

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses
<b>Herausgeber:</b>	Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen
<b>Band:</b>	75 (1984)
<b>Heft:</b>	5
<b>Artikel:</b>	L'énergie éolienne
<b>Autor:</b>	Jufer, M.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-904366">https://doi.org/10.5169/seals-904366</a>

### Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 17.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# L'énergie éolienne

M. Jufer

Dans la première partie de son article, l'auteur donne un aperçu des possibilités de l'énergie éolienne et des facteurs déterminants pour son exploitation. Il présente ensuite les types d'éoliennes les plus courantes et leurs caractéristiques principales et compare leurs performances dans un cas particulier à une éolienne développée à l'EPFL.

Im ersten Teil gibt der Autor eine Übersicht über die Möglichkeiten der Windenergie und über die wichtigsten Bestimmungsfaktoren der Windanlagen. Anschliessend beschreibt er die Windradtypen und ihre Eigenschaften und vergleicht ihre Leistung in einem bestimmten Anwendungsfall mit einer an der EPFL entwickelten Windanlage.

## 1. Nature et ressources

L'énergie éolienne résulte de la transformation d'une partie de l'effet thermique solaire en énergie cinétique de l'atmosphère. C'est la première forme d'énergie non animale exploitée par l'homme, en particulier pour la navigation. L'origine des premières installations éoliennes est incertaine, aussi bien en ce qui concerne le lieu que l'époque. Le moulin à vent a été utilisé en Perse au X<sup>e</sup> siècle et il apparaît en Europe au XII<sup>e</sup> siècle. C'est au XVI<sup>e</sup> siècle que le moulin hollandais prend sa forme bien connue et se répand largement. Il n'évolue pratiquement pas jusqu'au XX<sup>e</sup> siècle, où il bénéficie des progrès réalisés dans le domaine des matériaux. Après un développement constant jusqu'à la deuxième guerre mondiale, le moulin à vent (ou générateur éolien) ne subit plus d'évolution jusqu'à sa réactualisation au milieu des années 1970 à l'occasion de la «crise» énergétique.

L'inventaire de l'énergie récupérable à partir du vent est difficile à dresser. De fréquentes exagérations sont avancées à ce sujet. Pour aborder cet aspect, il est nécessaire de distinguer trois niveaux différents d'énergie:

- *L'énergie cinétique emmagasinée dans l'atmosphère*, résultant de l'effet thermique du soleil. La part de la puissance incidente du soleil ainsi convertie peut être estimée à 2%. La quantité totale d'énergie stockée est de l'ordre de  $7 \cdot 10^{20}$  J, soit cinq fois l'énergie totale consommée sur terre en une année. Le temps de renouvellement de cette énergie est de trois jours.

- *L'énergie cinétique théoriquement récupérable*, contenue entre des altitudes de 5 et de 100 m, dans les zones à la fois peu construites et accessibles. Hormis le littoral, la surface des mers est pratiquement exclue. Selon les hypothèses, cette énergie est comprise entre 3 et  $30 \cdot 10^{20}$  J/an, soit de 2 à 20 fois l'énergie mondiale actuellement consommée.

- *L'énergie cinétique pratiquement récupérable* qui n'est qu'une fraction de la précédente. La qualité des sites, l'aspect esthétique, l'emprise au sol, les difficultés de stockage et, de façon plus générale, l'aspect économique restreignent considérablement et de façon souvent subjective les possibilités d'utilisation de cette forme d'énergie. Cette quantité annuelle peut être évaluée de 3 à  $30 \cdot 10^{17}$  J, soit de 0,2 à 2% de la consommation mondiale actuelle.

Cette dernière quantité peut paraître très faible. Cependant, les qualités spécifiques de cette forme d'énergie rendent cet appoint potentiel important pour des régions à faible infrastructure énergétique.

L'énergie éolienne est caractérisée à la fois par son aspect diffus et son irrégularité. Si l'irrégularité est un inconvénient majeur, le caractère diffus est à la fois un défaut – par la difficulté de réaliser des centrales importantes – et un avantage. En effet, les besoins énergétiques de zones à très faible densité de population présentent également ce caractère diffus. C'est dans de tels cas que cette forme d'énergie offre des perspectives intéressantes.

Trois facteurs conditionnent le choix d'une installation éolienne: le site, l'utilisation de l'énergie et la solution technique.

