités :

0,6 à 0,9 m<sup>3</sup>/are/jour et 20 l/personne/jour (1 are = 100 m<sup>2</sup>)

### Contraintes :

- les puits sont peu à moyennement profonds (10 à 25 m),
- le matériel doit être solide et simple,
- le transport doit être facile,

- le prix d'achat est le facteur limitant essentiel.

## ▭ L'ASSAINISSEMENT OU RELEVAGE °

\*Voir  
bibliographie 3  
p. 96

Objectif :  
évacuer les excédents d'eau des grands périmètres irrigués collectés dans un canal principal (ex : riziculture).

Quantités :  
2 à 3 l/s/ha sur une faible profondeur, soit 7 à 10 m<sup>3</sup>/h/ha.

Contraintes :

- l'eau est superficielle,
- les quantités à pomper sont très irrégulières dans l'année,
- les points de pompage sont isolés,
- l'eau est chargée d'éléments en suspension.

Usages	Quantités/jour	Profondeur	Besoins (m.m <sup>3</sup> /j)
hydraulique villageoise collective	10 m <sup>3</sup> pour 500 habitants	15 à 100 m	150 à 1000
hydraulique pastorale	8 m <sup>3</sup> pour 200 bovins	50 à 200 m	400 à 1500
besoins familiaux individuels	3 m <sup>3</sup> pour 10 pers + 3 ares	10 à 25 m	30 à 75
irrigation	50 à 150 m <sup>3</sup> /ha	10 m	500 à 1500/ha
assainissement	7 à 10 m <sup>3</sup> /ha/heure	4 m	700 à 1000/ha

Tableau 9: récapitulatif des principaux besoins de pompage

## ■ CALCULER LE STOCKAGE DE L'EAU \*

\*Voir  
bibliographie 4  
p. 96

Lors du calcul des besoins en eau, on doit prévoir la période de non fonctionnement de la pompe due aux jours sans vent. Cette période pendant laquelle l'éolienne ne fonctionne pas dépend de la vitesse nominale du vent qui a été choisie au départ. Il existe des fonctions statistiques permettant de connaître approximativement cette période (distribution de Rayleigh). Une bonne connaissance du climat local donne déjà une idée sur ces périodes sans vent.

Pour un approvisionnement sûr, on calcule le volume de stockage sur 8 jours, donc un volume de 8 fois la consommation journalière du village à approvisionner.

Le coût d'un grand réservoir étant rapidement prohibitif, on se contente généralement de 3 à 4 jours de stockage. Tout dépend des incidences du manque d'eau et des possibilités de pompage complémentaire.

Pour la petite irrigation, un bassin de stockage de quelques mètres-cube (à quelques dizaines de mètres-cube pour les grosses éoliennes) est toujours utile. En effet, on a besoin d'être présent, lorsque l'eau est distribuée dans les cultures, afin d'en contrôler les quantités et le débit. D'autre part, pour les petites éoliennes, le débit instantané est faible. L'eau s'écoule très lentement dans les canaux et les pertes par infiltration sont importantes.

On distingue trois types de réservoirs :

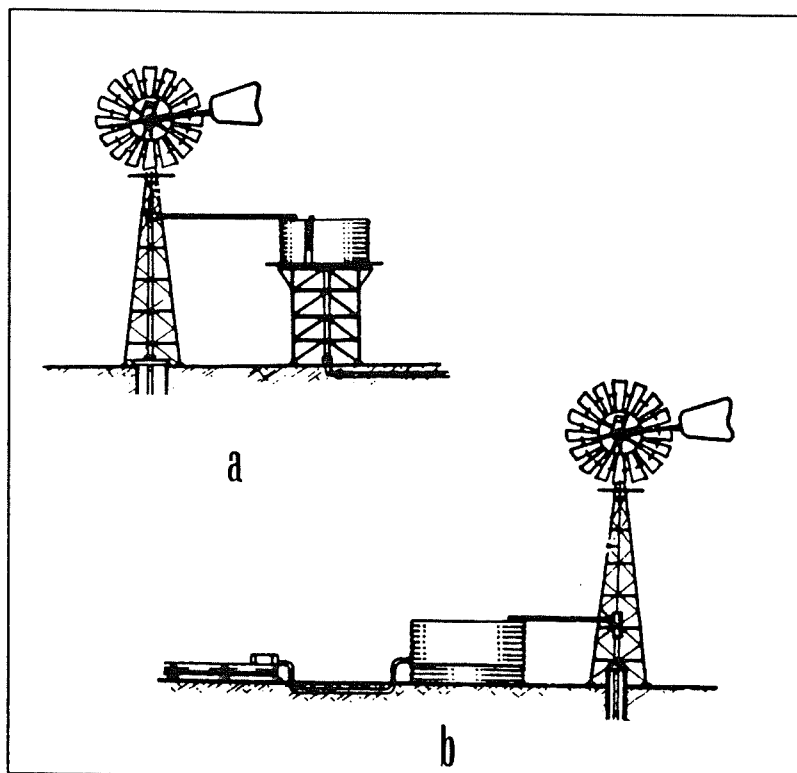
- **le château d'eau** : c'est le réservoir le plus cher à réaliser. Il ajoute sa hauteur à la hauteur manométrique. Il nécessite généralement l'emploi d'un presse-étoupe\* permettant à l'eau d'être refoulée plus haut que la commande de pompe. Il est toutefois indispensable, quand on désire alimenter, par système de canalisation, des robinets éloignés du point d'eau ou surélevés par rapport à celui-ci (fig.47).
- le réservoir intégré au pylône de l'éolienne, solution élégante qui en diminue le coût et qui a pour rôle, en outre, de stabiliser l'éolienne aux vents violents. On évite aussi le presse-étoupe.

\*Presse-étoupe :  
bague  
d'étanchéité sur  
la tige de  
commande

- le réservoir au sol, les solutions sont multiples :

- \* réservoir plastique contenu dans une enceinte métallique,
- \* bassin en tôle,
- \* bassin avec dalle en béton armé,
- \* bassin en parpaings de ciment avec chaînage et poteaux en béton armé,
- \* bassin en pierre et ciment (murs épais 60 cm),
- \* petit bassin en ferro-ciment ; ciment jeté sur un grillage à poules, rond, contenu ou non dans une enceinte de brique,
- \* bassin de type Botswana, simple feuille de polyéthylène recouvrant une fosse ou une citerne, bassins de type sac à eau qui sont des réservoirs plastiques enterrés,
- \* bassin en banco avec grillage à poules et enduit ciment sur les deux faces.

**Figure 47:**  
*a le  
stockage  
par  
château  
d'eau  
augmente  
la HMT  
b stockage  
par  
réservoir  
au sol*



Tout type de stockage est relativement cher et c'est un poste à ne pas négliger dans les études de coût. On a généralement intérêt à concevoir plutôt plusieurs petits bassins qu'un très grand qui dépasserait les compétences des entrepreneurs locaux. Pour l'eau à usage domestique, le réservoir est de préférence fermé, muni de filtres sur les orifices et on prévoit l'aménagement d'un trou d'homme pour permettre un nettoyage manuel.

S'il n'existe pas, à proximité, d'autres points d'eau utilisables pour le même usage, il est préférable de prévoir un système de pompage d'appoint. Le moins coûteux est de prévoir un accès manuel à l'eau, ce qui est impossible pour le forage. Pour le puits, il faut faire attention à ne pas accrocher la pompe (décentrer l'éolienne par rapport au puits).

## ASSURER LE FONCTIONNEMENT

### ■ PRÉVOIR LA MAINTENANCE

La maintenance est aussi essentielle que le vent au bon fonctionnement d'une éolienne. Elle doit être envisagée sur les plans technique et financier.

### □ L'ENTRETIEN TECHNIQUE

La maintenance est à prévoir à deux niveaux :

- la surveillance régulière de l'éolienne : prévenir le réparateur, graisser ou arrêter les éoliennes mécaniques. Elle peut être assurée par un utilisateur intéressé doté d'une rapide formation.
- les réparations : sur les éoliennes mécaniques, un artisan (niveau mécanique agricole ou auto) peut intervenir après avoir été formé à cet effet. Sur les aérogénérateurs, un technicien électromécanicien est indispensable.

Pour organiser ces interventions et la formation à apporter aux réparateurs, il faut évaluer :

- le niveau de compétences techniques des utilisateurs, des artisans villageois, des artisans urbains,
- la distance du (ou des) site(s) à laquelle se situent ces artisans et leurs moyens de déplacement,
- l'outillage dont ils disposent et leurs moyens d'approvisionnement à l'extérieur. Un commerçant local, ou régional, peut-il être fournisseur en pièces détachées ? Le commerce des pièces détachées, la for-



mation et la motivation des réparateurs ne seront possibles que si le marché est suffisant, c'est-à-dire si plusieurs dizaines de machines sont présentes dans les 50 à 100 km alentour. Les différents éléments de la pompe et le ressort sont les principales pièces détachées qui doivent être disponibles localement pour les éoliennes multipales.

## LE FINANCEMENT DE LA MAINTENANCE

Le coût de la maintenance doit être pris en charge par les utilisateurs pour que les éoliennes aient une chance de fonctionner à moyen terme.

Le coût de la maintenance s'estime en fonction :

- du prix moyen et maximal d'une réparation (à partir du prix des pièces détachées),
- des coûts de main d'oeuvre et de déplacement, dans la région considérée,
- de la fréquence possible des pannes, selon la technicité et la fiabilité réellement éprouvées du matériel retenu.

Les moyens et modes de financement s'estiment en fonction :

- des sources de revenus des usagers et de leurs disponibilités monétaires (sont-elles constantes ou non ?)
- de l'usage de l'eau et de sa rentabilité,
- de la place du pompage mécanisé parmi l'ensemble des besoins. Les utilisateurs sont-ils motivés pour cette dépense ?
- en cas d'utilisation collective, le groupe doit envisager son propre système de gestion (paiement forfaitaire par famille ou proportionnel à la consommation, système mixte, paiement en fonction des revenus...) avant d'engager l'acquisition du matériel.

## FAVORISER L'INSERTION SOCIALE ET ÉCONOMIQUE

### L'APPROPRIATION PAR LES VILLAGEOIS

A partir des expériences antérieures, un certain nombre de recommandations peuvent être formulées bien qu'il n'existe pas de règles en la matière.

Les utilisateurs doivent définir clairement leurs besoins et choisir l'éolienne en connaissant ses avantages et ses inconvénients. Il est souhaitable qu'ils participent concrètement à son installation par leur apport financier ou en travail et indispensable qu'ils prennent en charge la maintenance. Les modes et moyens de financement de l'investissement comme de la maintenance doivent être définis au préalable.

Mais si l'appropriation technologique par les utilisateurs est à favoriser au maximum, cela ne signifie pas qu'ils doivent tout faire eux-mêmes (fabrication ou entretien).

L'éolienne remplace le plus souvent un système traditionnel, en général manuel ou à traction animale. Les bouleversements sociaux (rapports hommes-femmes, aînés-cadets, artisans-paysans...) qu'elle risque d'engendrer ne sont pas négligeables. Les appréhender et en discuter peut permettre de désamorcer des conflits.

Enfin le matériel retenu ne doit pas être un prototype en cours d'essai qui risque de décevoir. L'utilisateur n'est pas un expérimentateur !

### ÉVALUER LES IMPACTS ÉCONOMIQUES

Si la rentabilité économique est un critère décisif dans le choix d'une éolienne comme système de pompage, d'autres facteurs sont cependant à considérer. Ainsi les éléments techniques, sociaux, environnementaux sont autant à prendre en compte que le prix du mètre-cube pompé. En effet, ce dernier varie trop avec les facteurs pris en compte pour avoir la valeur objective et définitive qu'on lui donne trop souvent.

Par ailleurs, les impacts économiques sont à considérer à plusieurs niveaux, du pays à l'utilisateur.

### Sur le plan national

Il faut considérer :

- le coût ou l'économie en devises du choix effectué :  
une éolienne importée coûte plus cher en devises qu'une éolienne fabriquée localement, mais procure des taxes à l'Etat. L'économie de devises avec une éolienne fabriquée localement n'est toutefois pas égale à son coût, il faut en déduire les matériaux importés.  
L'une comme l'autre ont l'avantage d'économiser à l'économie nationale les frais d'une énergie généralement importée.
- le développement économique :  
la création d'emplois, la formation technique, l'augmentation du PIB (par création d'une valeur ajoutée nationale supplémentaire) seront favorisées par la fabrication locale des éoliennes.

### Au niveau de l'utilisateur

L'investissement initial comprend l'achat de l'éolienne (8 000 à 15 000 FF départ usine en France pour une multipale de 2,5 à 4 m de diamètre), mais aussi le transport jusqu'au site, l'installation, les équipements de stockage, et éventuellement un recreusement du puits pour avoir une hauteur d'eau suffisante. Au total et à titre indicatif, dans le cas d'une éolienne multipale de 3 m de diamètre, l'éolienne installée peut coûter 2,5 fois le prix d'achat au départ de l'usine en France. Cependant une éolienne autoconstruite, utilisée pour l'irrigation sans bassin de stockage, peut coûter moins de 5 000 FF et un grand aérogénérateur dépassera les 200 000 FF.

Mais ce coût initial n'a pas la même signification pour un particulier, une communauté villageoise ou les pouvoirs publics. Un particulier préfère une petite machine même si le coût théorique du mètre-cube d'eau produit est plus élevé.

Le coût d'entretien comprend les pièces détachées, la main d'oeuvre et son déplacement. La disponibilité en pièces et en personnel formé à cet effet sur place réduit notablement ce coût.

Il varie toutefois considérablement en fonction de :

- la fiabilité de la machine : trop économiser en investissement augmente l'entretien, surtout dans les régions isolées ou mal approvisionnées,

- du site : en bord de mer, si le métal n'est pas galvanisé, la peinture peut représenter une part majeure de l'entretien,
- de la technologie: un aérogénérateur demande une main-d'oeuvre plus qualifiée et plus rare dans les pays en voie de développement qu'une éolienne à transmission mécanique.

Le prix maximal d'une réparation est un critère important. Une machine industrielle peut être plus fiable, mais le prix d'une seule réparation risque d'atteindre un niveau élevé insupportable pour un usager individuel. Une machine moins fiable, aux pannes plus fréquentes mais moins coûteuses, peut être préférable. On doit donc s'assurer que les pièces détachées les plus importantes sont d'un coût supportable pour l'utilisateur et qu'elles sont disponibles facilement. Ainsi la seule pompe à piston d'une petite multipale atteint environ 500 FF départ usine en France.

La durée de vie en heures de fonctionnement effectif dépend de la robustesse et de la fiabilité de l'éolienne : les multipales industrielles sont, pour la plupart, plus robustes et plus éprouvées (mais moins performantes) que les aérogénérateurs. Les éoliennes autoconstructibles ou/et en matériaux locaux sont souvent moins robustes, mais aussi moins coûteuses.

Ceci est toutefois à relativiser car :

- une machine construite par l'utilisateur ou un artisan proche peut être souvent en panne mais rapidement réparée;
- une entreprise nationale de fabrication peut fournir des pièces détachées plus rapidement que l'étranger... mais pas forcément, surtout si ce n'est pas une activité essentielle pour elle;
- l'isolement d'une installation fait augmenter significativement la durée des pannes. En général, une installation ponctuelle aura toujours plus de difficultés de maintenance que des installations nombreuses dans la même région;
- l'usage de l'eau : l'irrigation exige une eau abondante, sans interruption sur une période donnée, et rentable par rapport aux prix agricoles ; alors que pour les besoins domestiques, la fourniture d'eau doit être régulière sur l'année, la fiabilité du système de pompage étant souvent prioritaire sur le coût.

Nous conseillons la méfiance vis à vis du calcul du coût du mètre-cube pompé. Néanmoins, le calcul suivant réalisé par I.T POWER en 1987

pour la Mauritanie présente l'intérêt de limiter la subjectivité du résultat en faisant varier plusieurs des principaux facteurs de ce coût (tableau 10).

<b>Eolienne :</b>		
Coût de l'éolienne installée		21 660 FF
Coût de maintenance (main d'oeuvre)		600 FF/an
Durée de vie		20 ans
<b>Pompe diesel :</b>		
Coût de la pompe diesel installée		18 000 FF
Durée de vie		40 000 heures
Durée de fonctionnement par jour		2 heures
Révision toutes les 10 000 heures		1 800 FF
Maintenance toutes les 125 heures		60 FF
Coût d'un pompiste à temps partiel		2 400 FF/an
Coût du litre de gazole		2,76 FF/l
Rendement global de la pompe (du gazole au pompage)		6%
<b>Général :</b>		
Taux d'intérêt		5%
Durée de vie du projet		20ans
L'analyse pratiquée simule les coûts durant la durée de vie d'une éolienne et d'une pompe diesel. Le coût total est ensuite ramené à un coût annuel puis à un coût au mètre cube pompé.		
Les coûts de fabrication du puits ne sont pas pris en compte. La pompe diesel considérée est un groupe électrogène couplé à une pompe électrique immergée. La hauteur de pompage est de 20 m.		
<b>Résultats en hydraulique villageoise :</b>		
Volume d'eau pompée par an :	5 895 m <sup>3</sup>	4 700 m <sup>3</sup>
Coût de l'eau par éolienne	0,40 F/m <sup>3</sup>	0,50 F/m <sup>3</sup>
Coût de l'eau par diesel	0,96 F/m <sup>3</sup>	
<b>Résultats en irrigation:</b>		
Coût de l'eau par éolienne	0,38 F/m <sup>3</sup>	
Coût de l'eau par motopompe	0,67 F/m <sup>3</sup>	

Tableau 10: comparaison des coûts du mètre-cube éolienne et diesel en hydraulique villageoise et maraîchage à Rosso en Mauritanie

## CHOISIR LES MATÉRIELS

### DIMENSIONNER L'ÉOLIENNE

#### Calcul théorique

La puissance hydraulique nécessaire, compte tenu de tous les rendements, est déterminée par les besoins en eau :

$$P = g \times Q \times H$$

où  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$   
 $Q = \text{débit en l/s}$   
 $H = \text{HMT en m}$   
 $P = \text{puissance en W}$

avec  $Q$  en  $\text{m}^3/\text{h}$ , la formule devient :

$$P = 9,81 \times 0,278 \times Q \times H$$

soit  $P \text{ (watts)} = 2,725 \cdot Q(\text{m}^3/\text{h}) \times H(\text{m})$ . (1)

Or la puissance fournie par une éolienne (y compris rendement de la pompe) se définit par :

$$P = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot V^3 \cdot C_p \cdot r \quad (2)$$

où  $P = \text{puissance en W}$   
 $\rho = \text{masse volumique de l'air (1,21 kg/m}^3\text{)}$   
 $D = \text{diamètre de l'éolienne, en m}$

$$\frac{\pi \cdot D^2}{4} = \text{surface du rotor}$$

$V = \text{vitesse du vent, en m/s}$

$C_p = \text{coefficient de performance (voir chapitre 1)}$

$r = \text{rendement de la pompe.}$

On déduit le diamètre de l'éolienne de ces deux formules.

$$D^2 = \frac{8P}{\rho \cdot V^3 \cdot C_{p,r} \cdot \pi} = \frac{8 \cdot 2,725 \cdot Q \cdot H}{\rho \cdot V^3 \cdot C_{p,r} \cdot \pi} = \frac{21,8 \times Q \cdot H}{3,925 \cdot V^3 \cdot C_{p,r}}$$

#### Exemple de calcul pour multipales.

Nous présentons ici, à titre indicatif, un calcul de dimensionnement pour des éoliennes multipales. Ces éoliennes sont actuellement les plus utilisées pour le pompage et celles dont on connaît le mieux les performances.

