

# L'exploitation de l'énergie éolienne

Autor(en): **Silva, Fernando da / Pascual, Ricardo**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **110 (1984)**

Heft 24

PDF erstellt am: **25.09.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-75363>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# L'exploitation de l'énergie éolienne

par Fernando da Silva et Ricardo Pascual, Lausanne

## 1. Introduction

L'importance des besoins énergétiques actuels, leur accroissement vraisemblable dans les années à venir, l'augmentation du coût des combustibles fossiles et d'éventuelles difficultés d'approvisionnement en situation de crise internationale, ont provoqué un regain d'intérêt pour les énergies renouvelables dont fait partie l'énergie éolienne. Celle-ci présente des avantages certains: non polluante, elle contribue à l'indépendance énergétique du pays producteur et est accessible à un grand nombre d'utilisateurs sous forme de travail mécanique ou d'électricité.

De ce fait, une analyse approfondie des ressources éoliennes disponibles paraît indispensable, d'autant plus que l'évolution technologique actuelle permet d'envisager leur exploitation à grande échelle. A ce titre, cet article présente deux études concrètes pour une éventuelle transformation d'énergie éolienne en électricité sur le Plateau suisse et le littoral sud-portugais.

Après une description des caractéristiques techniques de l'énergie éolienne,

l'article établit une comparaison entre les deux régions étudiées et en dégage un certain nombre d'enseignements concernant l'utilisation future de cette forme d'énergie.

## 2. Exploitation de l'énergie éolienne

a) *Fonctionnement d'une éolienne* (fig. 1). Les éoliennes permettent de capter une partie de l'énergie cinétique du vent. Elles comportent en général les éléments suivants:

- *le capteur d'énergie*: hélice à une ou plusieurs pales;
- *la transmission mécanique*: axes de l'éolienne et de l'alternateur reliés par une boîte à vitesses dont le rapport de transmission accorde la vitesse de rotation de l'hélice à celle de l'alternateur;
- *l'alternateur*: il s'agit dans la plupart des cas d'une unité classique;
- *le système de régulation*: la plupart des éoliennes modernes peuvent régler leur vitesse de rotation par un système d'orientation des pales par rapport au vent; une variation de l'angle d'attaque de la pale modifie les forces

aérodynamiques de portance et de traînée qui détermineront la vitesse de l'hélice;

- *la tour de support*: elle peut être construite en béton ou en métal (structure tubulaire ou en treillis).

L'axe des éoliennes est soit vertical soit horizontal. D'autre part, la gamme des puissances nominales des éoliennes actuelles permet de distinguer:

- *les faibles puissances*:  
 $P_{nom} < 10 \text{ kW}$ ;
- *les moyennes puissances*:  
 $10 \text{ kW} < P_{nom} < 200 \text{ kW}$ ;
- *les grandes puissances*:  
 $P_{nom} > 200 \text{ kW}$ ;

Ainsi, une classification générale des types d'éoliennes peut être établie en fonction de la position de l'axe et de la puissance nominale (fig. 2).

Axe	Vertical	Horizontal
Faible	Savonnius	Multipales commerciales
Moyenne	Darrieux	Multipales Bipales (Mod-0)
Grande	—	Bipales (Mod-1-2) Monopales Tripales (Nibe)

Fig. 2. — Classification générale des types d'éoliennes.