## 2. Le site

Le site est le premier facteur déterminant pour l'emploi d'installations éoliennes. La puissance mécanique  $P_c$  traversant une section S sous forme cinétique vaut

$$P_c = \frac{1}{2} \rho v^3 S \quad (1)$$

$\rho$  étant la masse spécifique de l'air ( $\approx 1,2 \text{ kg/m}^3$ ) et  $v$  la vitesse du vent.

Il est possible de montrer qu'une partie seulement de cette énergie cinétique est convertible, l'air devant

### Adresse de l'auteur

Prof. Marcel Jufer, EPF-Lausanne, Laboratoire d'électromécanique et de machines électriques (LEME), 16, chemin de Bellerive, 1007 Lausanne.

conserver une vitesse permettant son évacuation derrière l'hélice. L'optimum est obtenu pour une vitesse résiduelle égale à  $\frac{1}{3}$  de la vitesse incidente. On obtient ainsi la puissance mécanique théoriquement récupérable par une installation éolienne - ou limite de *Betz* -, donnée par la relation

$$P_{th} = \frac{16}{27} (\frac{1}{2} \rho v^3 S) \quad (2)$$

La puissance mécanique maximale réellement récupérable est liée au rendement de l'hélice (coefficients  $\eta$ ):

$$P_{max} = \frac{16}{27} (\frac{1}{2} \rho v^3 S) \eta = \frac{8}{27} \rho v^3 S \eta \quad (3)$$

L'énergie récupérable en un site donné est donc proportionnelle à la valeur moyenne du cube de la vitesse du vent. Si l'on admet un rendement de 70%, valeur relativement élevée, on obtient pour une surface de  $1 \text{ m}^2$  de l'hélice:

$$P' = 0,25 \cdot \bar{v}^3 \quad (4)$$

avec  $P'$  = puissance récupérable par unité de surface de l'hélice

$$\bar{v} = \frac{\text{vitesse moyenne}}{\text{cubique}} = \left( \frac{1}{T} \int_0^T v^3 dt \right)^{1/3}$$

A titre d'exemple, pour une hélice de 5 m de diamètre et une vitesse moyenne du vent de 5 m/s, la puissance moyenne par unité de surface serait de  $31,25 \text{ W/m}^2$ , la puissance moyenne de 614 W et l'énergie récupérable annuellement vaudrait 5385 kWh. Pour un vent moyen de 8 m/s, on aurait respectivement  $128 \text{ W/m}^2$ , une puissance de 2515 W et une énergie de 22 000 kWh/an. Le site revêt donc une très grande importance par l'influence de la vitesse du vent au cube.

Les courbes de la figure 1 présentent la puissance spécifique et l'énergie an-

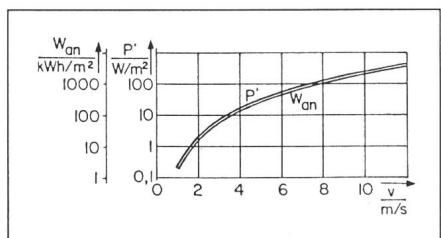


Fig. 1 Puissance spécifique  $P'$  et énergie annuellement récupérable  $W_{an}$  en fonction de la vitesse du vent  $v$  pour une surface de  $1 \text{ m}^2$

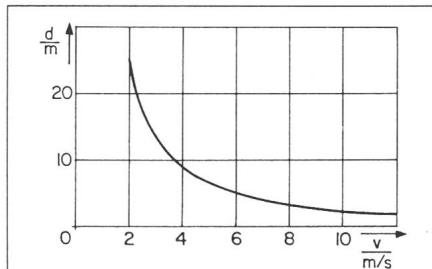


Fig. 2 Diamètre de l'hélice  $d$  nécessaire pour une puissance de 1 kW en fonction de la vitesse du vent  $v$

nuellement récupérable en fonction de la vitesse du vent pour une surface de  $1 \text{ m}^2$ . La figure 2 donne le diamètre de l'hélice nécessaire pour obtenir une puissance de 1 kW en fonction de la vitesse du vent également.

Une étude anémométrique locale est un préalable indispensable au choix de l'implantation d'une éolienne. Les renseignements ainsi fournis permettent de déterminer les dimensions et les caractéristiques de l'installation la mieux adaptée aux exigences de l'utilisation.

Par ailleurs, la vitesse du vent augmentant avec l'altitude, il est intéressant de placer l'hélice de l'appareil le plus haut possible. Il faut également éviter l'effet des tourbillons provoqués par les obstacles tels qu'arbres ou habitations. Les emplacements les plus favorables sont les buttes ou collines dominant un terrain dégagé.