Si on prend comme moyenne, la vitesse du vent calculée sur 8760 heures/an (voir calcul de la moyenne dans le chapitre 1), alors (1) devient :

$$P = \frac{2,75}{24} \cdot Q \cdot H \quad (3)$$

où  $P$  = puissance en W  
 $Q$  = débit en  $m^3/j$   
 $H$  = HMT en m

- Pour les multipales, des observations montrent que la puissance peut s'exprimer, compte tenu des rendements, selon la formule :

$$P = 0,1 \cdot D^2 \cdot V^3 \quad (4)$$

où  $P$  = puissance en W  
 $D$  = diamètre en m  
 $V$  = vitesse moyenne en m/s

Si l'éolienne a des caractéristiques de rendement différentes, cela modifie cette expression de la puissance et donc les résultats suivants. Reprendre alors les formules générales du chapitre 1.

- De 3 et 4, on déduit que :

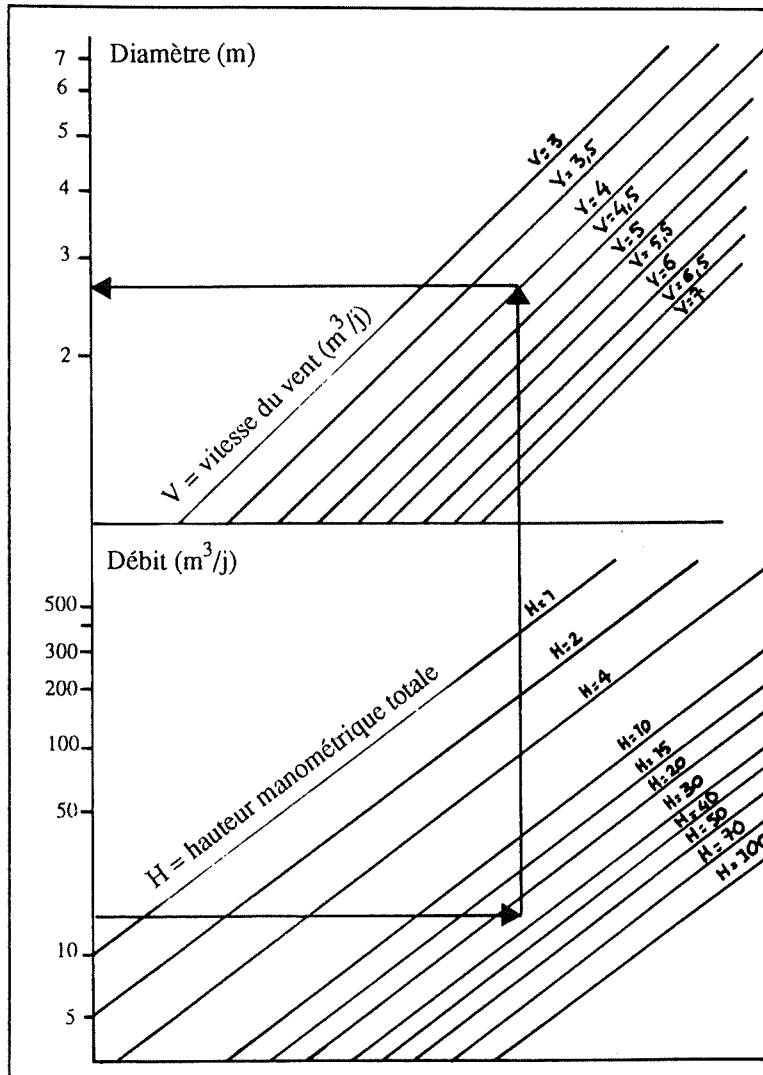
$$D = \frac{P}{0,1 \times V^3} = \frac{2,75 \times Q \times H}{24 \times 0,1 \times V^3} = 1,146 \frac{Q \times H}{V^3}$$

et donc :

$$\log D = 0,5 \log Q \cdot H - 1,5 \log V + 0,03$$

Cette formule nous permet de tracer les graphiques 1 et 2 (fig.48) selon une échelle logarithmique.

**Figure 48:**  
graphiques  
indicatifs de  
détermina-  
tion du  
diamètre  
d'une  
multipale en  
fonction des  
besoins de la  
HMT et de  
la vitesse du  
vent.



Le graphique 1 donne le diamètre nécessaire pour des besoins exprimés en  $m \times m^3/j$ , et ce pour plusieurs vitesses moyennes de vent calculées sur 24 h/j.

Le graphique 2 prend en compte la hauteur manométrique de pompage : quand on connaît le débit nécessaire et la HMT, on déduit les besoins en  $m \times m^3/j$  et donc le diamètre dans (1).



**Exemple :**

Prenons le cas d'un village de 700 habitants de la région de Rosso en Mauritanie.

- Les besoins en hydraulique villageoise sont de  $14 \text{ m}^3/\text{jour}$ .
- La hauteur manométrique totale est de 20 mètres.
- La vitesse moyenne du vent sur l'année est de 4 m/s.

On choisit alors une multipale de 2,5 à 3 mètres de diamètre. On doit prévoir une marge pour avoir une fourniture d'eau suffisante pendant les périodes de vent faible ou nul.

**Remarques**

Une éolienne qui démarre par vents faibles (2,5 à 3,5 m/s) fonctionne plus souvent mais fournit moins d'eau puisque l'énergie, donc le débit, est proportionnelle au cube de la vitesse. Le choix est à faire en fonction de l'usage et des contraintes de stockage.

Théoriquement, pour une même vitesse de vent et un même diamètre, l'aérogénérateur fournit plus d'eau ; mais dans la pratique, on ne dispose pas d'éoliennes rapides ayant une vitesse nominale inférieure à 7m/s, c'est à dire fonctionnant avec les vents les plus fréquents.

Le diamètre est volontairement limité à 6 mètres car, au-delà, les manipulations pour l'installation et la maintenance deviennent beaucoup plus difficiles.

Le tableau 11 fournit le diamètre nécessaire pour des multipales en fonction des principaux besoins définis plus haut et pour trois vitesses de vent moyennes.

Besoins	HMT (m)	Diamètre indicatif (m) pour	
		V = 3 m/s	V = 5 m/s
- hydraulique villageoise 10 m <sup>3</sup> /j pour 500 habitants	15	2,75	1,5 m
	30	3,75	1,75
	50	4,50	2,50
	100	6,50	3,50
- hydraulique pastorale 20 m <sup>3</sup> /j pour 500 bovins	15	3,50	1,75
	50	6,50	3,50
	100	très > 6,00	4,50
- besoins individuels 3 m <sup>3</sup> /famille	15	1,50	1,00
- irrigation villageoise (2 ha x 50 m <sup>3</sup> /ha/j)	10	6,00	3,50
- GPI (10 ha x 100 m <sup>3</sup> /ha/j)	10	très > 6,00	très > 6,00

Tableau 11: quelques exemples de diamètre de multipale en fonction des principaux besoins.

## CHOISIR LA POMPE

Ce choix est essentiel pour le rendement et la fiabilité du système.

Pour les calculs, nous renvoyons au chapitre 2.

Rappelons que, dans la pratique, le système le plus éprouvé actuellement est la multipale avec pompe à piston. Le système aérogénérateur-pompe électrique est d'une technologie plus performante mais les contraintes de maintenance limitent encore sa diffusion dans les zones isolées des pays en développement.

## CHOISIR LE TYPE D'ÉOLIENNE

Le choix technologique porte sur les points suivants :

- petite ou grande taille,
- énergie électrique ou mécanique,
- autoconstruction ou fabrication de série,
- importation ou fabrication locale.

Sur le marché, on trouve actuellement trois grands types de produits (voir annexes):

- les multiples produites industriellement,
- les aérogénérateurs industriels,
- une grande variété de machines autoconstructibles ou de très petites séries (moins de 20 unités), en général mécaniques

Le tableau 12 analyse ces produits en fonction de différents critères d'utilisation.

Critères	Multipales construites industriellement	Aérogénérateurs	Machines autoconstructibles ou de très petites séries
Conditions de site :			
vent	minimal 2 à 3 m/s nominal 5 à 7 maximal 10	4 à 5 m/s 7 à 10 15 à 20	Très variables Plutôt proche de 1
eau (HMT)	0 à 60 m en général 60 à 100 m : grands diamètres, risques de problèmes de pompes		Incertain au delà de 30 m
Conditions d'installation	de préférence au-dessus du point d'eau	peut être éloigné du point d'eau pour bénéficier des meilleurs vents	Mécaniques : cf 1 multipales Electriques : cf 2 aérogénérateurs
Matériaux/Technologie	tôle, acier, fer mécano-soudure	matériaux composites électricité, électronique	matériaux locaux (bois, bambou, toile) ou bon marché (tôle, alu, fer)
Coût d'investissement	< 3,5 m : 10 à 15000 F H.T départ usine  3,5 < < 7 m : 15 à 40000 F H.T	< 1 kW : 5000 à 20 000 FF > 1 kW : 150000 à 250000 FF  Les éléments de transmission peuvent augmenter significativement les coûts.	assez faible en général
Maintenance	peut être assurée par un mécanicien formé localement	Exige un technicien électromécanicien. Eviter les sites isolés ou d'accès difficile.	Fiabilité souvent faible. Disposer d'un utilisateur bricoleur.
Fabrication locale	possible	Transfert technologique difficile	oui par définition pour les autoconstructibles.
Adaptation aux besoins Hydraulique villageoise et pastorale	2,5 à 3,5 m : oui 3,5 à 6 m : vérifier la fiabilité, HMT déterminante	peu de références de bon fonctionnement (Essais actuels au Cap vert, voir p. 114)	Usages collectifs à éviter sauf si bonne fiabilité du modèle.
Besoins individuels	oui, avec petit (1,5 à 2,5 m) pour limiter les coûts	50 W à 1 kW : oui mais coûteux 1 kW = non	oui, avec un utilisateur bien formé pour la maintenance.
Irrigation villageoise	oui pour moins de 3 ha Mais exige grands Attention à la rentabilité.	pas de références Attention au coût	En fonction de la fiabilité, de la puissance et du coût.
Assainissement	Si faible HMT, un modèle avec pompe à hélice est utilisé aux Pays Bas	Pas de références	Pas de références.

**Tableau 12: tableau récapitulatif des caractéristiques d'utilisation des principaux types d'éoliennes disponibles**

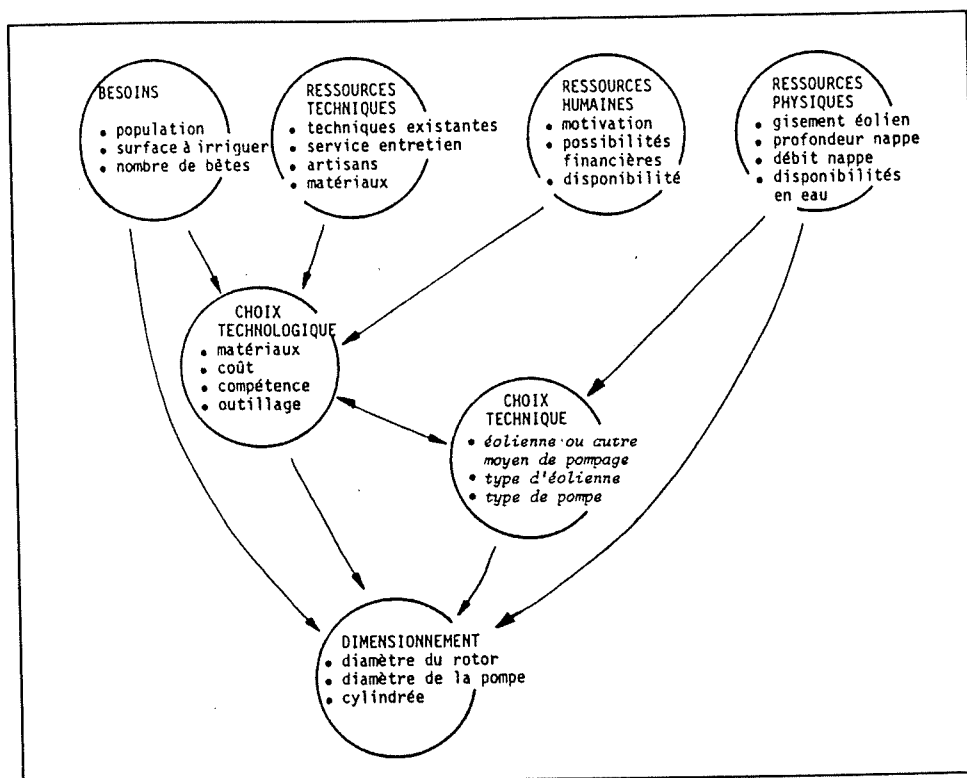


Figure 49: organigramme pour le choix d'une éolienne de pompage

### Bibliographie

1 H. SERRES - Politiques d'hydraulique pastorale. PUF - Paris 1980, 120 pages.

2 CWD - Aspects of irrigation with windmills - Ameersfoort - 100 p Pays Bas

3 Bechon et al - Utilisation d'éoliennes pour l'assainissement dans les Marais de l'Ouest - BTI du Ministère de l'Agriculture n° 396 - 1985 - Paris p. 39 - 40.

4 GRET - Le point sur... les citernes - dossier n° 4 - 1984.

## Des réalisations à connaître

	page
<b>D'anciennes éoliennes toujours actives</b>	99
<b>La production de sel dans le delta de Tchao Praya en Thaïlande</b>	99
<b>Les éoliennes crétoises du plateau de Lassithi</b>	101
<b>Les éoliennes américaines du XIXème siècle</b>	102
<b>Des initiatives récentes</b>	104
<b>La Sahores : le choix de l'autoconstruction</b>	104
La fabrication et la diffusion	105
Les résultats	105
Une fiabilité insuffisante	105
<b>La Wind Energy Unit : comment rentabiliser une éolienne d'irrigation</b>	107
Les atouts de la région	107
L'union des compétences	108
Une rentabilité difficile	109

---

<b>ITDG : comment lancer un fabricant</b>	110
L'objectif : une fabrication locale	110
Une machine fiable et résistante	111
De ITDG à la Kijito	111
<b>Cap-Vert, une richesse : le vent</b>	113
1981-1984 : les premières installations	113
Des problèmes	114
Une évolution encourageante	115
<b>En bref :</b>	
<b>quelques réalisations intéressantes</b>	115
Colombie : Las Gaviotas	116
Sénégal : LVIA à Thiès	116
Au Burkina-Faso :	
des installations ponctuelles	117
<b>Les leçons de l'expérience</b>	119

## D'ANCIENNES ÉOLIENNES TOUJOURS ACTIVES

L'analyse de quelques exemples d'utilisation et d'actions de diffusion d'éolienne de pompage, en particulier dans les pays en développement, montre bien la diversité des situations et des solutions adoptées. Indispensables à connaître, ces réalisations mettent en évidence les obstacles rencontrés, les erreurs à éviter et les exemples à suivre pour la mise en oeuvre de nouveaux projets.

Trois cas de diffusion d'éoliennes de pompage dans le passé sont intéressantes à relater, car malgré leur ancienneté elles fonctionnent toujours.

### LA PRODUCTION DE SEL DANS LE DELTA DU CHAO PRAYA EN THAÏLANDE\*

\*Voir  
bibliographie 2  
p. 120

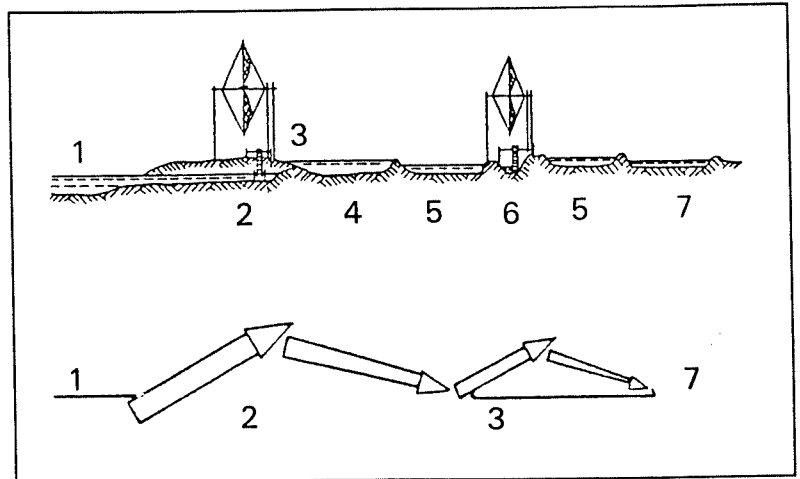
Une enquête a été récemment conduite par le King Mongkut's Institute of Technology Thonburi (KMUTT) sur une zone de 143 km<sup>2</sup> produisant environ 80% du sel thaïlandais.