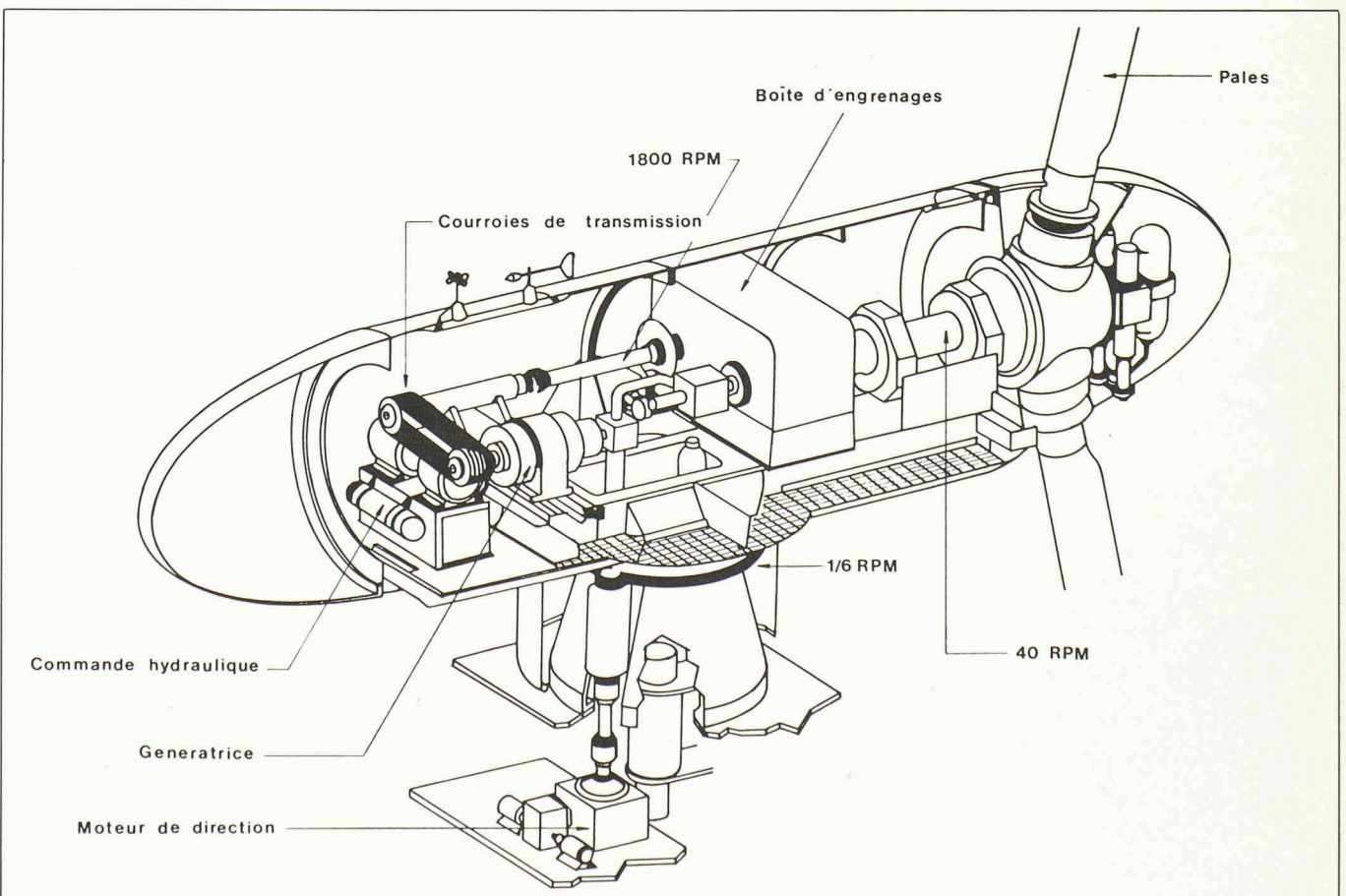


Fig. 1. — Eléments d'une éolienne.



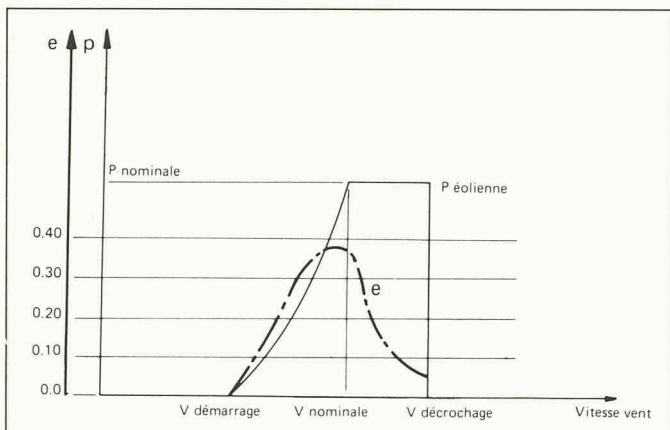


Fig. 3. — Courbe de puissance et du coefficient d'efficacité d'une Mod-2 Nasa.