### 3. Utilisation de l'énergie

Le choix d'une solution technique pour une installation éolienne dépend en grande partie de l'utilisation prévue de l'énergie. On peut distinguer trois emplois principaux:

- l'utilisation directe de l'énergie mécanique (pompage, mouture, etc.);
- la conversion mécanique-électrique en vue d'une consommation directe (chauffage par résistance, pompage par moteur électrique, éclairage, etc.);
- la conversion mécanique-électrique en vue d'un stockage (batteries d'accumulation, réseau électrique, fabrication d'hydrogène, etc.).

Quelle que soit l'utilisation, le recours à une forme intermédiaire électrique est envisageable. La dissociation de l'éolienne et de l'organe entraîné peut permettre une souplesse plus grande dans le choix optimum du site.

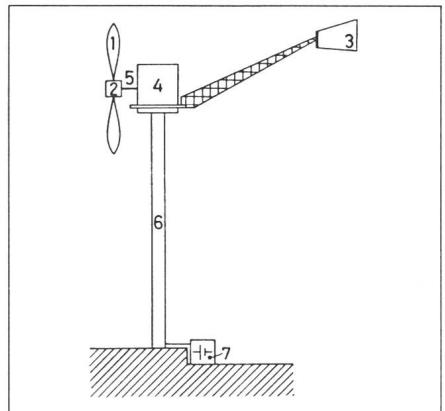


Fig. 3 Composition d'une installation éolienne

- 1 hélice
- 2 dispositif de réglage mécanique ou électrique
- 3 dispositif d'orientation dans le vent
- 4 générateur électrique ou transmission mécanique
- 5 dispositif de sécurité en cas de tempête
- 6 mât
- 7 dispositif éventuel de stockage de l'énergie

### 4. Solutions techniques

Les principaux éléments dont se compose une installation éolienne sont montrés à la figure 3.

Il est à remarquer que les aéro-générateurs et leurs périphériques ont été régulièrement développés et utilisés jusqu'à la fin de la Seconde Guerre mondiale. A quelques exceptions près, cette technique a été mise en veilleuse depuis lors. La revalorisation des énergies douces a donc relancé récemment le développement de systèmes propres à la conversion de l'énergie éolienne. C'est un cas assez exceptionnel d'une technique très ancienne qui bénéficie, après une période d'oubli, de technologies nouvelles. Parmi les progrès principaux, il y a

- les pales de l'hélice qui font appel aux techniques récentes de l'aviation, aux fibres de verre ou de carbone et aux résines artificielles;
- les générateurs électriques à aimants permanents qui permettent de récupérer une énergie accrue pour de faibles vitesses de vent;
- les composants électroniques qui assurent un réglage plus souple;
- les mâts en béton, en plastique ou en aluminium qui permettent une construction plus légère, donc plus esthétique.

Selon la puissance, l'utilisation de l'énergie et le site, plusieurs solutions sont envisageables pour l'aéro-générateur. On peut citer principalement:

- l'hélice à axe horizontal, à faible nombre de pales (de 1 à 3), rapide, gé-

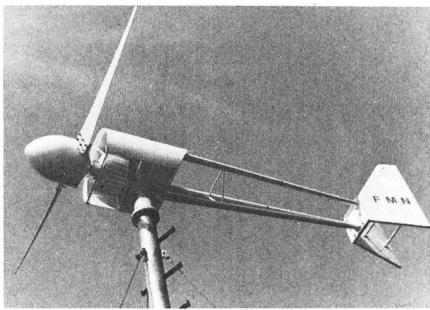


Fig. 4 Installation éolienne bipale 5 kW à 10 m/s

Diamètre de l'hélice 5 m. Générateur selon figure 7. Développement Force Motrices Neuchâteloises et EPF-Lausanne.

néralement à pas variable (fig. 4). Elle est caractérisée par un bon rendement. Celui-ci est donné à la figure 5, courbe 1, en fonction du chiffre de vitesse  $\lambda$ . Cette solution nécessite un dispositif d'orientation dans le vent (girovette). Elle convient pour la production d'énergie électrique et pour des puissances moyennes ou élevées;

- l'hélice à axe horizontal, à grand nombre de pales et chiffre de vitesse relativement faible (fig. 5, courbe 2). Le rendement est moyen. Cette solution convient pour une utilisation mécanique directe telle que le pompage;