Le séchage de sel se faisant par évaporation, la "saison du sel" s'étend d'octobre à juin. Chaque "ferme à sel" couvre environ 5 ha qui sont divisés en trois parties. La première partie (40-45% de la surface totale) est un bassin de concentration. L'eau de mer y est pompée par une grande éolienne, "l'éolienne extérieure", installée face à la mer comme le montre la figure 50.

La seconde partie (45-50%) est la zone de séchage ; une petite éolienne "l'éolienne intérieure", relève l'eau saumâtre dans ce deuxième bassin. Les cristaux de sel se forment dans la troisième partie sur les 5 à 10% de surface restante.



Figure 50:  
éoliennes  
pour le  
sel en  
Thaïlande,  
diagramme  
général de  
fonctionne-  
ment  
(Source  
Reric News,  
mars 1987)



1 La mer  
2 Grande éolienne  
3 Pompe  
7 Zone de formation du sel

4 Bassin de concentration  
5 Aire de séchage  
6 Petite éolienne

Chaque exploitation dispose donc de deux éoliennes. Mais depuis une dizaine d'années, elles tendent à être remplacées par de petits moteurs diesel couplés aux roues à aubes en bois, ou à des pompes axiales dans les fermes de grande taille.

Ce sont des éoliennes de type rotor à voile fixes, c'est à dire qui ne s'orientent pas au vent. Elles sont installées perpendiculairement à la mer car elles sont surtout soumises aux brises de mer et de terre.

Les diamètres sont respectivement de 10,5m pour la grande et de 7,7m pour la petite. Au total 667 éoliennes ont été recensées, dont 21% de grandes. Toutes les pompes sont des roues à aubes en bois, avec une hauteur de relevage de 0,7m. La baisse du nombre des éoliennes de grande taille est due au passage à la production de crevettes.

*D'après "A study of Windmills used in salt farms in Samut Sakhon and Samut Sonskhram" par Woramut Koetsiychai et Sunee Suwontragul, présentée au Séminaire Régional sur les applications des énergies alternatives en agriculture, Chiang Mai, Thaïlande, les 27-29 octobre 1986.*

## **LES "ÉOLIENNES CRÉTOISES" DU PLATEAU DU LASSITHI\***

\*voir  
bibliographie 3  
p. 120

Dans l'est de la Crète, de nombreux moulins à vent à direction fixe étaient utilisés depuis des siècles pour la mouture. Au début du XXème siècle, sont apparus des moulins orientables, mieux adaptés aux besoins de pompage, qui ne peut attendre, comme la mouture, le bon vent.

Le plateau du Lassithi est une région très enclavée de l'Est de la Crète avec un mode de vie autarcique du à sa situation de vallée élevée et fermée et permis par la variété de son agriculture.

Plusieurs milliers d'éoliennes à voiles (de 3000... à 12 000 pour les optimistes !) y sont utilisées pour l'irrigation. Les premières traces de ce système de pompage remontent à 1913 et il a été largement diffusé entre 1910 à 1940.

Cette forte diffusion semble liée à de nombreux facteurs favorables.

### **De bonnes conditions naturelles :**

- il s'agit d'un plateau alluvionnaire fertile qui ne produisait que des céréales avant l'introduction des éoliennes. L'irrigation a permis le développement de la pomme de terre et de cultures variées, plus lucratives,
- l'eau est abondante et peu profonde,
- le vent est bon, 2 à 3 Beaufort.

### **Des techniques connues :**

- on sait construire les puits et la technique des moulins avec des roues à voiles est connue sur les abords du plateau;
- les propriétaires de puits et de sources pratiquent déjà l'irrigation à la raie;
- enfin c'est une société isolée où la pluriactivité est répandue et où les paysans sont aussi menuisiers.

### **Un environnement économique et social favorable :**

- les parcelles sont étroites et morcelées, on peut utiliser de petites éoliennes facilement maîtrisables,
- c'est une agriculture assez aisée qui permet l'investissement,

- il existe un droit de propriété sur l'eau.

On note la présence d'éoliennes à voiles sur d'autres régions de Crète. Leur diffusion depuis l'Asie Mineure a été faite par les militaires et les réfugiés, au moment de la guerre Gréco-turque (1912-13) et des échanges de prisonniers (1923-24).

7000 habitants en 1940, 4900 en 1981, répartis en 19 villages et hameaux, disposant de 16 000 parcelles pour environ 1 600 exploitations dont 900 équipées d'éoliennes de pompage, telle est la situation actuelle du Lassithi.

Si, à l'origine, l'éolienne était en bois, très rapidement (entre 1920-1930), on est passé au fer. Aujourd'hui l'éolienne est constituée d'un pylône en cornière de 5 à 8m de hauteur. La roue s'oriente au vent grâce à un gouvernail et un plateau tournant ; le rotor de 6m de diamètre supporte 8 voiles triangulaires déroulées en fonction du vent et enroulées chaque soir : l'éolienne entraîne une pompe à piston de 130 à 170mm. Il existe souvent un bassin d'environ 15m<sup>3</sup>.

L'éolienne ne dispose pas de frein, elle doit être mise manuellement hors du vent en cas de rafales, à vrai dire rares dans la région.

Elle fournit, pour une HMT variant de 8 à 15m, de 15 à 25 m<sup>3</sup>/j.

Certaines éoliennes fonctionnent actuellement depuis 20 ans, mais la construction est arrêtée. Le changement des voiles et des cuirs des pompes est assuré par le paysan. Deux à trois ferronniers font les réparations les plus importantes. Les éoliennes tendent à être remplacées par les motopompes qui permettent surtout d'atteindre la nappe plus profonde, mais l'éolienne demeure entretenue et sert en appoint.

## LES ÉOLIENNES AMÉRICAINES DU XIXÈME SIÈCLE\*

\*Voir  
bibliographie 4  
p. 120

Au cours de la construction du chemin de fer vers le Grand Ouest américain, les locomotives à vapeur exigeaient beaucoup d'eau difficile à trouver, surtout dans les plaines sèches et isolées. Les pompes à vapeur étaient une solution coûteuse et inefficace.

Un certain Daniel Halliday inventa l'éolienne dans le Connecticut en 1854. Entièrement construite en bois, avec un diamètre de près de 8m,

elle permettait de pomper l'eau à "plusieurs centaines de pieds de profondeur". Le rotor, à axe horizontal, était constitué de 8 groupes de 14 lamelles disposées en rayons.

\*Voir  
bibliographie 5  
p. 120

Un gouvernail permettait l'orientation au vent - "Il vendit des milliers de ces machines et lança une industrie qui vit jusqu'à 300 fabricants d'éoliennes à la fin du XIXe siècle".

Ce modèle était loin de la perfection. En 1886, Thomas Peuy mit au point un rotor plus aérodynamique avec des pales en acier, toujours employé aujourd'hui.

Enfin en 1955, la Compagnie Aeromotor sortit une machine avec un système de transmission à bain d'huile, jusque là le graissage était manuel.

\*Voir  
bibliographie 6  
p. 120

Aéromotor représente alors jusqu'à 70% du marché en 1920. Le boom des éoliennes dura jusqu'à la généralisation de l'électrification rurale, pendant les années 30. Des centaines de milliers de machines ont été installées aux Etats-Unis, mais aussi en Argentine, en Australie ou en Afrique du Sud. Aujourd'hui on estime qu'un million sont encore en fonctionnement, essentiellement en Australie et en Argentine\*, pour l'alimentation domestique ou les troupeaux.

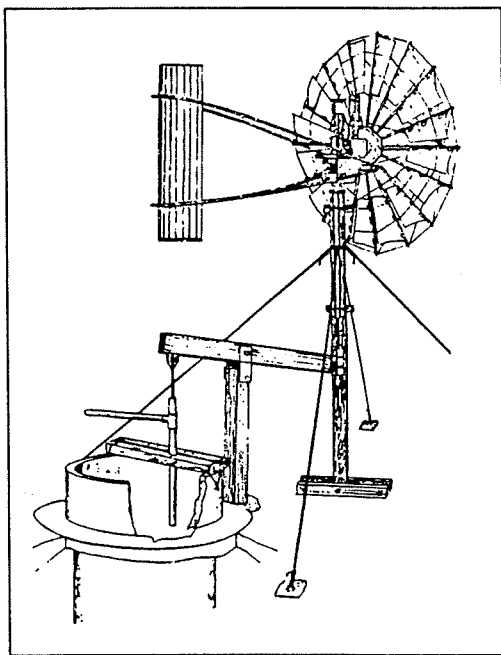
## DES INITIATIVES RÉCENTES

### LA SAHORES : LE CHOIX DE L'AUTOCONSTRUCTION\*

\*voir  
bibliographie 7  
p. 120

Figure 51:  
l'éolienne  
Sahores

L'éolienne Sahores est une multipale de pompage mise au point par Jean Sahores depuis 1972 (fig.51).



Elle a connu une forte diffusion au Mali depuis 1979 grâce au Père Plasteig de la BPAR (Base de perfectionnement des Artisans Ruraux) de Ségou.

La Sahores, autoconstructible en bois ou en métal, de dimensions moyennes (3m de diamètre) s'adapte parfaitement aux principes de la BPAR de Ségou : tout d'abord montrer, ne rien donner, ne pas faire du matériel en nombre, former les gens grâce au système de vente-formation.

## LA FABRICATION ET LA DIFFUSION

En 1983, 43 éoliennes avaient été construites à la BPAR dont 1 en 1979, 9 en 1980, 16 en 1981 et 25 en 1982.

La construction est réalisée en 6 à 10 jours à la BPAR. Le prix de l'éolienne est de 3000 FF (150 000 F CFA), ce qui reste un peu cher pour les villageois.

Les acheteurs se répartissent comme suit :

- particuliers : 13, soit 30%,
- associations villageoises : 14 soit 33 %,
- missions catholiques : 9 soit 21%.

La répartition par type d'utilisation est la suivante :

- hydraulique pastorale : 15 soit 42%,
- jardinage : 12 soit 33%,
- vergers : 4 soit 11%,
- autres : 12.

## LES RÉSULTATS

La Sahores fournit une puissance de 15 à 60 watts hydrauliques ; elle fonctionne pour des profondeurs inférieures à 20 mètres (tab.13).

## UNE FIABILITÉ INSUFFISANTE

Le nombre de pannes est important, mais avec une durée de réparation courte. On constate que :

- les éoliennes appartenant à des particuliers semblent avoir moins de problèmes que celles des associations villageoises,
- c'est toujours grâce à une personne en particulier que l'éolienne fonctionne,
- la maintenance demande des compétences mais surtout du temps.

<b>DÉBITS</b> Mesure des éoliennes Sahores installées		
	m <sup>3</sup> /heure	m <sup>3</sup> /jour
Vent faible	0,4 - 0,5	2 à 3
Vent fort	1 à 2	5 à 7
(HMT = environ 1 m)		
<b>CHARGE</b>		
Ce débit journalier permet d'arroser un jardin de 3 à 10 hectares. C'est la taille d'un jardin familial. Les jardins de groupements villageois sont généralement plus importants et l'éolienne constitue alors un apport d'eau marginal. C'est le cas de Sama par exemple avec ses 2 éoliennes pour 250 ares cultivés par 120 femmes.		
A Ségou, par contre, le jardin d'Alamissa Coulibaly d'environ 3 ares, demande 2000 litres par jour que l'éolienne fournit aisément. (le bassin fait 3,5m <sup>3</sup> : quand il est plein, on arrête l'éolienne.) Quand il n'y a pas de vent, le manoeuvre pompe à la main avec la pompe de l'éolienne. Cela n'arrive qu'une ou deux fois par mois.		
<b>ABREUUREMENT DES ANIMAUX</b>		
L'éolienne, apporte dans le domaine pastoral un allègement très notable du travail du berger. C'est 200 zébus qui pourront s'abreuver par jour à l'eau pompée.		
<b>EAU DOMESTIQUE</b>		
A Bamako, une éolienne bien placée permettrait à son propriétaire -- d'après lui -- une économie de 20 000 FM d'eau par mois (200 FF). C'est certainement la plus rentable des 40 éoliennes.		

Tableau 13: résultats des éoliennes Sahores installées (Energies de pompage, GRET)

L'autoconstruction des éoliennes par des non-professionnels (un paysan n'est pas un artisan) et avec des matériaux légers a des limites comme le prouve les nombreuses petites pannes dont ont été victimes ces éoliennes. Dans des conditions de fabrication plus industrielles, ce modèle d'éolienne peut être plus fiable.

Toutefois l'intérêt de ce type de construction réside dans la motivation de l'utilisateur-fabricant individuel. On constate, mais ce n'est pas un fait nouveau, que le bon fonctionnement d'un équipement dépend de la responsabilisation de l'utilisateur.

Aujourd'hui la fabrication est arrêtée au Mali. En revanche, elle se poursuit au Sénégal avec la BPAR de St Louis.

## LA "WIND ENERGY UNIT": COMMENT RENTABILISER UNE ÉOLIENNE D'IRRIGATION\*

\*Voir bibliographie 8 p. 120

\* CWD :  
Consultancy  
services wind  
energy  
developing  
countries

Pour réagir contre sa dépendance énergétique, le gouvernement Sri lankais a décidé en 1977 de lancer un programme sur les sources d'énergies renouvelables en milieu rural. L'énergie éolienne figurait parmi les pistes retenues.

Le choix judicieux de la zone d'installation et la création d'une entité spécialisée marquent de projet qui a été réalisé avec l'assistance de l'ONG néerlandaise CWD\*.

## LES ATOUTS DE LA RÉGION

La zone d'installation des éoliennes retenue par le CWD et la Wind Energy Unit résulte de la superposition de plusieurs facteurs favorables (fig.52):

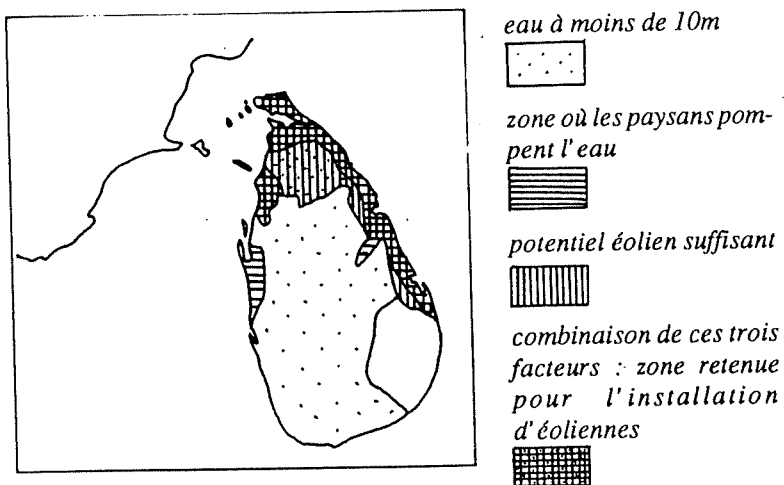
- un vent suffisant évidemment (les données disponibles ont été complétées grâce à l'installation d'anémomètres par le projet),
- des besoins d'eau importants dans le nord du pays qui ne reçoit pas de pluie de mai à octobre. Les paysans irriguent par pompage des légumes et d'autres produits demandant beaucoup d'eau. Sur des surfaces variant de 0,25 à 2 ha, les besoins atteignent



55 m<sup>3</sup>/j/ha à pomper du lever au coucher du soleil car le paysan utilise l'eau immédiatement sans stockage.

- enfin, dans les conditions économiques du Sri Lanka un projet d'éolienne n'est réalisable que si l'eau est disponible à moins de 10m de profondeur.

**Figure 52:**  
carte du  
Sri Lanka:  
choix de la  
zone  
favorable à  
l'installation  
d'éoliennes



## L'UNION DES COMPÉTENCES

La constitution de la WEU (Wind Energy Unit) dépendant du Bureau des Ressources en eau du Ministère de l'Agriculture a permis de coordonner le travail des différents acteurs du projet (mécaniciens, artisans, fabricants, agronomes, financiers...). L'ensemble des problèmes et des études ont ainsi pu être pris en compte (essais et démonstrations, crédits à l'achat, hydrologie, études de faisabilité...).

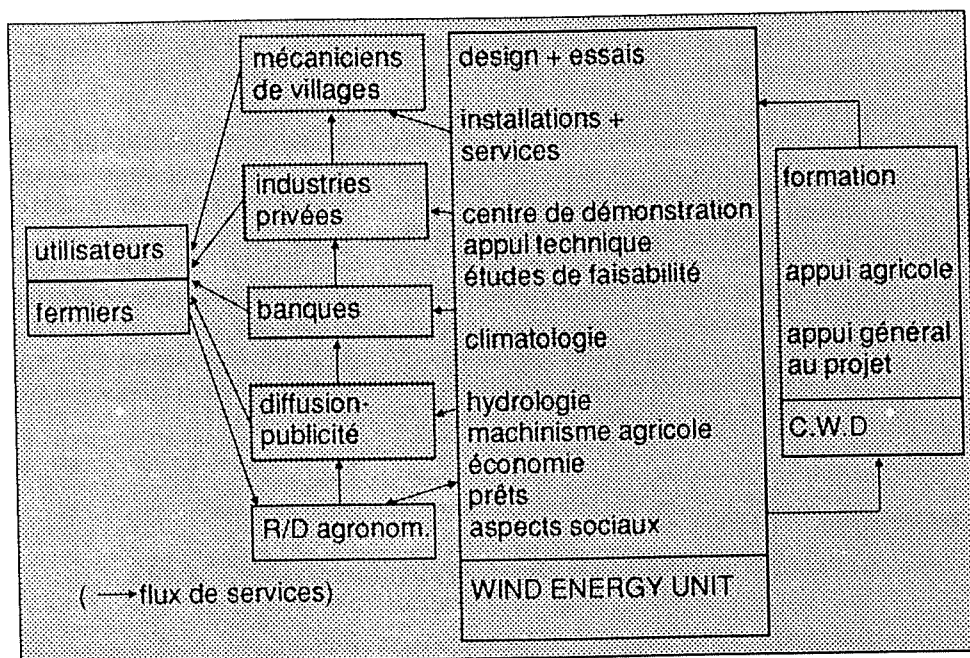


Tableau 14: organisation du projet Sri Lanka

## UNE RENTABILITÉ DIFFICILE

Au démarrage du projet, le choix technique s'était porté sur les multiples (modèle CWD) de grand diamètre (5m). Mais il était difficile de les produire localement et les débits pompés dépassaient les besoins.

