

Zeitschrift: Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

Herausgeber: Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

Band: 78 (1987)

Heft: 6

Artikel: Développements de l'énergie éolienne aux Etats-Unis

Autor: Bautz, R.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-903836>

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: 14.01.2026

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

Développement de l'énergie éolienne aux Etats-Unis

R. Bautz

L'énergie éolienne est souvent marginalisée en Europe. Pourtant, l'industrie du vent est en train de vivre une expérience intéressante aux Etats-Unis, notamment en Californie. Les faits le prouvent: plus de 15 000 aérogénérateurs, ayant une puissance installée de 1570 MWe, sont actuellement raccordés au réseau électrique.

In Europa wird die Windenergie oft etwas nebensächlich behandelt. Trotzdem erlebt gegenwärtig die Windindustrie einen interessanten Aufschwung, insbesondere in den Vereinigten Staaten und speziell in Kalifornien. Die Tatsachen bestätigen, dass mehr als 15 000 Windgeneratoren, mit einer installierten Leistung von 1570 MWe, gegenwärtig an das Stromnetz angeschlossen sind.

1. Le programme américain

En 1970, le gouvernement fédéral des Etats-Unis a établi un programme ambitieux pour développer l'industrie éolienne, afin de diversifier les ressources énergétiques. Ce programme est basé sur une politique de l'énergie résultant d'une stratégie en deux points:

- Une intervention et un contrôle modérés du marché de l'énergie par le gouvernement, tout en garantissant la santé et la sécurité publique, ainsi que la protection de l'environnement.
- Un développement d'une base énergétique aussi variée que possible, allant des ressources conventionnelles aux énergies dites renouvelables, telles l'hydroélectricité, l'énergie solaire, le vent et la géothermie.

Plusieurs facteurs ont contribué à l'essor des énergies renouvelables aux USA:

- L'épuisement progressif des réserves de pétrole du pays.
- L'augmentation constante de la demande d'énergie électrique, le taux moyen de croissance étant estimé à 3,5% par an pour les prochaines années.
- Le problème de la pollution atmosphérique, notamment celui des pluies acides, qui a amené les autorités des Etats-Unis et celles du Canada à introduire des normes et des contrôles sévères sur les installations brûlant des hydrocarbures.
- L'augmentation des investissements spécifiques des nouvelles unités de production, telles les centrales thermiques (\$ 2000 à 2500 par kW).

2. Les fermes d'éoliennes

Au début, les fonds disponibles du gouvernement ont surtout été utilisés par les grands constructeurs américains (Boeing, Westinghouse, General

Electric) pour développer des aérogénérateurs ayant des diamètres d'hélice entre 30 et 90 m. Les problèmes liés à la faiblesse de la structure, l'investissement spécifique élevé et les charges d'exploitation importantes ont conduit à l'abandon d'une production en grande série de ces machines.

En 1978, la «Federal Energy Regulatory Commission» (FERC) a introduit un arrêté, le «Public Utility Regulatory Policies Act», ou «PURPA», qui obligea les grandes entreprises de distribution d'électricité d'acheter l'énergie aux auto-producteurs indépendants, garantissant un marché pour les éoliennes, avec un prix d'achat du kilowattheure intéressant. Cet arrêté, inégalement respecté dans les différents Etats, a permis l'essor des premières «windfarms» privées, avec des machines de moyenne puissance très fiables (diamètre de l'hélice entre 10 et 18 m).

Une «windfarm», ou ferme d'éoliennes, est une petite centrale électrique, composée:

- de plusieurs aérogénérateurs,
- d'un poste de couplage pour injecter l'énergie produite sur un réseau électrique,
- d'un centre de commande,
- d'un atelier d'entretien.

Cet ensemble (fig. 1), construit sur un site possédant un bon gisement éolien, caractérise un «projet éolien» géré par une société financière, généralement associée à un constructeur. De ce fait, chaque projet est composé de turbines d'une même marque.