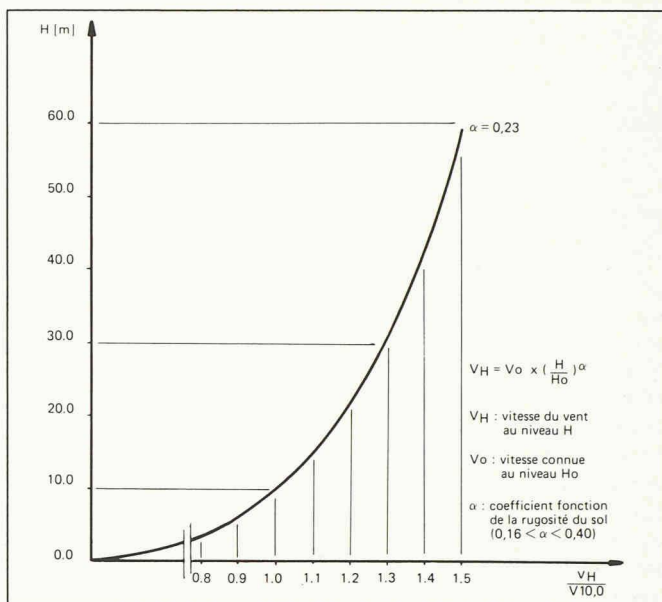


Fig. 5. — Variation de la vitesse du vent au-dessus du sol.

L'énergie cinétique du vent est définie par l'expression :

$$E [J] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \cdot \Delta t$$

où

- $\rho$  = masse spécifique de l'air [kg/m<sup>3</sup>]
- $V$  = vitesse du vent [m/s]
- $A$  = aire perpendiculaire à la direction du vent [m<sup>2</sup>]
- $\Delta t$  = temps [s].

La puissance mécanique développée par une éolienne s'écrit :

$$P [w] = \frac{1}{2} \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

où

- $C_p$  = coefficient de conversion
- $A$  = aire balayée par les pales de l'éolienne [m<sup>2</sup>].

Le coefficient de conversion  $C_p$  est le rapport entre la puissance mécanique de l'éolienne et la puissance du vent. Il dépend de la vitesse du vent et sa valeur maximale idéale est de 0,593.

La puissance électrique fournie par l'éolienne est alors :

$$Pe [w] = \frac{1}{2} e \cdot \rho \cdot A \cdot V^3$$

où

$e$  = coefficient d'efficacité.

La valeur de  $e$  est d'environ 15% inférieure à celle de  $C_p$  en raison des pertes dans les transmissions et l'alternateur.

Le fonctionnement d'une éolienne est défini par sa courbe de puissance qui décrit l'évolution de la puissance électrique en fonction de la vitesse du vent (fig. 3). Lorsque la vitesse du vent est trop faible, l'énergie recueillie est insuffisante pour faire tourner les pales économiquement. Au fur et à mesure que la vitesse du vent augmente, les pales tournent plus vite et sont soumises à des contraintes élevées dues à la force centrifuge.

Pour empêcher l'emballement de l'hélice, la vitesse de rotation est maintenue constante par une variation de l'angle d'attaque des pales ce qui entraîne d'autres types d'efforts. A partir d'une certaine vitesse de vent, il est nécessaire d'arrêter la machine.

Ainsi, il convient de distinguer :

- la vitesse de démarrage: vitesse à laquelle l'éolienne commence à produire de l'énergie ;

- la vitesse nominale: vitesse à partir de laquelle la puissance nominale est atteinte ;

- la vitesse de décrochage: vitesse correspondant à l'arrêt des machines.

b) Ressources éoliennes

Les ressources éoliennes sont en général mesurées en termes d'énergie cinétique du vent par unité de surface perpendiculaire à l'écoulement pour une période donnée.

Le vent est un phénomène naturel qui varie dans l'espace. A l'échelle mondiale (fig. 4), certaines régions possèdent des ressources éoliennes considérables alors que d'autres en sont très démunies. De même, à l'intérieur d'une zone favorable, des différences très nettes peuvent apparaître selon l'exposition des sites aux vents dominants (vallée, massif montagneux, zone côtière).

D'autre part, la vitesse du vent croît avec la hauteur au-dessus du sol. Le profil des vitesses est assez bien reconstitué par la formule de Golding :

$$V(h) : V_0 \cdot \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha$$

$V(h)$  = vitesse du vent au niveau  $h$ .

$V_0$ : vitesse connue au niveau  $h_0$ .

$\alpha$ : coefficient, fonction de la rugosité du sol. (0,16 <  $\alpha$  < 0,40).