A partir de 1980, des éoliennes de 3 m ont été fabriquées par des ateliers situés hors de la capitale. Les éoliennes ont été vendues en 1981 à un prix de lancement égal à celui des motopompes (250 \$). En 1982 lorsqu'on est passé au prix réel sans subvention de 500 \$, 50 éoliennes ont toutefois été vendues. Mais cet investissement était trop élevé pour les paysans. Pour le réduire et le rendre compétitif par rapport aux pompes diesel, on est alors passé en 1983 à des rotors de 2 m de diamètre vendus 300 \$ ce qui était suffisant pour irriguer 0,25 à 0,50 ha par famille\*. A la fin de 1983 on comptait 200 éoliennes installées pour 50 000 pompes diesel. On espère arriver jusqu'à 10 000 éoliennes dans les dix ans à venir.

Pour accroître les capacités des éoliennes sans augmenter leur taille, le pompage de l'eau la nuit et son stockage semblent indispensables. Des

\* Voir bibliographie 10 p. 120

recherches sont effectuées pour mettre au point des réservoirs peu coûteux.

La rentabilité de l'éolienne, comme de tout système de pompage de l'eau, est difficile à assurer lorsque les prix agricoles sont trop bas et ne permettent pas aux agriculteurs d'amortir rapidement leur investissement et de payer les coûts de fonctionnement.

Toutefois ce projet apparaît exemplaire car les sites choisis correspondent parfaitement aux services qu'on peut attendre des éoliennes de pompage. D'autre part, l'organisation multidisciplinaire de la WEU est un exemple à retenir pour étudier toutes les composantes d'un projet. Enfin, il apparaît possible et intéressant de confier la fabrication des éoliennes à des ateliers locaux.

## ITDG : COMMENT LANCER UN FABRICANT

L'O.N.G britannique ITDG (Intermediate Technology Development Group) a lancé son programme éolien en 1975.

### L'OBJECTIF: UNE FABRICATION LOCALE\*

\*Voir  
bibliographie 11  
p. 120

Les tentatives d'introduction d'éoliennes dans les pays en voie de développement ont rencontré de nombreuses difficultés. Les raisons en sont le coût élevé de l'importation et de l'installation dans des sites isolés, les problèmes d'approvisionnement en pièces détachées et de maintenance. De plus, peu de gens manifestent de l'intérêt pour la substitution d'un système importé (moteur + fuel) à un autre (l'éolienne) qui est, de surcroît, moins bien compris.

La fabrication locale présente alors de nombreux avantages :

- substitution d'importation et donc économie de devises,
- circuit plus court entre le fabricant et le client (meilleure adaptation technique de l'éolienne aux conditions locales, baisse des coûts de transport, élimination d'intermédiaires et de formalités, service après vente et pièces détachées disponibles),
- amélioration des capacités techniques du pays et création d'emplois.

I.T.D.G a donc cherché à proposer :

- un modèle adapté aux faibles revenus des pays en développement à partir d'un modèle métallique très répandu,
- un système adaptable avec des modifications mineures à la fois à des débits importants sur de faibles hauteurs (irrigation) et à des débits faibles sur de grandes profondeurs (hydraulique villageoise et pastorale).

### UNE MACHINE FIABLE ET RÉSISTANTE PLUTÔT QUE PERFORMANTE

En partant des modèles de multipales américaines, I.T.D.G a :

- allégé l'ensemble (économie de matériaux et facilités de transport et d'installation),
- simplifié la transmission en supprimant en particulier le bain d'huile, ce qui facilite aussi la maintenance,
- mis un rotor au nombre de pales modifiables : de 24 (couple important pour les grandes profondeurs) à 6-7 ou même 3 pour les faibles hauteurs (grande vitesse de rotation),
- remplacé la galvanisation par la peinture,
- essayé de nombreux matériaux comme la fibre de verre pour les pales,
- choisi une pompe à piston du commerce, classique mais résistante.

### DE ITDG A LA KIJITO

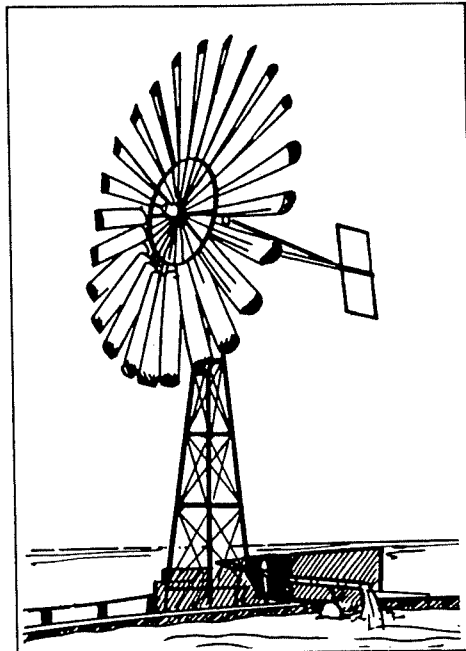
Pour lancer une fabrication privée dans les pays en voie de développement, I.T.D.G a d'abord identifié des fabricants potentiels en Inde, en Egypte, à Oman, au Kenya, au Botswana et au Pakistan, auxquels il a proposé la construction d'un prototype.

Au Kenya, la Société de mécanique générale Bob Harries Engineering Ltd a construit un premier prototype de l'éolienne en janvier 1979. Une démonstration à la foire commerciale du Kenya en avril 1979 a suscité un vif intérêt du public. La production en série démarrait en juin 1979.

En 1980, plusieurs employés travaillaient sur les éoliennes "Kijito". Aujourd'hui, 150 machines ont été installées, au Kenya, mais aussi au Soudan, en Tanzanie, au Nigéria, Botswana et Niger.

Quatre versions de la multipale sont proposées avec quatre diamètres de roues différents : 3,7 - 4,9 - 6,1 et 7,3m ; la profondeur maximale de pompage est de 180m. Une Kijito de 7,3m coûtait environ 12 000 U.S \$ (80 000 FF) en 1986, pour une durée de vie prévue de 20 ans (fig.53).

Figure 53:  
l'éolienne  
ITDG  
fabriquée  
par Kijito  
(Kenya) et  
Tawana  
(Pakistan)



En 1985, le gouvernement anglais (Overseas Development Administration) a financé une campagne de mesure sur six "Kijito". Celles-ci étaient utilisées pour l'approvisionnement en eau domestique, l'abreuvement des troupeaux ou l'irrigation. Le rendement mesuré est de l'ordre de 16%, soit une puissance hydraulique par mètre carré de surface balayée égale à  $0,1.V^3.Watts/m^2$ , ce qui est un bon résultat pour l'ensemble "éolienne + pompe".

La réussite de I.T.D.G au Kenya se caractérise par la volonté :

- de diffuser une machine simple et fiable,
- de favoriser l'appropriation technologique par des partenaires kenyans,
- de donner une image nouvelle de l'éolienne avec un "design" moderne et coloré.

## **CAP-VERT, UNE RICHESSE : LE VENT\***

\* Voir  
bibliographie 12  
p. 120

Le Cap-Vert, archipel situé à environ 600 km du Sénégal, d'une superficie totale de 4 000 km<sup>2</sup> pour 320 000 habitants en 1984 \*, a été particulièrement éprouvé par 20 ans de sécheresse.

\* Voir  
bibliographie 13  
p. 120

La moitié des besoins en eau est fournie par le pompage dans des puits ou forages profonds. Les richesses sont rares ... si ce n'est le vent.

En 1977, la Division pour les Energies Renouvelables (DER) du Ministère du Développement Rural a commencé les premiers essais d'installations d'éoliennes mécaniques, avec des machines importées, Dempster et Southern Cross.

De 1977 à 1981, les installations sont assez ponctuelles, souvent liées à des donateurs (UNICEF, France, Pays-Bas...). L'assistance technique est fournie par la coopération néerlandaise et l'ONG CWD.

Une deuxième phase est lancée de 1981 à 1984, pour intégrer ces différentes actions et lancer un véritable programme éolien.

### **1981-1984 : LES PREMIÈRES INSTALLATIONS**

Sur cette période, 21 puits ou forages ont été équipés d'éolienne. En 1984, le Cap-Vert comptait donc 37 éoliennes de pompage installées dont 30 en fonctionnement : 29 Dempsters, 7 Southern Cross et un prototype CWD 5000.

La DER, avec l'assistance de CWD, a choisi d'installer les machines en stock (dons des années antérieures) avant de commencer une fabrication locale.

Parmi ces éoliennes, les Dempster ont des diamètres petits à moyens (2,44 - 3,66 - 4,26 m) ; la CWD fait 5m, et les Southern cross 6,40 ou 7,60 m. Les profondeurs de pompage varient de 40 à 130 m.

Une équipe de vingt personnes à la DER (mécaniciens, stagiaires, peintres), ainsi que six mécaniciens sur les îles autres que Santiago, ont été formés à l'installation, à la maintenance et aux réparations.

Le transfert de connaissances a d'abord touché, avec succès, les mécaniciens, ensuite la formation s'est adressée aux techniciens et aux cadres.

L'installation et la maintenance suivent un schéma préétabli par la DER : pour chaque éolienne, on tient un fichier, et un mécanicien assure un entretien mensuel sur chaque île. Des manuels d'installation pour les Dempster et les Southern Cross ont été établis.

Dans les deux tiers des cas, l'éolienne est gardée par une personne nommée et payée par l'antenne du Ministère du Développement Rural. Les autres sont sous la responsabilité des utilisateurs, méthode qui devrait se généraliser.

Un nouvel atelier de la DER a été construit pour la fabrication locale des éoliennes : le premier prototype CWD 5000 local est sorti en 1983.

Enfin des mesures de vents sur 25 points du pays et l'étude de 36 sites pour estimer le potentiel de pompage a permis le repérage des futures installations et la rédaction d'un document "comment conduire une étude de site".

## DES PROBLÈMES

### Manque de personnel formé

Le manque de cadres cap-verdiens, en particulier d'ingénieurs en mécanique, et leur changement rapide dans l'équipe de la DER, a gêné le lancement de la fabrication locale. La présence d'expatriés néerlandais a été essentielle au bon déroulement de l'action et a dû se poursuivre au-delà de 1984.

De plus, la formation à la maintenance et à l'installation a dû partir de zéro, le personnel formé avant 1981 ayant quitté le projet.

### Une logistique déficiente

Les procédures administratives, les difficultés d'approvisionnement, les problèmes de transport entre les îles, les véhicules... ont beaucoup retardé l'exécution du projet.

### La corrosion par le sel

Sur le plan technique, la principale difficulté est liée à la corrosion par le sel. Plusieurs types de pré-traitements et de peinture ont été testés. La meilleure solution semble être de repeindre tous les ans. Ce délai est efficacement rallongé par un dépoussiérage régulier de l'éolienne par les utilisateurs ou le gardien (c'est intéressant quand on sait qu'une peinture par an représente 75% des coûts de maintenance).

#### La raréfaction de l'eau

La diminution des précipitations depuis 20 ans rend les mesures de pompage peu sûres et leur extrapolation difficile. Dans certains cas, l'eau a tellement baissé que l'éolienne fonctionne 24 heures et puis s'arrête. Dans deux cas, l'éolienne a été démontée à cause de l'arrivée d'eau de mer dans les puits.

### UNE ÉVOLUTION ENCOURAGEANTE\*

\* Voir  
bibliographie 14  
p. 120

En 1984, l'ensemble des éoliennes pompait 1700 m<sup>3</sup>/jour, approvisionnant ainsi 10 000 ruraux en eau domestique (5% de la population rurale du pays) et irrigant 20 ha.

Au cours de cette période, l'énergie éolienne a donc passé la phase expérimentale et prouvé son efficacité pour le pompage dans ce pays. Des installations faites "avec précaution" et une maintenance régulière sont les facteurs clés de cette réussite.

Les observations sur les éoliennes importées ont permis de retenir 3 diamètres pour la fabrication locale : 2m, 2,75m, 5m.

En 1987, 90 éoliennes de pompage fonctionnent, ainsi que deux aérogénérateurs de pompage et un système autonome mixte éolien/diesel. L'installation de petits aérogénérateurs devrait bientôt démarrer. Éoliennes et petits aérogénérateurs sont produits localement par l'atelier de la DER.

Dans ce pays pauvre mais venteux, l'énergie éolienne doit permettre, lorsque tous les sites seront équipés, de remonter 75% de l'eau pompée dans le sous-sol.

### EN BREF : QUELQUES RÉALISATIONS INTÉRESSANTES

D'autres exemples de diffusion significative d'éoliennes de pompage présentent un intérêt.



## COLOMBIE : LAS GAVIOTAS\*

\*Voir  
bibliographie 15  
p. 120

Las Gaviotas est un centre de diffusion de technologies appropriées installé à l'Est de la Colombie, dans une région pauvre et éloignée des villes.

Regroupant des ingénieurs et techniciens de disciplines très diverses (architectes, électroniciens, mécaniciens, agronomes) ; ce centre comprend une usine, des ateliers, une école, une ferme expérimentale. Il travaille sur de nombreux matériels : éoliennes, mais aussi systèmes solaires, pompes, presse à canne, presse à huile de palme...

On a cherché à Las Gaviotas à faire une multipale métallique simple donc moins coûteuse (mais plus petite) que les Aeromotor (modèle industriel américain) par exemple, et facile à entretenir. En 1981, 25 éoliennes étaient produites quotidiennement.

\*Voir  
bibliographie 16  
p. 120

Cette fabrication s'intègre dans une politique d'autosuffisance et de développement des villages et des individus par eux-mêmes\*.

## SÉNÉGAL : LVIA À THIÈS\*

\*Voir  
bibliographie 17  
p. 120

A Thiès, dans l'ouest du Sénégal, des volontaires italiens de LVIA (Comunità Internazionale Volontari Laice), construisent de grandes multipales de 6m de diamètre (modèle italien Tuzzi e Bardi). En mars 1986, 54 éoliennes étaient installées pour l'essentiel au Sénégal mais aussi dont trois en Mauritanie, deux en Gambie, une en Guinée Bissau, et deux au Mali.

Au départ, 23 éoliennes ont été importées de chez Tuzzi e Bardi en Italie. Les autres ont été fabriquées sur place par l'atelier des volontaires, mais les pompes restent importées.

La profondeur maximale d'installation est de 78 m et le diamètre des pompes à piston varie de 70 à 135 mm, et en général de 90 à 110 mm.

Les résultats observés à Thiès sont les suivants :  $40\text{m}^3/\text{j}$  à 6-7m HMT,  $30\text{m}^3/\text{j}$  à 25m HMT et  $15\text{m}^3/\text{j}$  à 60m HMT.

Les éoliennes sont données à des groupements villageois. Le coût de l'éolienne était en 1986 de 3,7 millions F CFA (soit 74 000 FF). Le bassin de  $18\text{m}^3$  coûtait 8 000 FF (400 000 F CFA) avec une participation de la main d'oeuvre locale qui fournit briques et sable.

Enfin dans chaque groupement, il y a deux responsables qui assurent le graissage, l'arrêt de l'éolienne, le changement de ressort, les petites réparations. Les volontaires assurent les réparations plus importantes.

## **AU BURKINA-FASO, DES INSTALLATIONS PONCTUELLES**

\* Voir  
bibliographie 18  
p. 120

En 1983, l'Institut voltaïque de l'énergie\* a fait un bilan sur l'ensemble des éoliennes installées dans le pays. Sur une cinquantaine de machines identifiées, 40 ont fait l'objet de fiches d'identification et de mesures de vent dont il ressort les conclusions qui suivent\*.

- On trouve des éoliennes dans tout le pays, avec une forte concentration sur le Plateau Mossi, près de Ouagadougou.
- 25 éoliennes ont été installées après 1978, dont 14 les deux dernières années avant l'enquête.
- 36 éoliennes de pompage (34 multipales et 2 Savonius) et 10 aérogénérateurs installés de 1967 à 1978 (les 4 visités étaient hors d'usage).
- La répartition suivant les usages est la suivante :
  - \* utilisation domestique : 15 éoliennes
  - \* maraichage ou pépinières : 19 ; pendant la saison de l'harmattan, l'éolienne couvre la majorité des besoins.
- Les responsables :
  - \* Pour l'eau domestique toutes les éoliennes, sauf deux, sont installées dans des communautés religieuses à la fois pour des raisons de sensibilisation et pour des questions de disponibilités d'investissement. Les utilisateurs sont en majorité aptes à assurer l'entretien courant.
  - \* Pour le maraichage, la majorité des éoliennes est installée dans des groupements villageois et a été acquise sur financements extérieurs. Les utilisateurs ont rarement été formés et sensibilisés à l'usage et à l'entretien courant des éoliennes.

- Fonctionnement

Tableau 15:  
fonctionnement des  
éoliennes  
au Burkina  
Faso

	en fonctionnement	en panne
multipales	17	15
Savonius	2	2
aérogénérateurs	0	4

- Les principales causes de panne sont :

- \* pour les multipales : l'usure du piston,
- \* le manque d'eau (4 cas),
- \* les dommages causés par des vents violents (4 cas).

8 pannes sont dues à des problèmes d'entretien et de pièces détachées, 4 sont dues à un mauvais choix de site, 3 à un manque de formation des utilisateurs.

Cette enquête montre bien que les éoliennes de pompage répondent à des besoins réels. Les multipales semblent les mieux adaptées mais elles exigent une surveillance régulière. Une fois de plus l'entretien apparaît primordial.