La première ferme fut construite en 1981 par U.S. Windpower, au New Hampshire. Elle est équipée de 20 aérogénérateurs, de 30 kW de puissance nominale, raccordés sur le réseau électrique local. Ce projet avait été budgétisé à \$ 1 million. Après cette première expérience positive, de nombreuses autres fermes d'éoliennes ont été cons-

Adresse de l'auteur

R. Bautz, ing. él. EPFL, chef des Bureaux techniques, Electricité Neuchâteloise S.A., 2035 Corcelles



Figure 1 Altamont Energy Corp., windfarm équipée de 250 aérogénérateurs «Nordtank» de 65 kW/unité

loppement de ces fermes d'éoliennes. Elles se sont contentées d'acheter l'énergie produite, ceci pour plusieurs raisons:

- Ce sont les sociétés privées qui ont bénéficié, exclusivement, des divers subventionnements et allègements fiscaux dans le domaine des énergies renouvelables.
- Ces sociétés, développant des systèmes de production autonomes, assurent également les risques financiers et techniques liés aux projets.
- Les entreprises de distribution préfèrent attendre le mûrissement de ces nouvelles techniques énergétiques.

Le marché des constructeurs d'aérogénérateurs américains est fortement segmenté selon la gamme de puissance des machines. En 1984, 60 constructeurs se partageaient le marché, dont 3 à 4 seulement couvraient environ le 80% de la production indigène.

3. Le financement des études et des projets éoliens

De 1975 à 1984, l'Office fédéral américain des énergies renouvelables a investi plus de \$ 6 milliards dans la recherche sur les énergies de substitution. Le tableau II montre la répartition des sommes dépensées dans le cadre de l'énergie éolienne.

Le financement des fermes d'éoliennes est réalisé en grande partie par des sociétés privées, fournissant les fonds importants nécessaires à l'essor de l'industrie du vent. Ces sociétés financières, bien organisées, s'occupent, pour le compte de leurs clients, de l'ensemble des services nécessaires au développement d'un projet, soit:

- la prospection de sites favorables,
- l'étude et la construction des installations de production,

truites dans différents Etats: New York, Vermont, New Mexico, Hawaï et surtout en Californie, où est concentrée la plus grande part du parc éolien américain (98% de l'ensemble de la puissance installée). Le tableau I résume quelques grandeurs caractéristiques de l'évolution des projets californiens.

Les grandes compagnies de distribution d'énergie électrique se sont tenues, jusqu'à ce jour, à l'écart du déve-

	1981	1982	1983	1984	1985	Total
Nombre d'aérogénérateurs installés	144	1145	2493	4687	4720	13 189
Puissance installée (MW)	7	64	172	366	489	1 098
Investissement (mio de \$)	21	139	326	680	834	2 000
Coût spécifique (\$/kW)	3000	2172	1895	1858	1705	-
Puissance moyenne installée par projet (MW)	0,9	2,4	7	11	20	-
Puissance moyenne d'un aérogénérateur (kW)	49	56	69	78	104	-

Tableau I Développement des projets californiens

	Aides directes (mio \$)	Subventions (Tax Support) (mio \$)
Aérogénérateurs de grande puissance (qqe MW)	202	-
Autres aérogénérateurs	148	-
Subventions accordées (Tax Credits)	-	175,3
Total des aides fédérales accordées	350	175,3
Energie produite en 1985	env. 640 GWh	

Tableau II Aides fédérales accordées à l'énergie éolienne

- les contrats de vente d'énergie,
- l'entretien et l'exploitation de l'unité de production.

Une fois un site acquis ou loué, la société émet des parts à l'intention des investisseurs potentiels. Ceux-ci bénéficient d'une législation fédérale qui encourage la participation privée grâce aux allègements fiscaux accordés dans le cadre des projets concernant les énergies renouvelables. Ils profitent également de subventions à l'investissement, les «Tax Credits», qui permettent de réduire le montant initial investi. En Californie, par exemple, le maître de l'ouvrage peut couvrir le 50% de l'investissement initial par le «federal energy investment tax credit» (25%) et le «California State energy tax credit» (25%). Il bénéficie également, selon les cas, d'allègements sur les taux d'amortissement.

On comprend ainsi mieux les raisons de l'attrait des investisseurs privés pour ce marché fortement subventionné de l'énergie éolienne. D'autre part, grâce à l'arrêté PURPA de 1978, les contrats portant sur la vente d'énergie ont pu être signés pour des périodes assez longues, généralement de 30 ans. Le prix payé pour le kilowattheure électrique est intéressant. Il est calculé sur la base du coût marginal de l'énergie la plus chère fournie au réseau. Ainsi, l'énergie éolienne peut être considérée comme «fuel saver», c'est-à-dire qu'elle permet d'économiser le combustible des centrales thermiques conventionnelles.