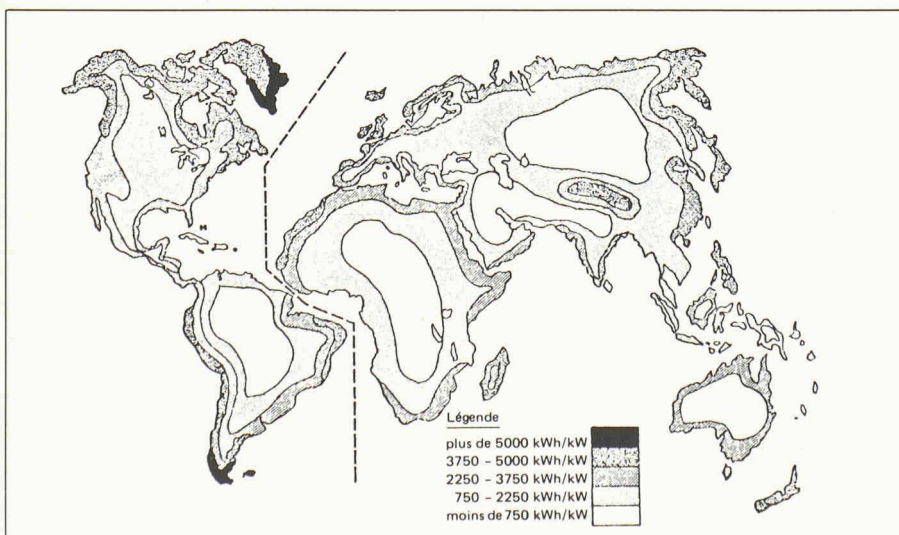


Fig. 4. — Ressources éoliennes mondiales (tiré de Wind Power).

Enfin, il est indispensable d'étudier les variations temporelles du vent. La connaissance de la vitesse moyenne n'est pas en soi suffisante pour déterminer les ressources disponibles. En effet, celles-ci se calculent au moyen de la formule suivante :

$$\frac{E}{A} \left[ \frac{J}{m^2} \right] = \frac{1}{2} \rho \cdot \int V_i^3 \cdot dt_i$$

où  $V_i$ : vitesse du vent pendant l'intervalle de temps  $dt_i$ .



Il est donc impératif de connaître la distribution des vitesses du vent dans le temps. Assez souvent, cette distribution est mal connue; il est alors intéressant d'estimer l'énergie éolienne disponible d'après la vitesse moyenne. Les études réalisées montrent qu'il existe une relation inverse entre la vitesse moyenne et un coefficient d'irrégularité qui caractérise les variations temporelles du vent. L'expression de ce coefficient est la suivante:

$$\frac{\int V_i^3 dt_i}{(\int V_i dt_i)^3} = \frac{\langle V^3 \rangle}{(\langle V \rangle)^3} = Ci$$

Cette relation, une fois établie pour l'ensemble d'une région, permet d'estimer les ressources éoliennes des sites dont seule la vitesse moyenne du vent est connue (fig. 6).

Les vitesses du vent ont une loi de distribution statistique qui s'apparente à celle de Weibull. La confrontation de cette loi de distribution avec la courbe de puissance de l'éolienne permet de calculer l'énergie utile produite ainsi que le temps de fonctionnement de l'éolienne.

### 3. Etude comparative : Plateau suisse et littoral sud-portugais

Ce paragraphe présente la comparaison des principaux résultats de deux études éoliennes concrètes: le Plateau suisse et le littoral sud-portugais.

#### a) Ressources éoliennes

L'analyse du vent effectuée permet d'estimer les ressources éoliennes des deux régions étudiées. Les résultats obtenus sont représentés sur les cartes des fig. 7 et 8.

#### b) Implantation de centrales éoliennes

Chaque étude propose dix sites favorables à l'implantation de centrales éoliennes choisis selon les critères suivants:

- les ressources éoliennes disponibles;
- la régularité des vents;
- l'exposition aux vents dominants;
- la surface de site utilisable;
- la densité de population.

Une analyse plus détaillée des caractéristiques de ces sites conduit à la sélection de l'emplacement d'une centrale éolienne par région d'étude. La centrale portugaise comporte 33 éoliennes Mod-2 Nasa alors que la centrale suisse est dotée de 20 unités du même type. Le choix de l'aérogénérateur s'est effectué parmi l'ensemble des machines à grande puissance. Il se justifie par des critères de maximisation de l'énergie produite et par le fait qu'un certain nombre d'éoliennes Mod-2 sont actuellement opérationnelles aux Etats-Unis.