## LES LEÇONS DE L'EXPÉRIENCE

Le choix d'un site adéquat est la condition première de la réussite d'une installation mais il n'est pas suffisant pour assurer sa bonne marche. Comme pour une motopompe, une pompe manuelle ou une pompe solaire, il faut que les conditions techniques, économiques et humaines soient favorables pour que l'éolienne soit un système de pompage vraiment intéressant.

Un bon dimensionnement de l'éolienne est un facteur de succès. Aussi les besoins des populations et leurs habitudes doivent-ils être soigneusement étudiés avant toute installation.

Les principales difficultés sont dues à l'absence de maintenance ou de compétences pour l'entretien, et aux problèmes d'approvisionnement et de transport qui se rencontrent dans tous les pays en développement (Cap Vert, Burkina-Faso ...). Dans tous les cas les responsables de l'entretien doivent être clairement identifiés dès le départ de l'opération.

Pour limiter ces problèmes, il faut avant tout éviter les installations ponctuelles dans les sites isolés. De multiples éoliennes dans une même région permettent de rentabiliser la formation d'agents de maintenance et même de fabricants locaux. Les éoliennes installées dans les villages doivent toujours être, de plus, des modèles bien éprouvés.

Le coût des installations reste bien souvent un obstacle à la multiplication des éoliennes, si des programmes de crédit ne sont pas mis en place parallèlement aux études techniques. La construction locale de petites éoliennes par des artisans de la région permet de réduire ces coûts tout en favorisant le développement.

**Bibliographie**

- 1 GRET. ITD - Energies de pompage - Paris, Ministère de la Coopération, 1985, p 225.
- 2 RERIC News - Use of Windmills in salt production in Thaïlande - mars 1987, p.7-9
- 3 GRET - ITD. - op.cit
- 4 Waterpumping Windmill Book The New Alchemy - p.5-7
- 5 Usid. p.6
- 6 Fraenkel I.T.Power - Waterpumping devices - FAO, 1987, p 99.
- 7 GRET I.T.D. - op cit, p 203
- 8 CWD Windmills in the lift - Amersfoort - Pays Bas - 1984, 12 p.
- 9 d'après interview CWD - in AFME/Technap, Eoliennes de pompage : Stratégie des opérateurs - 1986, 100p.
- 10 rapport M.Greeley -. Université de Reading - UK - 1986
- 11 Fraenkel P. - Technical and economic constraints in the design and development of a modern wind-power pumping system - Contribution to second ASME Wind Energy Symposium - Houston, IT Power Reading, 1983.
- 12 CWD/DER - Rapport Cap Vert - Amersfoort, NL, 1987.
- 13 Banque Mondiale - Rapport sur le développement - 1987.
- 14 Informations transmises par CWD en octobre 1987.
- 15 Vita News - 25 Windmills manufactured daily and a host of new ideas at work - July 1981, p.12-14 .
- 16 Las Gaviotas - Ap. Aéro 18261 BOGOTA Colombie
- 17 Témoignage recueilli sur place par ITD/1986
- 18 IRE - Evolution du système éolien - Ouagadougou, 1983.

## Annexes

	page
<b>Adresses utiles</b>	123
<b>Organismes de réalisations de terrain dans les pays en développement</b>	123
<b>Organismes de recherche</b>	129
<b>Organismes d'information et de conseils techniques</b>	135
<b>Fournisseurs de plans pour l'autoconstruction</b>	140
Multipales à voiles	140
Multipales métalliques	142
<b>Les constructeurs</b>	149
<b>Petites multipales</b>	150
Éoliennes indiennes	159
<b>Grandes multipales</b>	161
<b>Petits aérogénérateurs</b>	164
<b>Grands aérogénérateurs</b>	164
<b>Machines diverses</b>	165
<b>Bibliographie</b>	167



## ADRESSES UTILES

De nombreux organismes associatifs, universitaires ou gouvernementaux s'intéressent dans le monde au pompage éolien, et tout particulièrement pour les pays en développement.

Un recensement exhaustif est impossible et ceux dont nous n'avons pas connaissance nous en excuserons.

Nous avons classé ces organismes par pays et en quatre rubriques selon leur activité principale, toutefois la plupart sont en général à même de vous conseiller sur tout ce qui touche à l'énergie éolienne.

Ces quatre rubriques sont :

- 1 les réalisations de terrain,
- 2 la recherche,
- 3 l'information et les conseils techniques,
- 4 la fourniture de plans pour l'autoconstruction.

### ORGANISMES DE RÉALISATIONS DE TERRAIN DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

#### BOSTWANA :

RIIC (Rural Industries Innovation Centre)  
Private Bag 11  
KANYE

Fabrication de multipales selon le modèle ITDG. Actuellement 11 installations pour les besoins villageois, les troupeaux et un peu d'irrigation. Passage à une fabrication privée en cours.



**BRÉSIL :**

EMBRATER  
Av. W3 Norte  
Q 515 Bic Brasília D.F  
CEP 70770

Organisme de vulgarisation au sein du Ministère de l'Agriculture. Travaux pour l'irrigation dans le Rio Grande da Sul.

**CANADA :**

CRDI (International Development Research Centre)  
P.O Box 8500  
OTTAWA

Centre de documentation et soutien à des projets de développement.

**CAP VERT :**

Division des Energies Renouvelables  
Ministère du Développement Rural et de la Pêche  
Caixa Postal 50  
PRAIA

Large programme de diffusion avec atelier de fabrication. Coopération avec CWD (Pays Bas) (voir chapitre 4).

**CHILI :**

TEKHNE  
Centro de Experimentación en Tecnología Apropriada  
Ureta Cox 1034  
Casilla 210 - Correo 13 San Miguel  
SANTIAGO

ONG technique qui réalise des installations de terrain.

**COLOMBIE :**

Centre LAS GAVIOTAS  
Ap. Aereo 18261  
BOGOTA

Gère un programme de fabrication/vulgarisation d'éoliennes multipales.

**ÉTATS-UNIS:**

VITA (voir organismes de réalisations)

Nombreuses réalisations en technologie appropriée dans les pays en développement : Afrique, Inde, Thaïlande.

**FRANCE :**

Institut Technologique DELLO  
Le Moulin Rouge  
60410 Verberie  
Tél : 44 40 55 80

Réalisations techniques dans le domaine du pompage. Diffuse l'éolienne SAHORES. Projet de diffusion de multipales OASIS en Mauritanie, installation et formation d'ateliers locaux à la fabrication. Publications, stages de fabrication sur demande.

TECHNAP (collectif d'ONG en technologies appropriées)  
42 Rue Cambronne  
75015 Paris

Les ONG membres (IT DELLO, Espace Eolien Régional, Groupe de Travail Eolien, Enéole) conduisent le projet Alizés, de diffusion de multipales OASIS en Mauritanie.

Jean SAHORES  
64160 BUROS

Inventeur de l'éolienne Sahores (voir chapitres 4 et annexe 2) et de divers autres systèmes de pompage. Diffuse des brochures de fabrication vers les pays en développement.

GTE Groupe de Travail Eolien  
L'Hermain Molac  
56230 Questembert

Apporte son assistance technique, ainsi que les moyens du Lycée Professionnel de Questembert à des projets d'installation.

**INDE :**

TOOL-ORP (Organisation of Rural Power)  
Windmill Team  
Kusumik Kalan, Ghazipur  
UTTAR PRADESH

Coopération avec TOOL (Pays Bas). Petites éoliennes à voile pour l'irrigation, adaptés aux vents faibles. Multipales métalliques sur modèle CWD.

DNES (Indian Département of Non Conventional Energy Sources;  
Ministère de l'Energie)

IERT (Institute for Engineering and Rural Technology).  
26 Chatham Lines  
Near Preyag Railway Station  
Allahabad 211002

Projet de fabrication et installations de multipales nombreuses dans l'Andhra Pradesh. Tests sur une vingtaine d'aérogénérateurs.

SSSPM (Shri Shiray Shikshan Prasarak Mandal)  
Gandgaon Pin 413 406  
Taluka Barsi - SOCAPUP  
MAHARASHTRA

Développe un programme de diffusion d'éoliennes simples.

**ITALIE :**

LVIA (Comunita Internazionale Volontari Laici)  
Conso IV Novembre 88  
12100 CUNEO

Installation et fabrication locale de grandes multipales Tuzzi e Bardi au Sénégal.

CAST (Centro per un Appropriato Sviluppo Tecnologico)  
Viale dei tigli 32  
21014 PAVENO

Travaux avec la société Tuzzi e Bardi en Somalie.

**MAROC :**

CDER (Centre de Développement des Energies Renouvelables)  
82 rue de Yougoslavie  
BP 38  
MARRAKECH GUELIZ

Dépend du Ministère de l'Énergie et des Mines. Plusieurs projets importants et éoliennes de pompage.

**PAYS BAS :**

CWD  
(Consultancy Services Wind Energy Developing Countries)  
PO BOX 85  
3800 AB AMERSFOORT

Regroupe les activités éoliennes des Universités de Technologie de Eindhoven et Twente, et du bureau des consultants DHV.  
Nombreux programmes de diffusion en lien avec la coopération néerlandaise, en particulier, au Sri Lanka et au Cap Vert.

TOOL  
(Technical Development With Developing Countries)  
Entrepôtdek 68 a  
1018 AD AMSTERDAM

Réseau SATIS.  
(voir aussi chapitre 4 et annexe 2)

**R.F.A. :**

I.B.E.K.  
Postfach 210 515  
D 7500 KARLSRUHE 21

Expérience de terrain, bureau d'étude.

**ROYAUME UNI :**

Intermediate Technology Power  
The Wares  
Bramshill Road, Eversley  
HANTS RG 27 OPR (Angleterre).

Bureau d'études issu de l'ONG "ITDG". Nombreuses réalisations en Afrique et Asie, en particulier Kenya et Pakistan (voir chapitres 4 et annexe 2).

Participation au projet Alizés avec les ONG françaises citées plus haut.

**SÉNÉGAL :**

BPAR (Base de Perfectionnement des Artisans Ruraux)  
BP 260 (évêché)  
ST LOUIS

Atelier de fabrication et de formation, éolienne Sahores.

L VIA (Coopération Italienne)  
Peykouk, route de Kombolé  
BP 262  
THIES

Fabrication de grandes multipales Tuzzi e Bardi.

**SRI LANKA :**

Wind Energy Unit  
2 A, Gregory's Avenue  
COLOMBO 7

Projet de diffusion de petites multipales avec CWD (Pays Bas). Voir aussi chapitre 4.

**TANZANIE :**

ARUSHA (Appropriate Technology Project)  
PO BOX 764  
ARUSHA

Programme de vulgarisation d'une éolienne simple autoconstructible (voir annexe 2).

**THAILANDE :**

VITA - Asia Fichol Office  
48 Soi Area 1  
Phalolyathin Road  
BANGKOK 4

Eolienne bois et pompe à chaîne pour irrigation par canal sur faibles hauteurs.

**TUNISIE :**

ASDEAR  
(Association pour le Développement et l'Animation Rurale)  
10 rue Eve Nohelle  
TUNIS

Promotion des éoliennes en Tunisie. Remise en état des anciennes machines et réalisation de prototype.

**ORGANISMES DE RECHERCHE****ALGÉRIE :**

CDCE (Centre de Développement de la Conversion d'Énergie)  
2 Bd Frantz Fanon  
BP 1017  
ALGER

Trois modèles d'éoliennes de pompage électriques à axe horizontal.

**ARGENTINE :**

Secretaria de Energia  
Av Julio A. Roca 651  
7e piso - Sector 6  
1322 BUENOS AIRES

Coordonne les travaux des centres de recherche répartis dans le pays, en particulier celui sur l'énergie éolienne situé dans le sud du pays (Province de Chumbut).

**BRÉSIL :**

Département de Génie Mécanique  
Université Fédérale du Rio Grande do Sol  
av Paulo Gama s/n  
9000 PORTO ALEGRE R.S.

Faisabilité d'un rotor Darrieus (6 et 18 m de diamètre) pour l'irrigation du riz.

**BURKINA FASO :**

ETSHER  
(Ecole de Techniciens Supérieurs en Hydraulique et Equipement Rural)  
KAMBOINSE

Eolienne en matériaux locaux avec pompe à chapelets.

Institut de Recherches sur les Energies Renouvelables  
BP 7192  
OUAGADOUGOU

Mesures et suivi de programmes de diffusion.

**CARAIBES :**

TEU (Technology and Energy Unit)  
Caribbean Development Bank  
PO BOX 408  
Willey ST MICHAEL  
BARBADE - West Indies

Travaille sur la production d'électricité et l'axe vertical. Publications sur les ressources éoliennes des Caraïbes.

**CHINE :**

Chinese Academy of Agriculture Mechanization Sciences  
BEIJING

Ressources éoliennes et réalisations en Chine.

**DANEMARK :**

RIS. The test station for windmills  
PO BOX 49  
DK 4000 ROSKILDE

Test de nombreuses machines. Essai d'un système de couplage diesel/énergie éolienne.

The Danish Centre for R. Energy  
Asgaard Sdr Ydby  
DK 7760 Huoup Thy

**DJIBOUTI :**

ISERT  
(Institut Supérieur de Recherches Scientifiques et Techniques)  
DJIBOUTI

Coopération avec VITA. Recherches pour le pompage sur grandes profondeurs.

**ESPAGNE :**

Grupo de Tafalla  
Navarre

Mise au point de plusieurs modèles de panémons (Savonius et "Savonius-darrieus) de 4 à 8 m de diamètre. Projet de tester l'éolienne MVZE de "Las Gaviotas" (Colombie).

**ÉTATS-UNIS:**

NAI (New Alchemy Institute)  
237 Hatchville Road  
East Falmouth - Massachussetts 02536

Logiciel de dimensionnement.



**ÉTHIOPIE :**

Ethiopian Water Works Construction Authority  
Faculty of Technology  
University d'Addis-Abeba  
ADDIS-ABEBA

Prototypes testés d'aérogénérateurs pour pompage, développement d'une multipale.

**FRANCE :**

ATOUT-VENT  
La Bastide des Adrets  
13119 St SAVOURNIN  
Tél : 42 72 43 85

Association qui collabore avec l'Institut de Mécanique de Statistique de la Turbulence de Marseille. Recherches sur un modèle Darrieus pour la production d'électricité.

CEPAZE  
18 rue de Varenne  
75017 PARIS

Mise au point d'une grande panémone à axe tournant pour pompage et entraînement de machines artisanales (moulins...).

ENEOLE  
Appt 719, Bât 3, Parc de la Rosière  
218 rue de Mende  
34100 MONTPELLIER

Essais de matériels peu coûteux de faible puissance.

**ISRAEL :**

MASEL Technologies LTD Research and Development  
17 Hakneset Street  
HOLON 58521

Combinaison éolienne rapide à faible solidité avec transmission hydraulique et pompe à piston classique.

**JORDANIE :**

Departement de Génie Mécanique  
Yarmouk University  
IRBID

Travaux sur rotor Savonius.

Voir aussi :

Natural Resources Authority  
PO BOX 7  
AMMAN

Royal Sciente Society  
(Dpt Génie Mécanique, section Energie solaire)  
PO BOX 6945  
AMMAN

Watter Supply Corporation  
PO BOX 5012  
AMMAN

**MALAISIE :**

Département de Génie Mécanique  
Université de Malaya  
KUALA LUMPUR

Recherche/Développement sur aérogénérateur et éolienne de pompage.

**MALI :**

LESO (Laboratoire d'Energie Solaire)  
BP 131  
BAMAKO

Organisme gouvernemental. Mise au point d'une éolienne en lien avec I.T.Power. 5 installées en 1986 pour l'hydraulique villageoise : diamètre 4 m, hauteur 12 m, 12 pales, roulements 2 cv, pompe India 60 mm.

**PAYS BAS :**

Netherlands Energy Research Foundation  
ECN  
PO BOX 1  
1755 ZG PETTEN

Aérogénérateur pour relevage (polders).

CWD (voir organismes de réalisations)

Recherches actuelles sur mise en drapeau, système de démarrage par vent faible, pompe de grand diamètre et nouveau modèle de 8 m de diamètre.

**ROYAUME UNI :**

Intermediate Technology Power  
The Warren  
Bramshill Road, Eversley  
Hants  
RG 27 OPR

Bureau d'étude issu de l'ONG "ITDG". Recherches actuelles sur petite multipale et transmission pneumatique basse pression.

**SÉNÉGAL :**

CERER (Centre d'Etudes et de Recherches  
sur les Energies Renouvelables)  
BP 476  
DAKAR

Suivi de programmes de diffusion, tests, gisement éolien.

**ÉTATS-UNIS:**

NAI (New Alchemy Institute)  
237 Hatchville Road  
East Falmouth - Massachusetts 02536

Logiciel de dimensionnement.