Actuellement, une certaine saturation du marché de l'investissement privé amène les sociétés à s'approcher des

investisseurs institutionnels, ceci surtout grâce à la maturité atteinte par cette nouvelle technologie. La disponibilité obtenue par les machines mises récemment en service le confirme. L'expérience du terrain permet d'autre part de récolter beaucoup d'informations, et la «California Energy Commission» (CEC) a établi une banque de données mise à disposition des investisseurs pour des études et des analyses comparatives.

A l'avenir, d'autres formes de financement verront certainement le jour, comme par exemple, le «lease-finance», sorte de crédit-bail, avec promesse de vente ultérieure à des investisseurs institutionnels.

4. L'exemple californien

Situation actuelle

La Californie, berceau des technologies nouvelles, tient également une place d'avant-garde dans le domaine de l'énergie éolienne. Avec le 98% de la capacité de production installée aux USA, elle est devenue le marché principal pour les constructeurs d'aérogénérateurs. La raison de ce succès a plusieurs origines:

- Un prix d'achat intéressant, payé par les compagnies d'électricité aux auto-producteurs, notamment du fait des coûts de production d'énergie élevés des nombreuses centrales thermiques en service dans l'Etat.
- Des crédits et des allègements fiscaux importants offerts par l'Etat californien.
- Des gisements éoliens élevés sur les cols se trouvant entre l'océan Pacifique et les déserts.

- Une concordance temporelle favorable entre la charge du réseau et l'apparition des vents dans les cols.
- Des autorités actives, à travers la «Public Utilities Commission» (PUC), pour le développement des énergies renouvelables.
- Une Commission de l'énergie de l'Etat ayant réalisé une étude de prospection pour déterminer les sites ventés.
- Un marché financier composé d'investisseurs actifs qui sont constamment à la recherche de nouveaux débouchés pour leurs placements.

La technologie modulaire de l'énergie éolienne, ne nécessitant pas de capitaux importants au départ, a également contribué à ce développement fulgurant.

Les trois principaux parcs éoliens ont été construits sur les cols suivants:

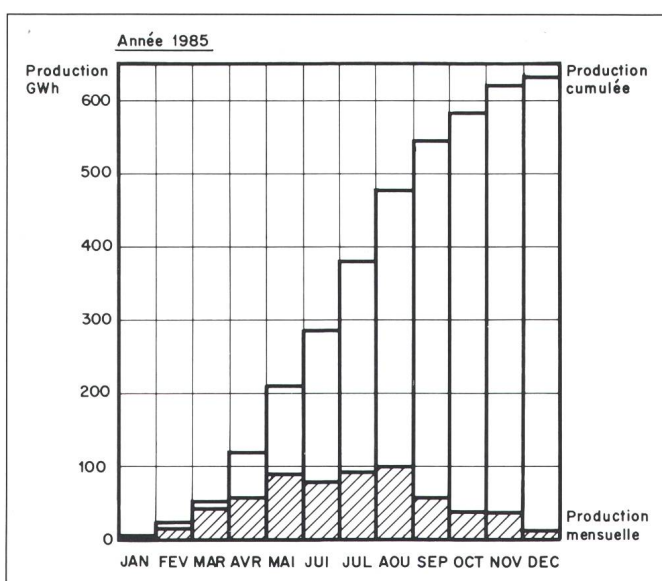
- Altamont pass
- Tehachapi pass
- San Geronio pass.

A la fin de 1985, 13 189 turbines, ayant une puissance installée de 1098 MW, fournissaient de l'énergie électrique aux réseaux de l'Etat. Grâce à la diminution du coût spécifique des unités de production, qui a passé de 3000 \$/kW (1981) à 1705 \$/kW (1985), le coût de l'énergie a pu être abaissé à environ 8 cents/kWh.

Selon l'avis de certains experts, cette progression devrait continuer, afin de rendre cette énergie encore plus compétitive. Le potentiel exploitable, dans un proche avenir, a été estimé à 4000 MW pour la seule Californie.