Un autre aspect à considérer est celui de la densité des éoliennes à l'intérieur du site. Le rendement d'une éolienne située dans le sillage d'autres unités dépend du rapport entre leur écartement et le dia-

TABLEAU I: Implantation d'éolienne en Suisse et au Portugal

		Plateau suisse	Littoral sud-portugais
Site	Localisation	Plaine de l'Orbe	Villa Nova de Milfontes
	surface [km <sup>2</sup> ]	10	30
Eolienne	type	Mod-2 Nasa; bipale à axe horizontal	
	hauteur de l'axe [m]	60	
	diamètre des pales [m]	91	
	puissance nominale [MWe]	2.5	
Centrale	nombre d'éoliennes	20	33
	puissance nominale [MWe]	50	81.7
	puissance moyenne [MWe]	3.1	14.2
	facteur d'efficacité de la centrale	0.092	0.142
	énergie annuelle produite [TJe]	97	448
	énergie annuelle par éolienne [TJe]	4.8	15
	densité d'éoliennes par km <sup>2</sup>	2	1.1
	énergie produite par km <sup>2</sup> [TJe/km <sup>2</sup> ]	9.7	14.9
	prix de revient [Fr./kWh]	0.90	0.60

mètre des pales. Il y a ainsi contradiction entre le désir d'accroître la puissance obtenue par une augmentation du nombre de machines et celui d'améliorer le rendement global de la centrale. Compte tenu de ces considérations, l'espacement des éoliennes dans le sens du vent dominant est de 15 diamètres pour le littoral sud-portugais et de 8 diamètres pour le Plateau suisse. Le tableau I résume les principaux résultats obtenus. Ces chiffres montrent que l'éolienne choisie est moins adaptée au Plateau

suisse qu'au littoral sud-portugais pour lequel les valeurs obtenues restent encore en deçà des performances d'une Mod-2 aux Etats-Unis (1,66 fois plus d'énergie produite) d'où la valeur plus élevée des prix de revient.

#### c) Généralisation à la région

En généralisant l'étude à l'ensemble des dix sites favorables des deux régions, l'énergie électrique totale est estimée à: — 1070 TJe/an pour le Plateau suisse, soit environ 1% de la

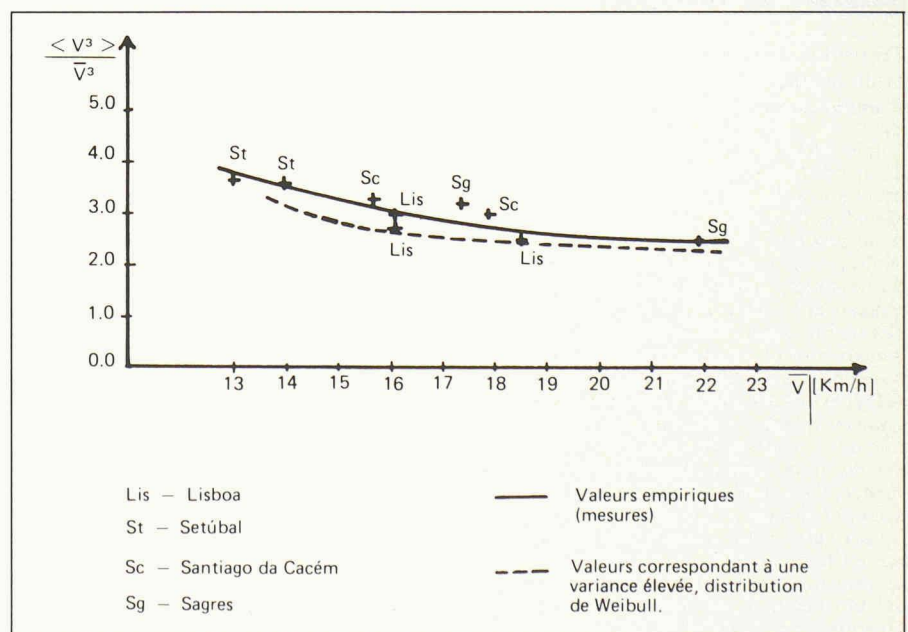


Fig. 6. — Coefficient d'irrégularité en fonction de la vitesse moyenne du vent.