## **ORGANISMES D'INFORMATION ET DE CONSEILS TECHNIQUES**

### **BELGIQUE :**

COTA (Collectif d'Echanges pour la Technologie Appropriée)  
18 rue de la Sablonnière  
1000 BRUXELLES

ATOL (Equivalent Flamand du COTA)  
Blije Inkomststroot 9  
300 LEUVEN

### **BOTSWANA :**

BTC (Botswana Technology Centre)  
Private Bag 0082  
GABORONE

### **CANADA :**

Brace Research Institute  
Mc Gill University  
Ste Anne de Bellevue  
QUEBEC HO A1 CO

### **CHILI :**

CETAL (Centro de Estudios en Tecnología Apropiada para  
América Latina)  
Casilla 197 V  
VALPARAISO

CIPMA  
(Centre de Investigación y Planificación del Medio Ambiente)  
Juan Cristomo Jacques 2268  
Casilla 16362  
SANTIAGO 9

**DANEMARK :**

Centre Danois sur les Energies Renouvelables  
Asgaard Sdr. Ydby  
DK 7760  
HURUPHY

Agence Nationale de l'Energie  
Landemaerket 11  
DK 1119  
COPENHAGUE K

**ÉQUATEUR :**

CITA (Centro de Ingeniería para Tecnologías Adecuadas)  
av Murtado de Mendoza  
10-41 y Rio Malacator  
CUENCA

**ÉTATS-UNIS:**

AWEA (American Wind Energy Association)  
210 Massachussets Avenue N.W.  
4e Floor  
WASHINGTON D.C. 20036

VITA  
3706 Rhode Island Avenue  
Mt Rainier MARYLAND  
USA 20 822

**FRANCE :**

GRET (Groupe de Recherches et d'Echanges Technologiques)  
213 rue Lafayette  
75010 PARIS  
Tél : (1) 42 39 13 14

AMFE (Agence Française pour la Maîtrise de l'Energie)  
27 rue Louis Vicat  
75737 PARIS Cedex 15  
Tél : (1) 47 65 20 00

CELIB  
Rue Daniel Trudaine  
Kerport  
56600 LANESTER  
Tél : 97 76 29 30

A.E.E. (Association pour l'Energie Eolienne)  
S/C Mr Drivière  
ENSAM  
123 Bd de l'hôpital  
75013 PARIS

Espace Eolien Régional  
23 rue Gosselet  
59000 LILLE  
Tél : 20 52 12 02

Groupe de Travail Eolien  
L'Herman Molac  
56230 QUESTEMBERT

**INDE :**

TER  
(Tata Energy Research Institute)  
Documentation Centre  
Bombay House  
24 Homi Mody Street  
400023 BOMBAY

**MALI :**

I.T.POWER  
BP 7088  
BAMAKO

**MAURITANIE :**

CNEA (Cellule Nationale pour les Energies Alternatives)  
Ministère de l'Energie et de l'Hydraulique  
BP 1150  
NOUAKCHOTT

**MEXIQUE :**

CEESTM  
(Centro de Estudios Económicos y Sociales del Tercer Mundo)  
Division "transfert et usage de T.A."  
Porfirio Díaz 50  
Col. San Jeronimo Lidice  
MEXICO 20 D.F.

**PAYS-BAS :**

TOOL Technical Development With Developing Countries  
Entrepôtdok 68 a  
1018 AD AMSTERDAM  
CWD (voir organismes de réalisations)  
IRC (International Reference Centre  
For Community Water supply and Sanitation)  
PO BOX 93190  
2 500 AD THE HAGUE

**PÉROU :**

ITINTEC  
Jr Morelli 2 da.Cdea  
av Las Partes  
San Bonja - Surquillo  
Aptdo 145 LIMA  
CCTA (Comisión de Coordinación de Tecnología Andina)  
Av Javier Prado Oeste 595  
LIMA 17

**PHILIPPINES :**

PCATT  
(Philippines Centre For Appropriate Technology and Training)  
224 Diego Silang Street  
Philippines 4201

**RFA :**

GATE (German Appropriate Technology Exchange)  
Postfach 5180  
6236 ESCHBORN 1

IBEK  
Postfach 210 515  
7 500 KARLSRUHE 21

**ROYAUME-UNI :**

BWEA (British Wind Energy Association)  
4 Hamilton Place  
LONDON W1V 0BQ

Intermediate Technology Power (voir organismes de recherche)

**SÉNÉGAL :**

CERER (voir organismes de recherche)

**SUISSE :**

SKAT (Swiss Centre For Appropriate Technology)  
Varnbrielstrasse 14  
9000 ST GALLEN

**TANZANIE :**

CAMARTEC  
(Centre For Agricultural Mechanization and Rural Technology)  
PO BOX 764  
ARUSHA

**THAILANDE :**

RERIC (Renewable Energy Resources Information Centre)  
PO BOX 2754  
BANGKOK 10501



## ORGANISMES INTERNATIONAUX

Centre de Liaison pour l'Environnement  
PO BOX 72461  
NAIROBI  
KENYA

(Ensemble des ONG qui collaborent avec le PNUE)

Centre UNITAR/PNUD sur les petites ressources énergétiques  
(Nations Unies)  
Via Panama 12  
00198 ROME  
ITALIE

CIEH (Centre Interafricain d'Etudes Hydrauliques)  
BP 369 OUAGADOUGOU  
Burkina Faso

CRES (Centre Régional pour l'Energie Solaire)  
BP1872  
BAMAKO  
MALI

OLADE (Organizacion Latinoamericana de Energia)  
Av Occidental (Ant. Ed. CEPE)  
Casilla 6413 QUITO  
EQUATEUR


**FOURNISSEURS DE PLANS  
POUR L'AUTOCONSTRUCTION**

**MULTIPALES A VOILES**

Éolienne Crétoise Du N.C.A.T. :

NCAT - National Centre For Alternative Technology  
Machynlleth  
POWYS  
Pays de Galles

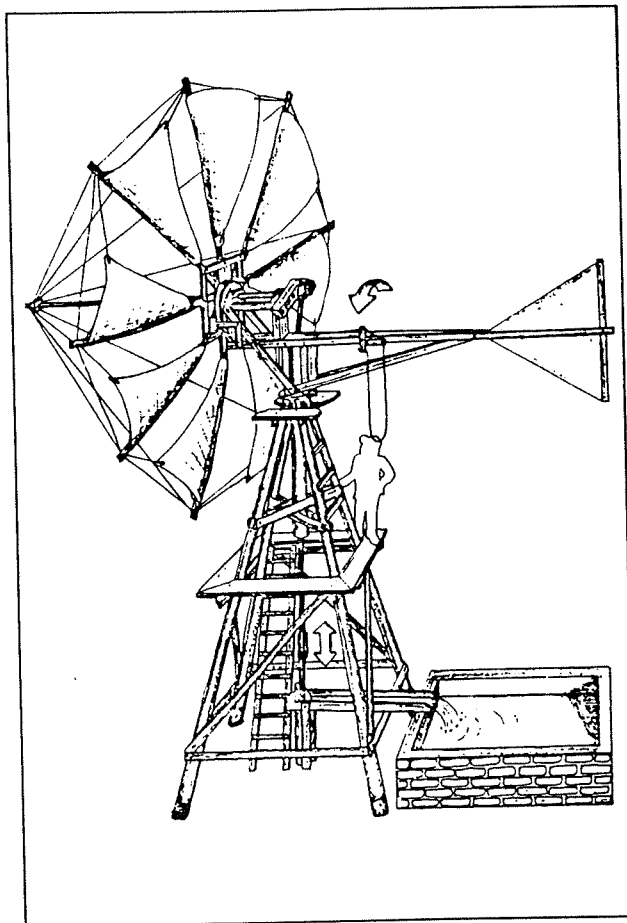
Roue multipale à 8 voiles de 4 m de diamètre principal. matériau : bois.  
Production d'électricité ou couplage avec une pompe à piston.

**Éolienne Crétoise de W.O.T. (fig.54)**

Demander manuel de fabrication à ATOL en Belgique ou TOOL aux Pays Bas (voir organismes de formation).

Rotor de 6 mètres de diamètre équipé de 8 voiles triangulaires. Pompe piston en tube PVC - Bâti en bois.

**Figure 54:**  
éolienne  
crétoise de  
W.O.T.



**Éolienne POGHIL**

Skri AMM Murugappa Chettiar Research Centre  
Photosynthesis and Energy Division  
Tharamani  
MADRAS 600 042  
INDE

Matériaux bois et fer. Rotor 3 pales en toile de 3,4 m de diamètre. Pompe à piston de 50 mm, pompage sur 8 mètres.

**Éolienne POLOMO**

I.T.D.G.  
9 King Street  
Covent Garden  
LONDON WC2E 8HN  
Grande Bretagne

Diffusée en Ethiopie dans les années 70 par les actuels dirigeants de I.T.Power (voir paragraphes précédents) I.T.D.G. diffuse un manuel de fabrication : "How to build a cretan sail windpump". Matériau fer. Pompe à piston, éolienne à voile de 4 et 5 m de diamètre.

**MULTIPLALES MÉTALLIQUES****Éolienne I.T.D.G.**

Diffusée par I.T.D.G.(voir adresse plus haut et description dans l'annexe 3).

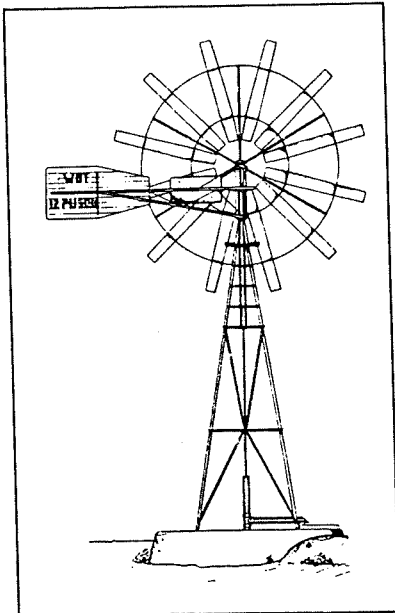
**Éolienne SAHORES**

Jean Sahores, I.T.Dello, BPAR (voir organismes de réalisations)

Multipale de 3 m de diamètre pouvant être fabriquée par un petit artisan rural ou un paysan. Roue de 16 pales en tôle d'aluminium avec système de régulation. Mât en bois haubanné. Pompe à piston reliée à l'éolienne par un balancier réglable. Démarre par vents faibles.

## Multipales CWD (fig.55)

Figure 55:  
éolienne  
"CWD  
5000" à 6 ou  
8 pales  
métalliques,  
modèle  
largement  
testé au  
Sri Lanka,  
au Soudan  
et en Inde.



CWD (voir organismes de réalisation)

Eoliennes 6 à 8 pales en métal selon le modèle, à calage fixe. Faible solidité (0,3 à 0,4), conçues pour des vents faibles à modérés et pour une durée de vie de 10 ans. Pompe à piston. CWD fournit 4 manuels pour la fabrication, l'installation et l'utilisation de la "CWD 5000".

**Multipale VITA**

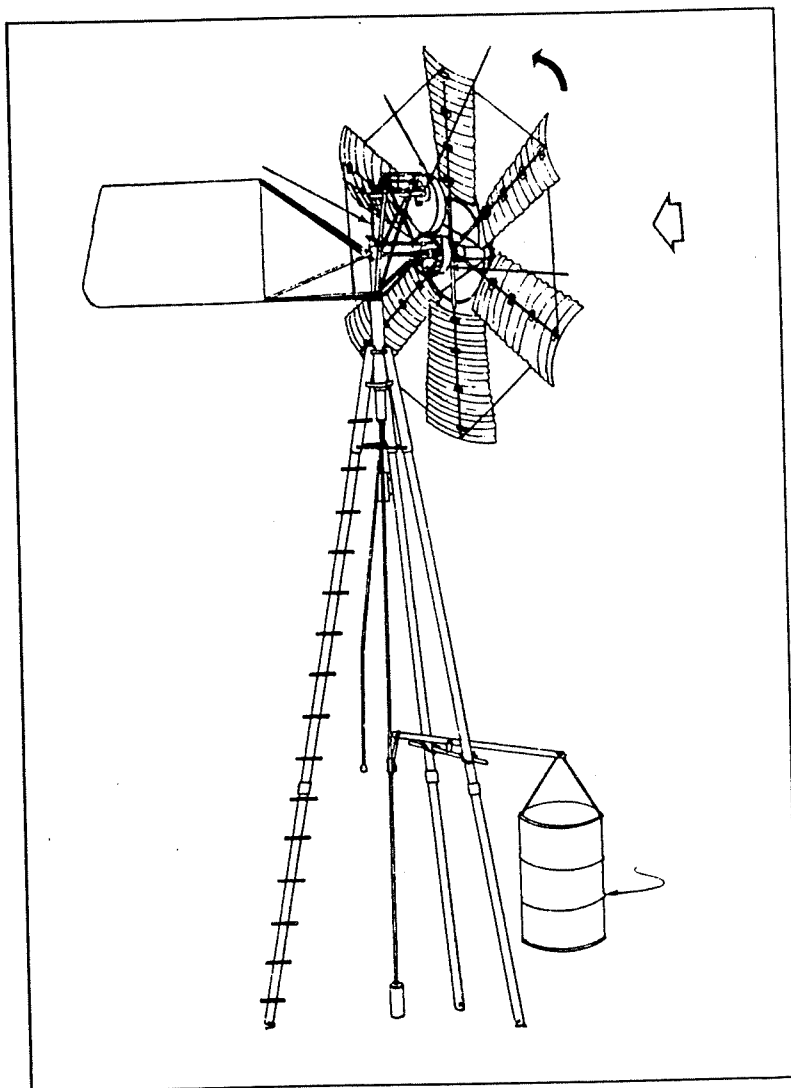
Plan disponible auprès de VITA (voir organismes de réalisations)

Multipale de 2 ou 4 m de diamètre. Métal - mécanosoudure.

**Eolienne ARUSHA (fig.56)**

Manuel de fabrication disponible auprès d'Arusha Appropriate Technology Project (voir organismes de réalisation).

**Figure 56:**  
éolienne  
ARUSHA  
(Tanzanie) :  
modèle  
métallique  
auto-  
constructible  
1 Roue  
excentrique  
2 Tige de  
pompe  
3 Moyeu  
4 Contre-  
poids



A axe horizontal, 6 pales, 5 m de diamètre. Pompe à piston. Absence de système de régulation. Mécanosoudure.

### Éolienne à transmission hydraulique

"Toujours mieux" (fig.78)  
 Groupe DATAG  
 KOTTAKUPPAM Auroville  
 605 104  
 TAMILNADU  
 INDE

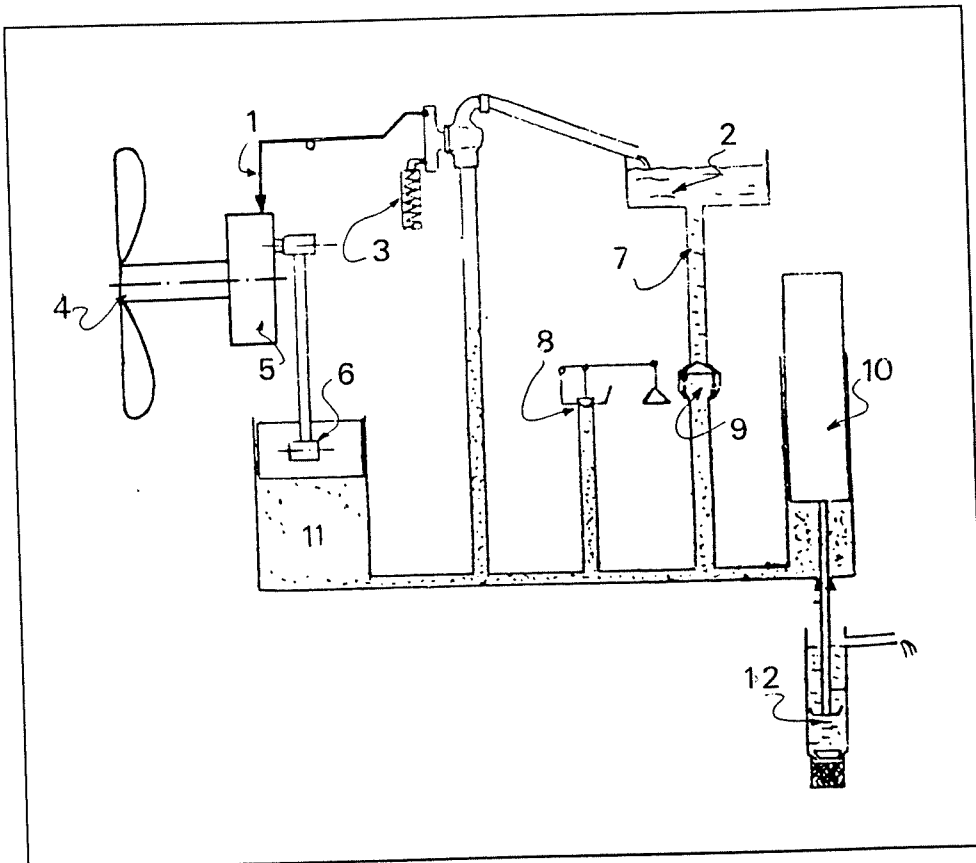


Figure 57: le système de transmission hydraulique de l'éolienne "toujours mieux" en Inde

1 Palpeur

4 Rotor

7 Basse pression

10 Pisto secondaire

2 Réservoir

5 Came

8 Valve de sécurité

11 Haute pression

3 Temporisateur

6 Piston primaire

9 Clapet anti-retour

12 Pompe

Multipale 6 m de diamètre métallique avec une transmission hydraulique permettant de supprimer le couple de démarrage et d'adapter le débit aux faibles vitesses de vent.

#### Éoliennes Savonius et autres

NCAT (voir plus haut)

Sunflower Power Co Inc  
Route 1  
PO BOX 93-A  
Oskaloosa, Kansas 66066  
ÉTATS-UNIS

Brace Research Institute (voir organismes d'information)

Centre for Appropriate Technology  
University de Delft  
Mijnbouwplein 11, Kab 2.15  
2628 RT DELF  
Pays Bas

VITA (voir plus haut)

Publie un guide détaillé en français et en anglais sur le rotor Savonius (surtout pour la production électrique)

Indian Institute of Science  
Bangalore  
INDE

Manuel de construction. Originalité de la pompe à membrane constituée d'un pneu de 35 cm de diamètre.

GTE (voir organismes d'information)

Dossier d'autoconstruction d'aérogénérateur (diamètre : 5 m, puissance : 2 kW) Réalisable à partir de pièces de récupération automobiles.

National Energy Administration  
Pibultham Villa  
Winth Energy Unit  
Kasatsuk Bridge  
BANGKOK 5  
THAILANDE

Eolienne rapide originale faite d'une simple hélice bipale en bois, 4 pales possibles en zone peu ventée. Possibilité d'ajouter des voiles pour en faire une éolienne lente. Pompe rotative à palettes et chaîne ou à chapelet. A faire soi-même ou à acheter.