La figure 2 montre la productibilité des fermes d'éoliennes raccordées aux

Figure 2
Production des fermes d'éoliennes californiennes



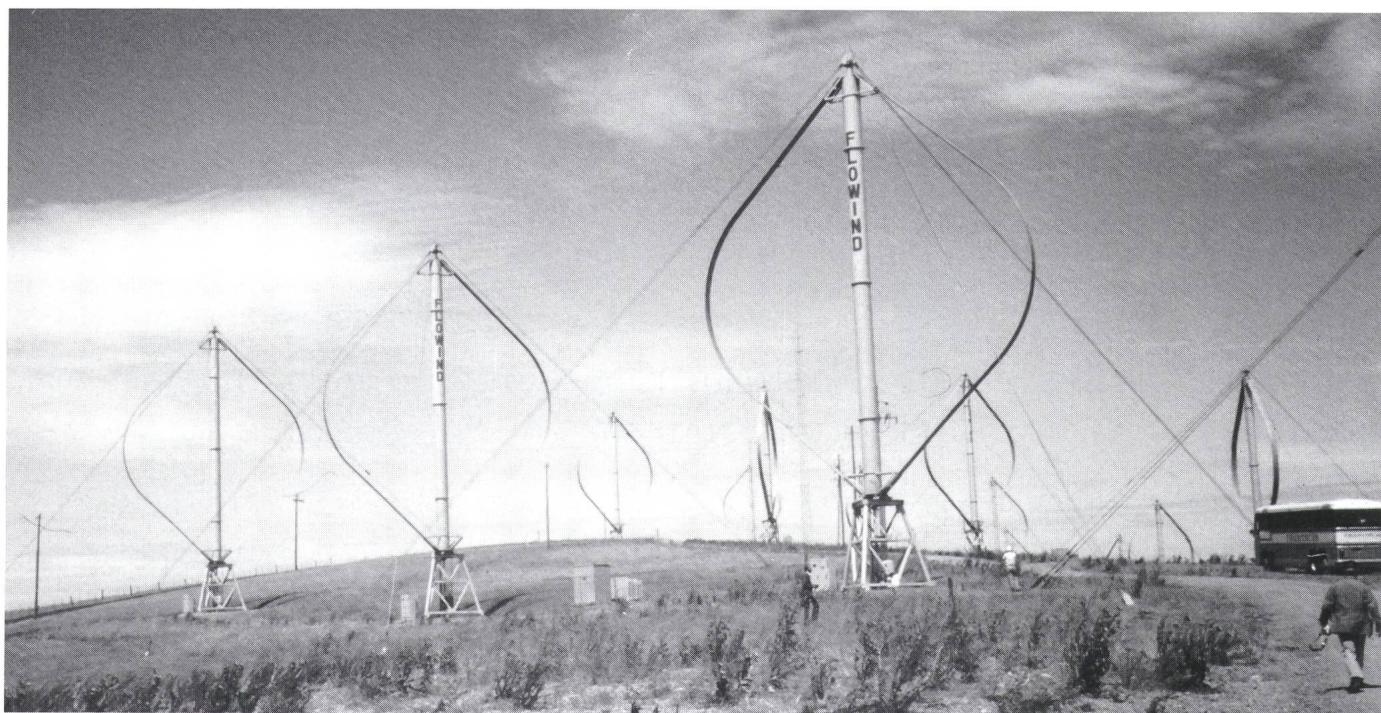


Figure 3 Ferme d'éoliennes de «Flowind Corp», composée de 150 aérogénérateurs du type «Darrieus»

réseaux des deux plus importants distributeurs californiens.

Etude d'un cas : Altamont pass

Altamont pass, à 80 km au sud-ouest de San Francisco, est une région parsemée de petites collines, où se trouve le plus grand complexe éolien du monde (fig. 3).

Plus de 4000 turbines, représentant le 40% de la puissance installée des fermes d'éoliennes en Californie, ont été construites sur ce site, véritable corridor venté entre deux vallées: la «Central Valley» et la «Livermore-Amador Valley». L'air au-dessus de la vallée de Sacramento s'échauffe durant le jour, provoquant un appel d'air froid, plus dense, qui s'infiltre depuis l'Océan à travers les collines d'Altamont pass.