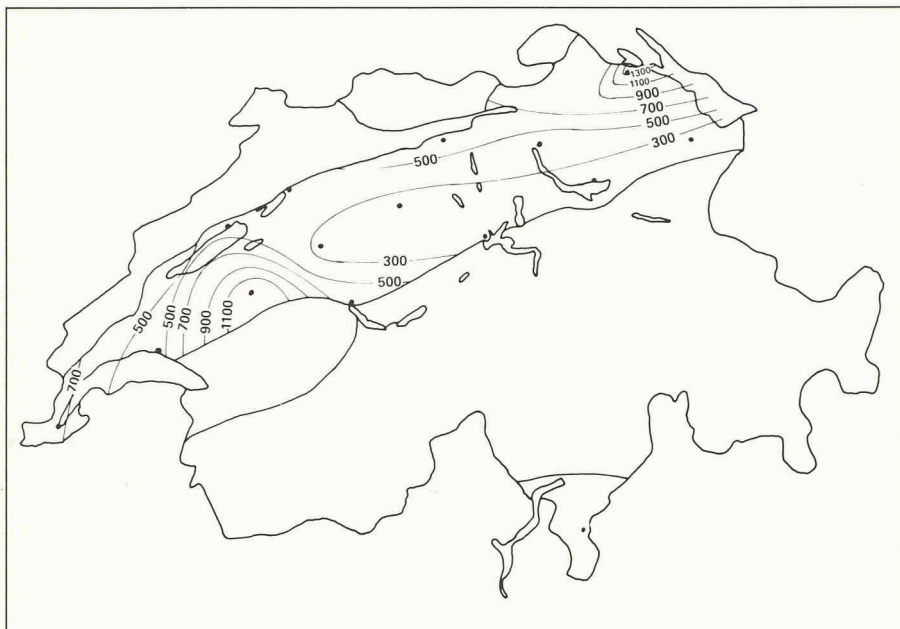


Fig. 7. — Ressources éoliennes du Plateau suisse.

consommation actuelle de la Suisse ;  
 — 9550 TJe/an pour le littoral sud-portugais, soit environ 16% de la consommation actuelle du Portugal.

L'ensemble de tous les sites des régions étudiées pourrait produire :

- 4 100 TJe/an pour le Plateau suisse ;
- 32 000 TJe/an pour le littoral sud-portugais.

#### 4. Perspectives de l'énergie éolienne

L'exploitation à grande échelle des ressources éoliennes est parfaitement réalisable grâce au développement d'aérogénérateurs à puissance élevée. Les exemples du Plateau suisse et du littoral sud-portugais sont significatifs à ce

sujet. Toutefois, les coûts évalués ci-dessus sont encore trop élevés par rapport au prix de revient actuels de l'électricité en raison essentiellement de deux facteurs. D'une part les ressources éoliennes des sites étudiés restent faibles pour la Suisse et moyennes pour le Portugal. D'autre part les éoliennes choisies sont peu adaptées aux conditions locales de vent.

La réalisation de grandes centrales éoliennes sur des sites à ressources importantes, avec des aérogénérateurs adaptés à ces sites et les économies d'échelle qui en découlent, aurait pour effet de réduire substantiellement le prix de revient et d'augmenter ainsi la compétitivité de l'énergie produite.

En outre l'énergie éolienne est valorisée si elle est exploitée dans des zones isolées loin du réseau énergétique existant sous forme d'unités décentralisées à faible ou

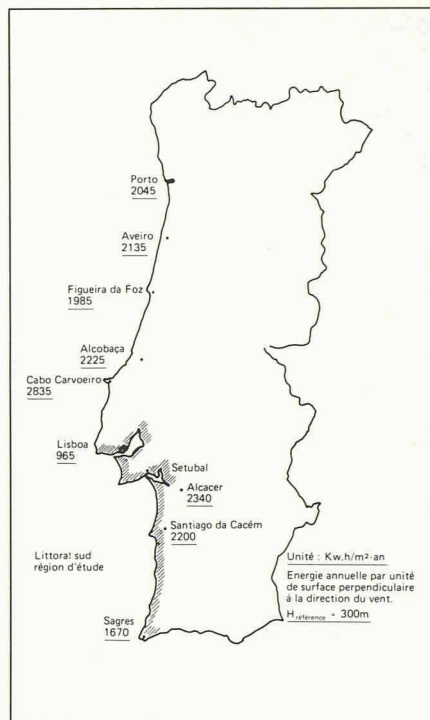


Fig. 8. — Ressources éoliennes du littoral sud-portugais.

moyenne puissance. D'autre part, elle peut constituer une source d'énergie d'appoint pour certaines activités industrielles ou commerciales. Enfin, les utilisations traditionnelles de cette forme d'énergie pour le pompage de l'eau du sous-sol conservent tout leur intérêt.