Pays	Réalisations de terrain	Recherche	Infos conseils techniques	Fournitures plans
ALGÉRIE ARGENTINE		CDCE Secretaria de Energia		
BELGIQUE			COTA ATOL	ATOL
BOTSWANA BRÉSIL	RIIC EMBRATER	BTC Université Rio Grande do Sul ETSHER		
BURKINA FASO				
CANADA CAP-VERT CARAIBES CHILI	IRER IRDC DER TEKHNE	BRACE TEU	BRACE CETAL CIPMA	BRACE
CHINE		Chinese Academy of Agriculture		
COLOMBIE DANEMARK	Las Gaviotas	Centre Danois sur les E.R. RIS ISERT	Centre Danois sur les E.R.	
DJIBOUTI ÉQUATEUR ÉTHIOPIE FRANCE	Cepaze I.T.Dello Technap J.Sahores	Université Atout-Vent Cepaze Eneole	CITA Gret AFME Celib AEE EER GTE TERI	I.T.Dello GTE J.Sahores
INDE	TOOL-ORP DNES SSSPM		Murugappa chettiar	Shri AFM



ISRAEL		Masel technologies Ltd		
ITALIE	LVIA CAST			
JORDANIE		Université		
MALAISIE		Université		
MALI				
MAROC	CDER			
MAURITANIE			CNEA	
MEXIQUE			CEESTM	
PAYS BAS	CWD	CWD Netherlands Energy Research Foundation	TOOL CWD	TOOL CWD
PÉROU			IRC ITINTEC CCTA PCATT	CAT
PHILIPPINES				
ROYAUME UNI	I.T.Power	I.T.Power	BWEA I.T.Power	ITDG NCAT
SÉNÉGAL	BPAR LVIA	CERER	CERER	BPAR
SRI LANKA	W.E.U.			
SUISSE			SKAT	
TANZANIE	Arusha A.T. project	CAMARTEC	Arusha A.T. project	
THAÏLANDE	VITA - Asia Fiel Office		RERIC	
TUNISIE	ASDEAR			
USA	VITA	NAI	AWEA VITA	VITA Sunflower Power
Organismes Internationaux			CIEH (Burkina Faso) CRES (Mali) OLADE (Equateur) Centre liaison pour environ (Kenya) Centre petites én. (Italie)	

## LES CONSTRUCTEURS

Vous trouverez ici la liste des constructeurs d'éoliennes ainsi que quelques données techniques sur leurs matériels. Toutes les données proviennent de la documentation fournie par les constructeurs eux-mêmes.

On distingue quatre principaux types de matériels :

- les multiples de petite taille, de 2 à 5 m de diamètre
- les multiples de grande taille, de 5 à 10 m de diamètre, moins nombreuses
- les petits aérogénérateurs (< 1 kW)
- les grands aérogénérateurs (> 1 kW).

Pour ces deux dernières catégories, le pompage est de type électrique. Toutefois leur utilisation pour l'exhaure demeure encore exceptionnelle et difficile; nous ne fournirons là qu'une liste succincte de fabricants.

Les prix sont difficiles à déterminer, en raison des multiples variations possibles de montage; pièces de rechange ou non, port, emballage, taxes....

Pour fixer les idées, voici les ordres de grandeur relevés en 1987 (HT, départ usine) :

- petite multipale : 6 000 à 20 000 FF
- grande multipale : 60 000 à 100 000 FF
- petit aérogénérateur : 5 000 à 20 000 FF
- grand aérogénérateur : 150 000 à 250 000 FF.

Pour les éoliennes multiples, le pylône représente souvent une grosse part du coût total.

La garantie est généralement de 1 an mais peut aller jusqu'à 5 ans.

Quand vous adressez une demande à un constructeur, précisez :

- l'usage prévu,
- le débit nécessaire par jour
- la profondeur du point d'eau et la variation de hauteur d'eau dans l'année,
- la hauteur du pylône souhaitée ou les obstacles présents autour du point d'eau,
- la hauteur à laquelle vous souhaitez relever l'eau au dessus du sol, par exemple si vous prévoyez un réservoir de stockage surélevé,
- les vents de votre région (vents faibles, fortes rafales, sable...).

Ces constructeurs sont récapitulés par pays en fin de chapitre.

## **PETITES MULTIPALES (DIAMÈTRE < 5 M)**

S.A. Guillemot  
 Place de l'Eglise  
 10270 LUSIGNY SUR BARSE  
 FRANCE  
 Tel 25 41 22 26

### ÉOLIENNE LE SIMOUN

Eoliennes multipales couplées à une pompe à piston. Roues de 2 à 4 m de diamètre. Régulation par pivotement de la roue (palette latérale ou axe décentré selon les modèles). Trois modèles constitués par 3 têtes différentes (roulements étanches ou bain d'huile avec réducteur). Pompe et rotor sont interchangeables d'un modèle à l'autre. Les pompes sont des pompes à piston classiques allant de 50 mm à 200 mm de diamètre. La course est de 8 cm. Pour le plus grand modèle elle est de 20 à 30 cm.

Eoliennes adaptées à toutes profondeurs : Série S : 15 m, séries BP et HP : 150 m. Les pylônes vont de 4 à 12 m. Possibilité de placer un réservoir sur le pylône.  
 (Expérience au Maroc avec l'AFME)

HUMBLOT  
8 rue d'Alger  
88630 COUSSEY  
FRANCE  
Tél : 29 06 93 62

Humblot possède une gamme de roues multipales allant de 1,75 à 8 m de diamètre. On note plusieurs types de têtes, à carter à graisse ou à bain d'huile, à courses réglables ou non, les modèles les plus perfectionnés étant destinés aux profondeurs de pompage supérieures à 20 m.

Il existe plusieurs types de pompe selon les profondeurs.

La régulation est un système à palette latérale faisant pivoter la roue.

Humblot propose aussi une éolienne multipale (pales plastiques) de très grand diamètre (8 m) avec démultiplication (3/1) pour gros débits :  $50 \text{ m}^3/\text{h}$  à 10 m par vent de 10 m/s (diamètre piston de pompe : 300 mm).

- a) Idée - idéale = HMT maxi 20 m - course 26 mm  
idéalo-idéesse = HMT supérieure à 20 m course réglable
- b) diamètres de pistons de pompe disponibles :  
- Junioréol : 65 ou 92 mm  
- Géantéol : 50 - 80 - 90 - 100 - 120 - 140 mm.

Ces dernières pouvant être en double ou quadruple postes.

Les modèles junioréols sont livrés en éolienne complète ou en kit. Montage par l'acheteur ou professionnel non spécialiste.

Modèle	HMT max (m)	Ø roue (m)	Nb pales	débit max théorique ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
Cadétéol	15	1,75	4-6 ou 8	0,66
Miniéol	20	2	8	0,66
Ideol	30	2 et 2,25	12	0,81
Junioréol	45	2,25 et 2,50	12	3,45
Senioréol st.	60	3	12	9,62
Senioréol super	70	4	12	8,86

2200 unités vendues depuis 1936, surtout dans les petits modèles. Installations en Algérie et en Mauritanie.

Ets PONCELET et CIE  
Constructions mécaniques  
Place Victoire  
10380 PLANCY L'ABBAYE  
FRANCE  
Tél : 25 37 40 15

### ÉOLIENNE OASIS

Petites éoliennes multipales de pompage très répandues : 12 000 exemplaires ont été installés sur les 40 dernières années dans tous pays.  
Rotors de 1,75, 2,25 et 2,50 m de diamètre.

Pompes de 45, 50, 60 et 70 mm de diamètre + corps en laiton.

La hauteur maximum de pompage (HMT) est de 35 à 40 m.

Le montage de l'ensemble est réalisable par l'utilisateur sur instructions du constructeur.

Coût modeste; bonne tenue par tempête : matériel largement éprouvé.  
Bon marché et bonnes références dans les pays en développement.

Ets VIAU  
84210 PERNES  
FRANCE  
Tél : 90 61 32 87

Fournit une multipale en kit aux caractéristiques suivantes :

- rotor de 2,25 et 2,50 m,
- pylône de 8 ou 10 mètres,
- carter à bain d'huile,
- pompe à piston 65, 50 et 80 mm de diamètre,
- palette de régulation et gouvernail.

En option, peut fournir un frein de commande au sol, un presse-étoupe avec soupape et clapet et la tuyauterie nécessaire.

En fabrication depuis 1977, installations surtout situées dans le sud-est de la France.

EOTEC  
R.N. 117  
LAVELANET DE COMMINGES  
31220 CAZERES  
Tél : 61 87 69 69

Produit 5 types de têtes d'éoliennes multipales de 2,05 m à 3,20 m de diamètre équipées de 6 à 8 pales qui peuvent être couplées à 5 types de pompes.

D'entretien simple, ces éoliennes de pompage sont faciles à monter et fonctionnent sans surveillance. Elles ont été spécialement étudiées pour les régions où l'approvisionnement en eau est difficile.

BOSMAN  
BOSMAN WATERBEHEERSING EN  
MILIEUVERBETERING BV  
PO BOX 3701  
3265 ZG PERSHIL  
PAYS BAS  
Tél 0031 - 18691022

Entreprise hollandaise leader dans le domaine du drainage des polders et du retraitement des eaux usées. Commercialise 2 types d'éoliennes de pompage.

- "Bosman fully automatic windmill type 77", petite multipale pour le drainage : 4 pales (surface balayée 2,4 m<sup>2</sup>), 3 m de diamètre, HMT maximale 4 mètres.
- "5000 LW" : modèle de multipale mis au point par l'ONG CWD - 8 pales, 5 m de diamètre, démarrage à 3 m/s.

Débits :					
Modèle	Vit. vent	HMT	Débit	HMT	Débit
Type 77	5 m/s	1,5 m	14 m <sup>3</sup> /h	2 m	8 m <sup>3</sup> /h
	8 m/s	2,5 m	46 m <sup>3</sup> /h	4,5 m	19 m <sup>3</sup> /h
5000 LWW	5 m/s	13 m	0,9 m <sup>3</sup> /h*	20 m	0,6 m <sup>3</sup> /h
	7 m/s	13 m	1 m <sup>3</sup> /h*	20 m	0,6 m <sup>3</sup> /h
* calculé					

AERMOTOR  
 The Valley Pump Group  
 PO BOX 1364  
 Conway ARKANSANS 72032  
 U.S.A.  
 Tél : (501) 329 9811

Il s'agit des éoliennes les plus vendues aux Etats-Unis. Le rotor, moulin américain multipale classique, existe en 6 dimensions de 2 à 5 m de diamètre. La régulation, par vent fort, est assurée par la mise en drapeau de la roue. (fig.58)

Une large gamme de pompes à piston est disponible : 19 tailles de piston allant de 44 à 203 mm de diamètre.

Pour quelques uns d'entre eux, les hauteurs maximales d'exhaure sont les suivantes (pour des vents de 7 à 9 m/s).

La vitesse de rotation maximum de la roue varie de 53 à 125 tr/mn. La démultiplication par engrenage est comprise entre 3,3/1 et 4/1, ce qui correspond à une fréquence de pompage de 32 coups/mn pour les petites roues à 16 coups/mn pour les rotors de grand diamètre. Le montage se fait par l'utilisateur sur notice.

Débit m <sup>3</sup> /h	diamètre piston (mm)	diamètre rotor					
		1,8	2,4	3	3,7	4,3	4,9
0,6	44	40 m	56 m	85 m	128 m	183 m	305 m
1,8	76	14 m	21 m	31 m	47 m	67 m	110 m
3,1	102	8 m	12 m	18 m	26 m	38 m	61 m
4,9	127	5 m	8 m	11 m	17 m	24 m	40 m
7,1	152	—	5 m	8 m	12 m	17 m	26 m
12,5	203	—	—	4 m	7 m	9 m	15 m

DEMPSTER INDUSTRIES INC  
 PO BOX 848  
 NEBRASKA 68310  
 ETATS-UNIS  
 Tél (402) 223-4026

Il existe différents modèles :

- Roues de 1,8; 2,4; 3,1; 3,7 et 4,3 m de diamètre. Le pylône est en cornière d'acier renforcé par des tirants.
- Hauteurs : 6,7, 8,5 et 11,9 m.
- La tête est composée d'engrenages dans un bain d'huile d'un rapport de 3, 3,5 ou 4 à 1.
- Le piston de la pompe pour puits profond est récupérable sans démonter toute la colonne d'exhaure.
- Les différents diamètres de piston vont de 48 mm à 102 mm.



Débits annoncés					
Ø roue (m)	1,8 m		3,1		4,3
Vitesse vent (m/s)	6,8		8		9
débit (m <sup>3</sup> /h)					
à 10 m	1,5		2,4		
20 m	0,6		1,8		
30 m	0,5		1,4		2,7
Ø roue (m)	1,8	2,4	3,1	3,7	4,3
prof.max d'exhaure	37 m	52 m	78 m	118 m	177 m

THE HELLER-ALLER COMPANY  
 PO BOX 29  
 OHIO 43 545  
 ETATS-UNIS

C'est un constructeur de longue date de classiques éoliennes multipales. Le nombre de pales est généralement important. Il existe 4 modèles de 2 à 4 m de diamètre.

Ces éoliennes sont équipées d'engrenages et d'une démultiplication (3/1).

La pompe est une pompe à piston comportant divers diamètres, de 41 à 152 mm.

diamètre rotor (m)	1,8	2,4	3	3,7
HMT maxi (m)	40	48	77	92
Ø piston (mm) pompe maxi	76	89	102	153

ERNEST HAYES LTD (NZ)  
PO BOX 33 - 042  
CHRISTCHURCH 4  
NOUVELLE ZELANDE

L'éolienne "Wonder" de Hayes est une petite éolienne de pompage. 3 modèles sont proposés : 8, 16 et 20 pales. L'installation est à réaliser soi-même.

Le pylône est très simple (hauteur maximum : 6 m).

La pompe est une pompe à piston (3 diamètres au choix 45, 51 et 64 mm) que l'on peut installer en poste double, le corps de pompe est en laiton. Plus de 1000 exemplaires ont été installés dans divers pays.

SOUTHERN CROSS (Aust)  
Toowoomba Foundry PTY Ltd  
PO BOX 109  
Toowoomba QUEENSLAND  
AUSTRALIA 4350

Ne fabrique que des éoliennes de pompage sous la marque : Southern Cross. Expérience centenaire en la matière. Références d'installations dans une cinquantaine de pays dont de nombreux pays du Tiers Monde. Peut encore fournir des pièces de rechange sur des modèles fournis il y a 50 ans. Construit aussi une gamme ("R") de grandes multipales voir plus loin.

Il y a deux gammes de matériels :

- "IZ" diamètre rotor de 2 à 4 m,
- "Sénéchal" diamètre rotor de 5 à 8 m,

"IZ" : 5 modèles. 18 pales en acier galvanisé. Carter à bain d'huile. Transmission par double engrenage, démultiplication et double tringle-rie de commande. Roulements facilement démontables. Régulation par effacement de la roue dont l'axe est déporté. Adaptable sur tout type de tour.

<b>diamètre (m)</b>	1,8	2,4	3	3,7	4,3
<b>rotor</b>					
<b>course 1 (mm)</b>	133	146	165	184	184
<b>course 2 (mm)</b>	102	114	133	152	152
<b>démultiplication</b>	4/1	3/1	2,6/1	2,3/1	2,3/1
<b>HMT Maxi (m)</b>	22	40	72	96	135
<b>débit à 10 m</b> <b>m<sup>3</sup>/h</b> <b>(V = 6 m/s)</b>	0,9	1,8	2,7	4,2	6,4

HERCULES (Arg)  
 Industria Metalurgica  
 J.A. Saglio S.A.  
 Buenos Aires  
 1460 Bdo de Irigoyen 1470  
 ARGENTINE

Eoliennes multipales tout à fait classiques couplées à une pompe à piston.

Ces éoliennes sont dotées de systèmes de frein automatique. Lorsque le château d'eau est plein, l'eau est envoyée dans un ballon qui coulisse peu à peu sous l'effet du poids de l'eau et actionne le frein. Le château d'eau peut-être placé sur le mât ou à côté.

diamètre de la roue	m	2,40	3,00	3,70	4,30	4,90
vitesse de rotation	t/mn	25	23	21	18	15
course du piston	cm	18	24	27,5	30	34,5
<b>HMT 10 m</b>						
- Ø cylindre	mm	102	127	152	178	203
- débit	m <sup>3</sup> /h	2,2	3,6	5,2	7,7	10,2
<b>HMT 25 m</b>						
- Ø cylindre	mm	64	76	102	114	127
- débit	m <sup>3</sup> /h	0,8	1,4	2,5	3,2	3,9
<b>HMT 50 cm</b>						
- Ø cylindre	mm	-	-	64	76	102
- débit	m <sup>3</sup> /h	-	-	1	1,5	2,5

————— **ÉOLIENNES INDIENNES**

Agro-aids  
27 Shrunagar Shopping Centre  
M.G. Road  
BANGALORE 560 001  
INDE

Un seul modèle commercialisé (WP 2 du N.A.L.) : roue de 24 pales, 4,8 m de diamètre, pompe à piston de 100 ou 150 mm de diamètre. Pylône de 10 m.

Auto Spare Industries  
Wind Machines Division  
C-7 Industrial Estate  
PONDICHERY 605 004  
INDE

Rotors de 12 pales de 4 m ou 2 m de diamètre. Bain d'huile à vidanger annuellement. Course réglable. Pompe à piston en laiton.

Institute of Engineering and Rural Technology (IERT)  
26 Chatham Lines  
Wear Prayag Railway Station  
ALLAHABAD 211 002

Fabrique les éoliennes diffusées par SWD (Hollande). Il en existe 3 modèles (12 pales), de 3,5 à 5 m de diamètre.