Les vents les plus forts soufflent de mi-avril à mi-septembre, périodes durant lesquelles la différence de température entre la côte du Pacifique et les plaines intérieures est la plus élevée.

Ainsi, le 65 à 75% de l'énergie annuelle est produite pendant les cinq mois les plus chauds de l'année.

Vitesses moyennes du vent:

- Été 8 à 12 m/s
- Hiver 4 à 6,6 m/s.

Une quinzaine de sociétés et de constructeurs sont actifs dans la région. Ils louent le terrain nécessaire

aux fermiers. La densité d'occupation au sol étant en moyenne de 1 aérogénérateur par 1,5 ha, des espaces suffisants sont préservés entre les machines pour l'élevage du bétail. Les paysans peuvent ainsi valoriser leurs terres, notamment en été, pendant la période de sécheresse.

Chaque entrepreneur développe une région déterminée, avec un poste de couplage transformant la tension de 400 V, à la sortie des générateurs, en 12 kV, puis en 115 ou 230 kV. Cette énergie est injectée sur le réseau de la «Pacific Gas and Electric» (PG&E).

La figure 4 présente les différents types de machines installées à Altamont pass. La majorité est composée d'aérogénérateurs à axe horizontal. Une seule ferme est équipée de turbines à axe vertical type Darrieus, de l'entreprise Flowind. Le 1/3 des éoliennes est d'origine européenne, principalement du Danemark. Les coûts d'entretien et d'exploitation de ce parc sont estimés entre 0,015 \$/kWh et 0,03 \$/kWh. La disponibilité des unités de production est comprise entre 80% et 97%, selon le type et la marque.

En 1985, l'énergie produite à Altamont pass a permis d'économiser environ 567 000 barils¹ de pétrole.

¹ 1 baril de pétrole = env. 600 kWh

5. Avenir

La maturité technique, actuellement atteinte par l'industrie éolienne, a permis de rendre cette énergie compétitive. Pourtant, quelques nuages sombres s'accumulent à l'horizon car le gouvernement de Washington a récemment supprimé certains allègements et subventionnements pour les énergies renouvelables.

Ainsi, la compétitivité de l'énergie éolienne devra encore être prouvée dans ce nouvel environnement non subventionné.

La Commission de l'Energie californienne est malgré tout optimiste. Elle estime que la vitalité actuelle du marché éolien permettra de surmonter ces obstacles. L'effet de série permettra d'abaisser encore l'investissement spécifique de ces installations de production.

Deux tendances se précisent dans ce domaine:

- Une augmentation de la puissance moyenne des unités installées (1983: 69 kW; 1985: 104 kW).
- Une réduction des coûts d'entretien et d'exploitation.

L'industrie éolienne devra également améliorer son image de marque auprès des investisseurs potentiels, qui considèrent les placements dans ce domaine comme des investissements à hauts risques, donc des taux d'amortis-