Adresses des auteurs :

Fernando da Silva  
 Avenue Floréal 6  
 1006 Lausanne  
 Ricardo Pascual  
 Chemin des Corbillettes 9 d  
 1216 Cointrin

## Bibliographie

### Protection de la nature et du paysage lors d'améliorations foncières

Guide 1983, édité par l'Office fédéral des forêts, Berne. — Une brochure au format A4, 75 pages, abondamment illustrée. En vente au prix de Fr. 21.—, à l'Office central fédéral des imprimés et du matériel, Berne. Existe en français et en allemand.

Les améliorations foncières et les constructions rurales contribuent depuis des décennies à développer des structures agricoles, pour les adapter à une exploitation du sol conforme aux exigences de notre temps. On a commencé, il y a quelques années, à accorder davantage d'importance aux valeurs du paysage, comme en témoignent par exemple les remaniements parcellaires du val Müstair dans le canton des Grisons, de Grossaffoltern dans le canton de Berne et de Merisshausen dans le canton de Schaff-

house, l'amélioration des vignobles de Lavaux et l'amélioration intégrale de la vallée de la Reuss dans le canton d'Argovie. Ces efforts doivent être poursuivis, car le paysage est un bien menacé dont il faut avoir soin.

Dans le but d'intégrer les nouvelles connaissances et de récapituler les problèmes et expériences, l'Office fédéral des forêts et le Service fédéral des améliorations foncières, d'entente avec le groupe spécialisé des ingénieurs-géomètres de la SIA, ont constitué un groupe de travail interdisciplinaire avec des représentants de la protection de la nature et du paysage, et des améliorations foncières. Ce groupe de travail a élaboré un guide pour la prise en considération de la protection de la nature et du paysage lors d'améliorations foncières.

Le guide s'adresse en première ligne aux auteurs de projets et aux services de la Confédération et des cantons. Il est subdivisé en trois chapitres principaux : énoncé du problème, recommandations pour la suite des opérations

et l'étude des projets, et prise en considération de la protection de la nature et du paysage dans l'étude du projet et l'exécution des travaux. Le guide représente les points de vue des améliorations foncières et ceux de la protection de la nature et du paysage, ainsi que d'autres intérêts publics qui doivent être pris en compte (aménagement du territoire, pêche, protection des eaux et forêts). La partie principale propose des solutions concrètes pour la prise en considération de la protection de la nature et du paysage dans les différents genres d'améliorations foncières.

Les améliorations foncières remplissent une tâche essentielle pour l'amélioration des structures agricoles, surtout en région de montagne et dans la région préalpine des collines ; il faut faire de sérieux efforts de coordination et obtenir une étroite collaboration de tous les ressorts concernés, pour trouver des solutions équilibrées. Le guide 1983 est destiné à promouvoir la compréhension mutuelle indispensable à cet effet.

### Ouvrages reçus

**Einflüsse auf das Haften von Innenputzen auf Beton**, W. Manns, Th. Wisotzky, R. Zimbelmann. Publication N° 77 de l'Institut Otto-Graf d'essai des matériaux du Bade-Wurtemberg. Stuttgart, 1983. Une brochure de 78 pages, format A5.

**Periodica AIPC 3/1984**, août 1984. Revues S-27/84 : Les techniques de vérification des projets de structures par H. Mathieu ; S-28/84 : Reports on Important Conferences on Energy Related Subjects. Journal AIPC J-24/84 : Qualitätssicherung als Aufgabe des Baumanagements, A. Schub, Mémoires P-75/84 : Dynamic Load Testing of Highway Bridges, R. Cantieni. Mémoires P-76/84 : Analysis of Asymmetric Structures, by Galerkin Technique, S. Swaddiwudhipong et al. Constructions C-31/84 : Réservoirs. Bulletin B-31/84. Édité par l'AIPC, EPFZ-Hönggerberg, 8093 Zurich. Abonnement (4 livraisons par an) : Frs. 120.—.