REYMILL Steel Products  
STA ROSA, NUEVA ECIIJA  
PHILIPPINES

Commercialise des éoliennes mutipales. 3 tailles de rotor : 3, 3,6 et 4,3 m régulation par pivotement de la roue. Frein manuel également. Le pylône peut comporter un réservoir pour l'eau pompée, intégré dans sa structure. Plusieurs tailles de pompes

pompe	course	HMT Maxi
45 mm	150 à 200 mm	90 m
76 mm	150 à 200 mm	90 m
102 mm	100 à 150 mm	18 m

## GRANDES MULTIPALES (DIAMÈTRE > 5 MÈTRES)

ITDG  
9 King Street Covent Garden  
LONDON WC 2 E 8 HN  
ANGLETERRE

BOB Harries Engineering Ltd  
Kanamaini Estate  
PO BOX 40  
THIKA  
KENYA

MERIN Ltd  
Head Office, Dada Chambers  
M.A. Jinnah Road  
Kanachi 2  
PO BOX 4145  
PAKISTAN

L'ONG "ITDG" en Angleterre et ces 2 industriels commercialisent l'éolienne mise au point par ITDG)

BOBS HARRIES ENGINEERING LTD  
Karamaini Estate  
PO BOX 40  
THIKA  
KENYA  
Tél 47 234

Eoliennes mises au point par ITDG. Equipées de 6, 12 ou 24 pales à la demande. Pales en fibre de verre. Pylône en tube de 8 à 18 cm. Pompe à double effet quand le puits n'est pas profond ou pompe du commerce.

diamètre rotor	profondeur d'exhaure maximum
3,7 m	90 m
4,9 m	150 m
6,1 m	210 m
7,3 m	240 m

S O U T H E R N

Construit aussi une gamme de petites multipales (voir chapitre plus haut).

VOLTAS  
 Agro Industrial Products Division  
 19 J.N. Heredia Marg.  
 Ballard Estate  
 BOMBAY 400 038  
 INDE

Construit des éoliennes de 6 ou 12 pales, 6 m de diamètre. Pompe à piston en laiton et cloche à air. Pylône de 7 à 12 m. Il s'agit de l'éolienne diffusée par I.T.D.G.

SYDNEY WILLIAMS and Co PTY Ltd  
 PO BOX 22  
 Dulwich Hill  
 New South Wales  
 AUSTRALIA 2203

Constructeur des plus grosses éoliennes multipales disponibles en série.  
 11 modèles de 2,5 à 9 m de diamètre.  
 Roues multipales classiques commandant une pompe à piston.

VITA (VOLUNTEERS IN TECHNICAL ASSISTANCE)  
48 Soi Arca 1  
Phaholyothin Road  
BANGKOK 4  
THAILANDE

Eoliennes pour l'irrigation, multipales, hauteur maximum de pompage :  
2 m, pompe à chapelet (tube PVC de 200 mm).  
Diamètre du rotor 6 m : hauteur 7 m. Transmission directe par courroie.  
Garantie 1 an. Prix total 9 300 FF.

HUMBLOT  
(voir plus haut)

Modèle Géantéol : HMT Maxi 100 m

- rotor 5 et 6,5 m
- 12 pales
- débit max théorique 61 m<sup>3</sup>/h.

Contrairement aux autres modèles, celui-ci n'est pas encore l'objet d'une large diffusion, il est plutôt à l'état de prototype.



## PETITS AÉROGÉNÉRATEURS

ENAG S.A.  
255 route de Pont l'Abbé  
29000 QUIMPER  
FRANCE  
Tél 98 55 19 97

PROENGIN  
3 rue de l'Industrie  
78210 St Cyr l'Ecole  
FRANCE  
Tél (1) 30 58 47 34

ZEPHENEBO, commercialisé  
par Superself loisirs  
65 rue de Reuilly  
75012 PARIS  
FRANCE  
Tél (1) 43 07 28 83

Marlec Engineering Co Ltd  
Unit 5, Pillings Road Ind Est  
Oakkam  
RUTLAND, LE 15 6 QF  
ROYAUME-UNI

## GRANDS AÉROGÉNÉRATEURS

Windkraft - Zentrale  
2343 Brodersky  
Kappeln  
RFA

INSTO Foundation  
1-A, Zusterstag  
PO BOX 570  
4200 AN GORINCHEM  
PAYS BAS

AEROWATT : 6 rue des Coquelicots  
Z.A. des petits canneaux  
94380 Bonneuil S/Marne  
FRANCE  
Tél (1) 43 39 78 83

## MACHINES DIVERSES

LUBING INTERNATIONAL  
62840 SAILLY SUR LA LYS  
FRANCE  
Tél 21 27 60 68  
(Constructeur allemand)

Il s'agit d'une éolienne multipale pas tout à fait conventionnelle. Le rotor n'est pas affublé d'un gouvernail. Il se place de lui même "sous le vent".

Le rotor possède 4 ou 6 pales. Dans ce dernier cas, 3 de ces 6 pales sont mobiles sur leur axe longitudinal. Ces 3 pales mobiles assurent la régulation de la vitesse de rotation en changeant de pas lorsque la vitesse du vent dépasse 7 m/s.

Dans les 2 cas, le diamètre du rotor est de 1,5 m et la vitesse de rotation (qui croît rapidement avec celle du vent) rapide.

Le pylône est un tube de 60 mm haubanné par câble et livré en 3, 6, 9 ou 12 m. L'eau de refoulement remonte à l'intérieur du mât jusqu'au même niveau que celui du réservoir de sortie.

Le corps de pompe est en laiton. Le joint du piston en matière synthétique. Trois diamètres de piston : 50, 40 et 35 mm. Tuyauterie de refoulement en 1" (26-34 mm).

La hauteur maximum de refoulement est de 20 m.

A noter une éolienne de 2,2 m de diamètre (type M 022) pouvant aller jusqu'à 40 m et d'un débit plus important.

L'installation de la machine est réalisable soi-même.

Lubing construit également une éolienne pour le relèvement d'eau à faible hauteur (drainage) (3 m maximum) pouvant atteindre un débit de 50 m<sup>3</sup>/h.

L'éolienne M 015 est utilisable couplée à une pompe à air pour oxygénation des étangs.

ELASTERM APS  
66 Dronningensgade  
1420 Copenhagen K  
DANEMARK

Propose une éolienne de pompage à axe vertical, selon un modèle de 4 pales de type panémone adapté sur une pompe à membrane.  
Démarrage à 2,5 m/s sur faible profondeur (3,8 m) et à 5 m/s sur de plus grandes profondeurs.

C'est un nouveau produit, le constructeur signale un exemplaire vendu pour l'Éthiopie.

V	débit mesuré à HMT		débit théorique à HMT	
	3,8 m		10 m	
4 m/s	16,5 l/mn	0,99 m <sup>3</sup> /h	7,5 l/mn	0,93 m <sup>3</sup> /h
5 m/s	19 l/mn	1,14 m <sup>3</sup> /h	15,5 l/mn	0,93 m <sup>3</sup> /h
6 m/s	21 l/mn	1,26 m <sup>3</sup> /h	19 l/mn	1,14 m <sup>3</sup> /h

	petite multipale	grande multipale	petit aérogénérateur	grand aérogénérateur
FRANCE	Guilleminot Humblot Poncelet Viau Lubing	Humblot	ENAG  Proengin  Zéphire 60	Aérowatt
PAYS BAS	Bossmann	Insto		
DANEMARK	"Elasterm Aps"			
RFA				Windkraft Zentrale
ROYAUME UNI		ITDG	Martec	
ARGENTINE	Hercules			
AUSTRALIE	Southern Cross	Sydney utilliares		
KENYA		Bob Harries		
PAKISTAN		Merin Ltd		
INDE	Auto Space industrie Agro - Aids IERT Allahabad			
NOUVELLE ZELANDE PHILIPPINES	Ernest Hays Reymill	Voltas		
USA	Aermoter Dempsters Heiler - Aller			

Index des fabricants par pays



## BIBLIOGRAPHIE

### ÉNERGIES DE POMPAGE

I.T.Dello/GRET - **Les énergies de pompage** - Ministère de la Coopération, Paris 1985 - 270 p.

Fraenkel Peter - **Waterpumpingdences : a handbook for users and choosers** - ITDG/FAO ed I.T.Publications - London 1986 - 173 p.

I.R.C. - **Renewable Energy Sources for Rural water supply** - IRC (International Reference Centre for Community Water Supply and Sanitation), Pays Bas , 1986.

CFCE - **Le marché mondial des énergies renouvelables** - CFCE, Paris, 1984, 3 volumes.

### ÉNERGIE ÉOLIENNE

CWD - **Introduction to wind energy (basics and adranced)**.  
E.M.Lysen - CWD Amersfoort, Pays Bas, 1983, 2e édition, 310 p.

Le Gourières Desiré - **Energie éolienne : théorie, conception et calcul pratique des installations** - Eyrolles, Paris, 1980, 267 p.

Cunty Guy - **Eoliennes et aérogénérateurs - guide de l'énergie éolienne** - Edisud , 2e édition, 1982, 138 p + annexes.

Hirshberg Gary - **Waterpumping windmills book** - Brik House Publishing Co Inc, Andover, USA, 1982, 143 p.

Park Jack - **The wind Power Book** - Cheschire Books, Palo Alto, USA, 1981, 253 p.

Systemes solaires - n°spécial Energie Eolienne - février-mars 1986, Paris.

Fraenkel P, Kenna J, Lancashire S - **Windpumping handbook** - I.T.Publications, Londres, 1987, GRET fiches "Eoliennes" Paris.

## USAGES SPÉCIFIQUES

CWD - **Aspects of irrigation with windmills** - A.V.Vilsteren - CWD, Amersfoort, Pays Bas, 1981, 100 p.

CWD - **Cost of windmill irrigation** - Amersfoort, Pays Bas, 1985, 12 p.

CEMAGREF - **Utilisation d'éoliennes pour l'assainissement des Marais de l'Ouest** - In BTI n 396, Ministère de l'Agriculture, Paris, 1985, p 33-40.

## RÉALISATIONS DANS LES PAYS EN DÉVELOPPEMENT

VITA - **Wind Energy Activités in Africa** - VITA, USA, 1988, 56 p.

Peter Fraenkel - **Polomo windmills: Omoriver (Ethiopie)** - I.T.Publications, Londres, 1975.

CWD - **Windmills in the lift : the results of a CWD project (Sri Lanka)** - Amersfoort, NL, 1984 12 p.

MartinGreely - **Rural Energy Technology Assessment : a Sri Lanka case study** - Institute of Development Studies, Univ of Sussex, Brighton, Royaume Uni, 1986, 26 p.

CWD - **Sudan windenergy project bilatéral project between the Sudan and the Netherlands. (phase 1 : 1985 - 1986)** - Amersfoort, NL, 1987, 68 p + annexes.

Institut Burkinabé de l'Energie - **Evaluation et analyse des systèmes éoliens en Haute Volta** - BP 7047, Ouagadougou, 1983, 8 p.

Vita News - Utilisation de l'énergie éolienne pour l'exhaure de l'eau : bilan d'exploitation des éoliennes de la région de GAO (Mali) - Publications du CIEH, Ouagadougou, 1981, 39 p.

## REVUES

La revue éolienne - CRDP, 92 rue d'Antrain, BP 158, 35003 RENNES Cedex

Lettre d'information sur les petites ressources énergétiques - Via Panama 12, 00198 Rome, Italie.

Reric News - Po Box 2754, Bangkok 10501, Thaïlande.

Systèmes solaires - 8 rue de Richelieu, 75001 Paris, FRANCE.

## DIVERS

GATE - Sondernenergie program - windenergie - Gate, 1980, 40 p + fiches signalétiques sur fabricants.

J.P. Freteaud - Etude du régime des vents au Sénégal - IRAT, Paris, 1984, 37 p.

CWD - Catalogue of windmachines - Amersfoort, NL, 1984.

GTE - Etude du site destinée à l'exploitation de l'énergie éolienne - Questembert, 1986, 15 p + annexes.

CWD - Rotor design for horizontal axes windmills - CWD 77-1, Amersfoort, NL, 1986 (2e ed), 52 p. disponible en anglais, français, portugais, espagnol.

Wind Energy Conversion - Proceeding of the BWEA Wind Energy Conférence - P.J. Rusgrowe, Univ. of Reading, UR.

Proceeding of European wind Energy Conference and Exhibition - H.S Stephens and associates, London, UK, 1984 (p 934-940 : windpower for pumping water in China) ed 1924.



**Proceedings of the AWEA Conference - AWEA, USA.**

**Proceedings of the international symposium workshop on renewable energy - Sources. (Pakistan, 1983) - Ed TN.Veziroglu, Elsevier Science Publishers, Amsterdam, 1983.**

## COLLECTION DU MINISTERE DE LA COOPERATION ET DU DEVELOPPEMENT

*Le ministère chargé de la Coopération assure, depuis 1964 la publication d'ouvrages de synthèse permettant aux agents de développement locaux ou expatriés de les exploiter professionnellement ou de les utiliser à des fins pédagogiques.*

*Ouvrant au développement de la francophonie, ces ouvrages commandés par nos services techniques et élaborés par des experts des sociétés d'intervention ou instituts spécialisés sont à considérer comme autant d'actions de développement et de vecteurs de transferts de technologie.*

**120 ouvrages sont disponibles dans les Collections suivantes :**

### **NOUVELLES COLLECTIONS**

- . Collection ANALYSES
  - . Série ANALYSES DES SOURCES D'INFORMATION
  - . Série ANALYSES BIBLIOGRAPHIQUES
  - . Série ANALYSES ET DOCUMENTS
- . Collection ETUDES DE DOCUMENTS
- . Collection FOCAL COOP

### **THEME DE L'ECONOMIE DU DEVELOPPEMENT :**

- . Collection METHODOLOGIE
- . Collection DOCUMENTS PEDAGOGIQUES
- . Ouvrages d'INITIATION ECONOMIQUE

### **THEME DU DEVELOPPEMENT RURAL :**

- . Collection TECHNIQUES RURALES
- . Collection MANUELS ET PRECIS D'ELEVAGE
- . Ouvrages sur les PECHEs TROPICALES
- . Ouvrages divers

### **THEME DES TECHNOLOGIES DU DEVELOPPEMENT :**

- . Collection TECHNOLOGIES ET DEVELOPPEMENT
- . Collection LE POINT SUR LES TECHNOLOGIES

### **THEMES DES ROUTES ET VILLES**

- . ouvrages sur les TRAVAUX PUBLICS et les INFRASTRUCTURES
- . Ouvrages sur l'URBANISME EN MILIEU TROPICAL

### **THEMES DE LA LUTTE ANTIACRIDIEENNE**

- . Ouvrages publiés avec le CIRAD-PRIFAS

Catalogue complet sur demande à :  
La Documentation Française  
29-31, quai Voltaire  
PARIS 7° Tel. : 40.15.70.00.

**LES EOLIENNES DE POMPAGE** — Utiliser l'énergie gratuite et renouvelable du vent pour élever l'eau constitue aujourd'hui une alternative intéressante aux systèmes d'exhaure motorisés. D'un fonctionnement simple et peu coûteux, les éoliennes de pompage facilitent l'équipement des points d'eau dans les régions rurales isolées. Ce dossier aidera les techniciens à réaliser l'installation qui correspond le mieux au site choisi et aux besoins des villageois. Ils y trouveront expliquées les mesures indispensables à effectuer et les performances des principaux matériels disponibles. L'étude des réalisations passées et en cours leur permettra, en outre, de choisir une éolienne de pompage bien adaptée aux contraintes socio-économiques des populations. L'eau si nécessaire à leur développement pourra ainsi leur être apportée durablement.

**THE WIND PUMPS** — Because wind energy is renewable and involves no fuel costs, it is an attractive alternative to motorized systems for pumping water. Wind pumps are also particularly appropriate for isolated rural areas given their use of simple and inexpensive technologies. This publication will help technicians design and install wind pump systems that best correspond to specific sites and local needs. It includes explanations of the steps required, performance characteristics of the main equipment available, and an analysis of past experiences and current projects designed to enable the choice of the system best adapted to the socio-economic conditions of the people involved. In this way, the water so important for their development can be provided in a more reliable way.

**LAS EOLIANAS DE POMPEO** — La utilización de la energía gratuita y renovable del viento para pompear el agua constituye hoy por hoy una alternativa interesante a los sistemas de extracción con bombas. Las eolianas de pompage facilitan el equipamiento de sistemas de pompage en regiones rurales aisladas. Este documento ayudará a los técnicos a efectuar la instalación que corresponda mejor al sitio escogido y a las necesidades de los habitantes rurales. Encontrarán explicaciones a las medidas indispensables a efectuar, así como los resultados que pueden esperar de los principales materiales disponibles. El estudio de los sistemas terminados y en curso les permitirá, entre otros, escoger una eoliana de pompage bien adaptada a las condiciones socio-económicas de las poblaciones. El agua, tan necesaria para su desarrollo podrá serles aportada de manera duradera.

**CATA-VENTO** — Utilizar a energia gratuita e renovável do vento para remontar a água, constitui atualmente uma alternativa interessante ao sistema (de tirar a água com bomba) motorizado. De um funcionamento simples e barato, as « eoliennes » de tirar a água facilitam o equipamento dos pontos de água nas regiões rurais isoladas. Esse « dossier » ajudará os técnicos a elaborar a instalação que melhor corresponde, seja ao local escolhido, seja às necessidades dos aldeões. Nele, eles encontrarão explicadas as medidas indispensáveis a realização dos desempenhos relativos aos principais materiais disponíveis. Por outro lado, o estudo de realizações já passadas e atuais lhes permitirá escolher uma « eolienne » de tirar a água bem adaptada aos problemas socio-econômicos das populações. Desse modo, a água que é tão necessária ao desenvolvimento dessas populações, poderá ser conduzida de maneira mais durável.

*L'association Institut Technologique Dello et le G.R.E.T. ont constitué une équipe commune pour apporter des conseils techniques et proposer des formations sur l'approvisionnement et la gestion de l'eau, en particulier sur les petits systèmes de pompage. Pour les programmes touchant à l'énergie éolienne, cette équipe collabore avec d'autres groupes français (Espace éolien régional, Groupe de travail éolien, Agence française pour la maîtrise de l'énergie) et étrangers (I.T. Power).*

Edition actualisée du Le Point Sur Les Eoliennes de Pompage - 1984

Prix 100 F  
Imprimé en France  
ISBN : 2-86-844-030-4  
ISSN : 0763-7381

G.R.E.T.  
213, rue Lafayette - 75010 PARIS  
Tél. : (1) 40.35.13.14 - Télex : 212 890 F