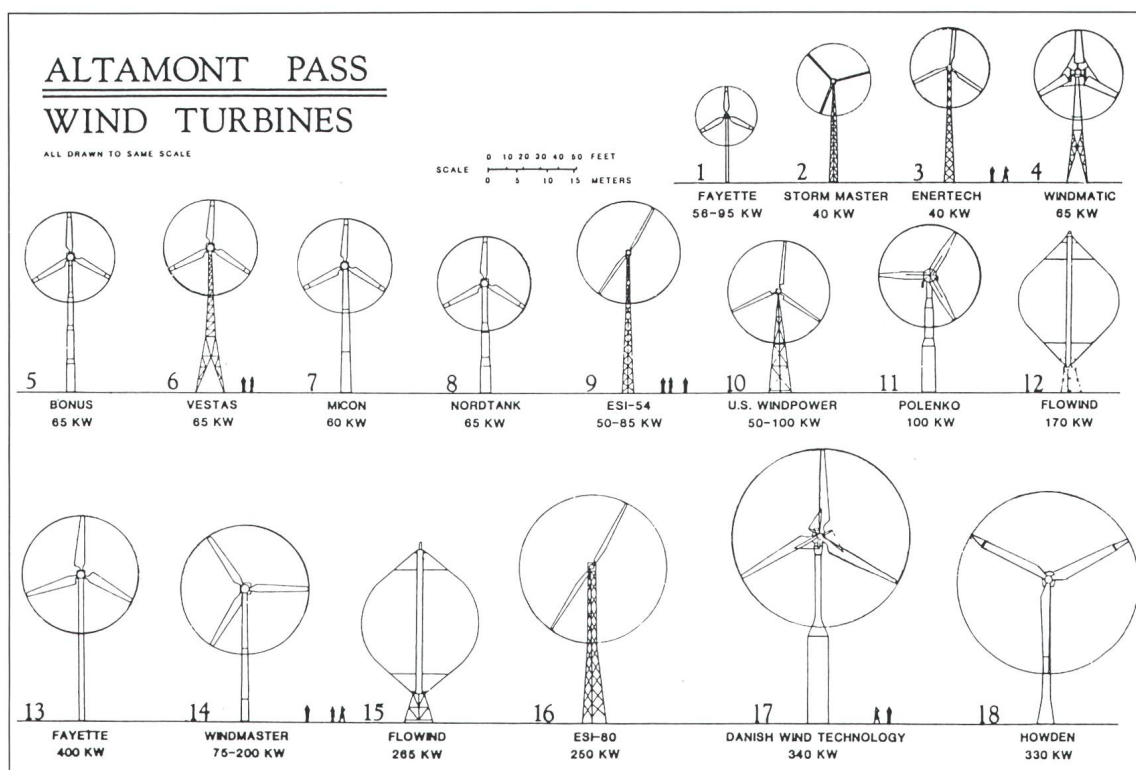


Figure 4
Types de machines
installées à
«Altamont Pass»

sement relativement élevés. L'expérience du terrain permettra peut-être de modifier cette attitude.

Pour renforcer leur audience, les sociétés financières et les constructeurs se sont regroupés en une association

l'«American Wind Energy Association» (AWEA), dont le but est:

- de limiter les abus des demandes de subventions
- de définir une déontologie profes-

sionnelle

- de normaliser le matériel utilisé dans ce domaine
- de réaliser des études d'impact sur l'environnement de cette nouvelle technologie.

Energie éolienne en Suisse

En Suisse, les énergies renouvelables ont bénéficié ces dernières années, surtout depuis la crise pétrolière, d'un soutien accru de la part du secteur public.

Toutefois, les sommes allouées à l'énergie éolienne sont restées très modestes: de 0,08 à 0,2 millions FS par année.

Le secteur privé n'a pas attendu le réveil des pouvoirs publics pour aller de l'avant. Des entreprises spécialisées dans le domaine de l'énergie ont construit des aérogénérateurs, ceci avec l'aide de quelques instituts de recherche universitaire.

Plusieurs de ces machines ont fait une entrée remarquée dans la compétition internationale:

- Les aérogénérateurs Windwatt 5 et 10 kW, développés par les Forces Mo-

trices Neuchâteloises en collaboration avec l'Ecole polytechnique fédérale de Lausanne. Ces machines bipales, à axe horizontal, sont caractérisées par un chiffre de vitesse élevé ($\lambda = 10$), ce qui permet d'éviter l'utilisation d'un multiplicateur.

- Depuis février 1985, un aérogénérateur Alpha Real à axe vertical de 160 kW fournit de l'énergie électrique au réseau 16 kV des Forces Motrices Bernoises à Fahy JU. Cette machine de 17 mètres de diamètre et de 27 mètres de haut est la première d'une série destinée au marché des fermes d'éoliennes.

Le 6 novembre 1985, le Conseil fédéral a décidé la participation suisse au projet

«systèmes éoliens décentralisés» du programme de recherche de l'Agence internationale de l'énergie. Ce projet, comprenant la technique d'évaluation des sites et l'analyse des systèmes éoliens-diesel, concerne plus particulièrement les machines de taille intermédiaire.

D'autres projets sur l'installation de fermes d'éoliennes sont également à l'étude, bien que les perspectives d'utilisation d'aérogénérateurs à large échelle restent faibles en Suisse.

Toutefois, de par la tradition, notre industrie des machines est très intéressée par le développement de l'énergie éolienne dans certains pays bénéficiant de gisements plus favorables.