- l'hélice de type Savonius, à axe vertical, très simple car ne nécessitant pas de système d'orientation dans le vent. En revanche, elle présente un chiffre de vitesse et un rendement très faibles (fig. 5, courbe 3). Cette solution convient pour de faibles puissances ou des mesures;

- l'hélice de type Darrieus, de développement récent. Elle présente également un axe vertical et ne nécessite pas de système d'orientation. Elle est caractérisée par un bon rendement et un chiffre de vitesse relativement élevé (fig. 5, courbe 4). Son principal inconvénient réside dans l'impossibilité de

démarrer sans un dispositif d'appoint, tel qu'une éolienne de type Savonius. D'autre part, la construction des pales est délicate. Cette solution convient pour la production d'énergie électrique.

A titre de comparaison, la figure 5, courbe 5, présente également les caractéristiques de rendement d'un moulin à vent de type hollandais. D'autres solutions sont également envisagées actuellement, mais peuvent se rattacher principalement à l'un ou l'autre des types cités.

Une installation éolienne est souvent exposée à des conditions climatiques et mécaniques très dures. Elle doit être à même de supporter des tempêtes exceptionnelles très violentes. Par ailleurs, l'entretien doit être limité au minimum. Ces diverses caractéristiques ne peuvent être obtenues que par des produits utilisant des technologies éprouvées soumises à des tests répétés. La fiabilité et la simplicité doivent primer la sophistication et les performances limites.

La combinaison d'un générateur synchrone de 5 kW à aimants permanents, autoadapté, et d'une hélice bipale en fibres de verre et de carbone, d'un diamètre de 5 m, permet de donner un exemple d'une technologie répondant à ces conditions.

Traditionnellement, un générateur à aimants permanents nécessite une adaptation de la charge en fonction de la vitesse de l'hélice, donc de la vitesse du vent, si l'on veut récupérer un maximum d'énergie. Ceci implique un convertisseur de tension ou de fréquence et un régulateur. Cependant, en itérant sur les caractéristiques de l'hélice et du générateur, et plus particulièrement sur les inductances synchrones et de fuite de ce dernier, il est possible d'obtenir des caractéristiques auto-adaptées permettant de se passer

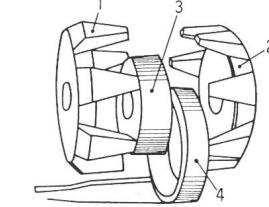


Fig. 6 Exemple d'un rotor de générateur adapté spécialement aux conditions requises pour entraînement par énergie éolienne

- 1,2 pièces polaires
- 3 aimant permanent
- 4 bobinage amortisseur

de tout élément régulateur, donc d'accroître la fiabilité de l'ensemble.

Le générateur choisi, caractérisé par une vitesse de 375 tr/min pour un vent de 10 m/s et une fréquence de 50 Hz, comprend un rotor à griffes à aimant permanent (fig. 6). Il présente deux structures magnétiques supportant les pièces polaires (1 et 2) un aimant permanent (3), un bobinage amortisseur et magnétisant (4) et un arbre. La figure 7 montre une photographie d'un tel rotor.

La figure 8 présente les caractéristiques tension-courant de l'installation

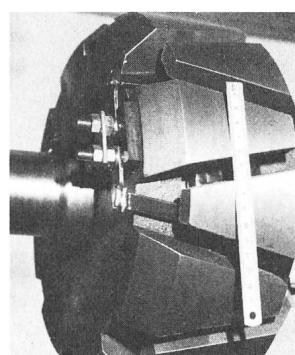


Fig. 7 Rotor d'un générateur à griffes à aimant permanent de 5 kW, 375 t/min

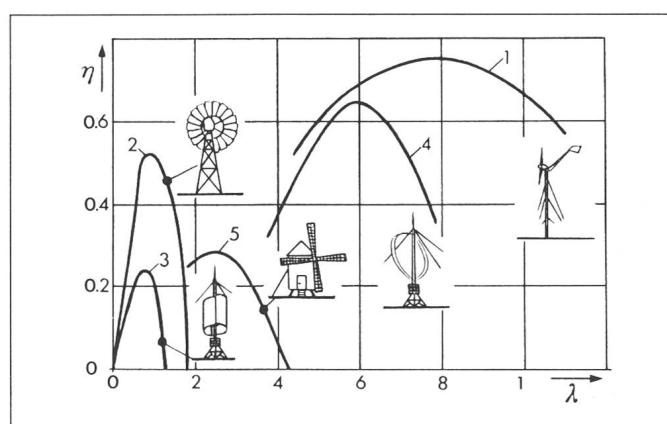


Fig. 5 Rendement de différents types d'hélice en fonction du chiffre de vitesse  $\lambda$

$\lambda$  est le quotient de la vitesse périphérique de l'éolienne et de la vitesse du vent.

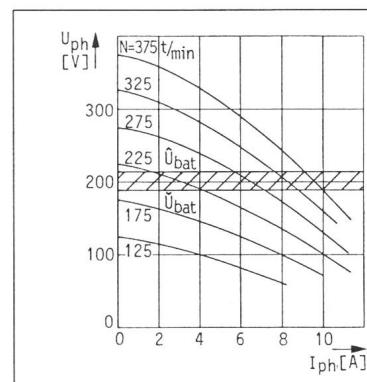


Fig. 8 Caractéristiques tension-courant du générateur de la figure 7, avec la vitesse de rotation comme paramètre

Tableau I

	$v_f$ m/s	$v_N$ m/s	$v_I$ m/s	$\lambda_0$	$\eta_0$	$W_{an}$ kWh/m <sup>2</sup>
Hélice						
Limite de Betz	0	$\infty$	$\infty$		1	428
Bipale	4	11	20	8	0,70	262
Multipales	2,5	9	12	1	0,50	150
Savonius	2	9	15	1	0,25	80
Darrieus	5	11	20	6	0,63	228
Moulin hollandais	3	10	12	2,5	0,30	97

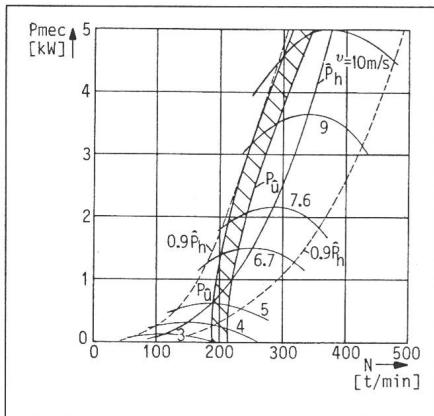


Fig. 9 Puissance mécanique à l'arbre en fonction de la vitesse de rotation

Paramètre: vitesse du vent  
Installation de la figure 4

avec la vitesse de rotation comme paramètre. Ces courbes correspondent à un facteur de puissance inductif de 0,96 associé à un redresseur alimentant une batterie d'accumulateur. Il est ainsi possible de travailler avec une tension de charge constante et une vitesse variable, par suite d'une tension interne au générateur augmentant avec la fréquence et le courant. Le générateur doit être surdimensionné d'environ 15% par rapport à une variante «classique», non auto-adaptée. La figure 9 présente l'évolution de la puissance mécanique à l'arbre avec la vitesse de rotation, la vitesse du vent intervenant comme paramètre. L'objectif est d'approcher le plus possible la puissance maximale récupérable par l'hélice  $P_h$ . Il est cependant admis de s'écartier de ce maximum d'une quantité acceptable, en l'occurrence 10%. Pour une vitesse du vent faible, l'hélice tourne à une vitesse supérieure à l'optimum; pour une vitesse du vent élevée, c'est l'inverse qui se produit.

Le même ensemble hélice-générateur peut également alimenter sans régulateur des pompes électriques.

La prise en considération simultanée d'un site et des caractéristiques d'un type d'éolienne permet un bilan énergétique spécifique. A titre d'exemple, la figure 10 présente un relevé des vents classés effectué pour la région de Châteauneuf (VS). La vitesse moyenne du vent, définie par rapport à la puissance (cube de la vitesse) est de 5,18 m/s. Cinq éoliennes différentes ont été simulées sur ce site de façon à définir l'énergie annuelle récupérable par unité de surface. Chaque éolienne est caractérisée par

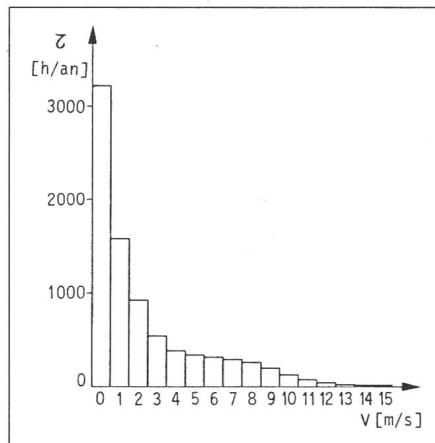


Fig. 10 Répartition des vitesses du vent durant l'année

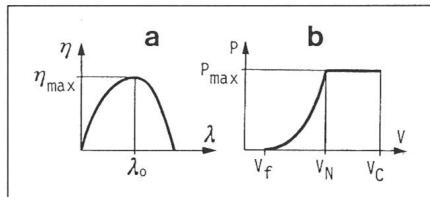


Fig. 11 Caractéristiques de définition des différentes éoliennes

les paramètres définis à la figure 11. Les cas étudiés sont ceux définis à la figure 5. Les résultats sont résumés dans le tableau I. On y trouve en particulier l'énergie annuelle récupérable par unité de surface. La figure 12 donne les énergies classées (en fonction de la vitesse du vent) pour ces diverses éoliennes associées à ce site, ainsi que pour une hélice fictive correspondant à la limite de Betz. Un choix nuancé peut ainsi être effectué.

## 5. Perspectives

Par son caractère même, l'énergie éolienne ne peut jouer qu'un rôle mar-

ginal dans le domaine énergétique. Une production de masse n'a de sens que dans des régions côtières isolées. Certains projets de grands aérogénérateurs, s'ils sont réalisables, n'ont pas une fiabilité suffisante, ni une raison d'être économique. Parmi les plus grandes réalisations, on peut citer:

- MOD 2, par la NASA aux USA avec 90 m de diamètre, 2 pales et une puissance de 2,5 MW à 11,6 m/s.
- Growian en RFA avec 145 m de diamètre, 1 pale et une puissance de 5 MW à 10,7 m/s.

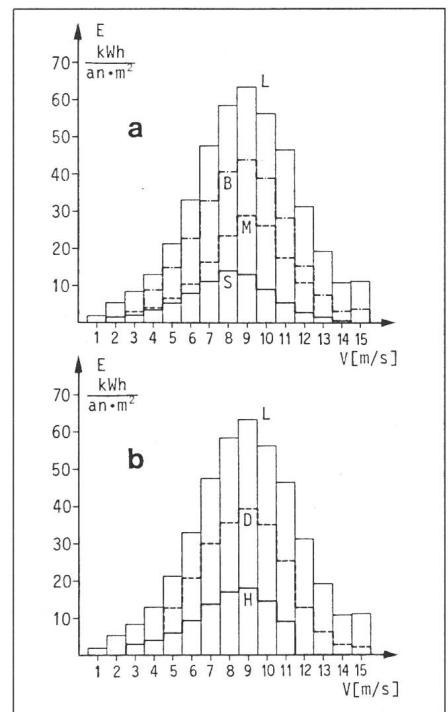


Fig. 12 Energies annuelles classées pour les différents types d'éoliennes étudiées

- B hélice bipale  
D hélice Darrieus  
H moulin hollandais  
L limite théorique de Betz  
M hélice multiple  
S hélice Savonins

En revanche, des aéro-générateurs plus petits, adaptés à une utilisation locale telle que pompage, irrigation, mouture ou stockage électrique pour des alimentations stabilisées de tension représentent une solution beaucoup plus intéressante pour des régions à faible infrastructure énergétique. Ces dernières ont beaucoup à attendre d'un apport complémentaire des énergies solaire et éolienne. Depuis

des siècles, la partie fertile de la Crête est irriguée par le biais de petites éoliennes de construction traditionnelle, à pales en toile.

Les qualités principales de l'énergie éolienne que sont l'indépendance de la source d'énergie, la large diffusion de celle-ci et la possibilité de conversion directe en toute autre forme d'énergie rendent cette solution digne d'intérêt pour toute utilisation isolée.

#### Bibliographie

- [1] *M. Jufer*: Energie éolienne. Perspectives et réalités. SSES-Symposium: Génération de puissance avec l'énergie solaire et stockage à long terme. Zurich, Société Suisse pour l'Energie Solaire, 1975. 3(1975), p. 37...42.
- [2] *S. Mattiaia*: L'énergie éolienne. Helios-Energies Nouvelles -(1982)2, p. 7...16, -(1983)1, p. 16...30 + -(1983)2, p. 10...13.
- [3] *A. Kartalovski*: Eolienne 5 kW. Alimentation de la batterie et réglage par un transformateur. Rapport EPFL. Lausanne, Ecole Polytechnique Fédérale, 1978.