



**HAL**  
open science

# Caractérisation aérodynamique d'un rotor éolien en site naturel

Benoît Fabre, H. Coudeville

► **To cite this version:**

Benoît Fabre, H. Coudeville. Caractérisation aérodynamique d'un rotor éolien en site naturel. Journal de Physique III, 1991, 1 (3), pp.455-463. 10.1051/jp3:1991131 . jpa-00248590

**HAL Id: jpa-00248590**

**<https://hal.science/jpa-00248590>**

Submitted on 4 Feb 2008

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Classification  
Physics Abstracts  
86.10D

## Caractérisation aérodynamique d'un rotor éolien en site naturel

B. Fabre et H. Coudeville

Laboratoire de Mécanique Physique, Institut Universitaire de Technologie, 29287 Brest Cedex, France

(Reçu le 28 mai 1990, accepté le 20 novembre 1990)

**Résumé.** — La courbe du coefficient de puissance aérodynamique ( $C_p$ ) en fonction de la vitesse spécifique ( $V_s$ ) peut être obtenue en champ libre, à vitesse de rotation variable et sans sélection des mesures par des critères de stabilité. L'expérimentation sur un système éolien composé d'un rotor Darrieus à pales droites associé à un convertisseur mécano-thermique nous a permis de mettre en évidence les conditions d'une caractérisation correcte. Notamment, l'histogramme des valeurs instantanées, acquises et traitées, de la vitesse spécifique doit être le plus plat possible sur une large zone de part et d'autre de la valeur donnant le coefficient de puissance maximal.

**Abstract.** — The  $C_p/V_s$  curve (aerodynamic power coefficient *versus* tip-speed ratio) may be obtained in the field, therefore with different windspeeds, and to varying rotor speed, without selection of measures by steady state criterion. Experimentation is made on a small windmill with a straight blades Darrieus turbine and an eddy current converter. It allows us to display the conditions for a satisfying characterisation. So, the histogram of tip-speed ratio's instantaneous values must be as flat as it is possible, this on both sides of the tip-speed ratio's value for which the power coefficient is maximum.

Un rotor éolien, dans son interaction aérodynamique avec le vent, peut être caractérisé, sans considérer la variation du nombre de Reynolds, par une courbe reliant les paramètres adimensionnés  $C_p$  et  $V_s$ .

$C_p$  est le rapport de la puissance aérodynamique fournie par le rotor à la puissance cinétique du vent incident sur la surface frontale.

$V_s$ , vitesse spécifique, est le rapport de la vitesse périphérique de la pale à la vitesse du vent incident.

La recherche de cette caractéristique présente diverses difficultés suivant le type d'expérimentation.

La soufflerie est un moyen d'étude pour lequel le contrôle du rotor, les mesures et leur traitement sont aisés. En effet, la vitesse du vent ( $U$ ) ajustable est maintenue constante ; la régulation assure une vitesse angulaire de rotation ( $\Omega$ ) déterminée et la mesure de puissance en régime stationnaire, souvent par l'intermédiaire du couple, donne immédiatement un point  $C_p$ ,  $V_s$  (ex. : Sheldahl [1]).

Toutefois, la soufflerie ne permet l'étude que sur modèle réduit si ce n'est pour les rotors éoliens de très faibles dimensions.

L'expérimentation dans la nature est soumise au problème de la mesure de la vitesse du vent agissant effectivement sur le rotor éolien, à sa variation incontrôlée avec des périodes de stabilité très brèves.

La méthode de traitement des mesures alors utilisée (« bin method » Akins [2]) consiste à grouper les mesures en classe de vitesse de vent  $U$ , la vitesse  $\Omega$  étant maintenue constante par régulation.

Dans notre cas,  $U$  et  $\Omega$  étant variables, le traitement porte sur des classes de vitesse spécifique  $V_S$ .

Certains expérimentateurs (Unfors [3-4]) introduisent des critères de stabilité sur la puissance du rotor, sur  $\Omega$  et sur  $U$ . Leur utilisation allonge la durée de l'expérimentation, et privilégie les périodes de vent à faible vitesse et faible turbulence. L'acquisition expérimentale de la vitesse du vent introduit un écart entre la valeur mesurée et la valeur réelle du vent agissant sur le rotor. La discrétisation temporelle, introduite par l'application du critère de stabilité, ne permet plus d'affirmer que la valeur moyenne des écarts est nulle ; d'où un possible effet déformant sur la courbe résultant du traitement statistique par classe.

Cette étude montre la possibilité de l'obtention de la caractéristique  $C_P$ ,  $V_S$  pour une éolienne en champ libre sans sélection des points de mesure instantanés.

#### Ensemble expérimental (Fig. 1).

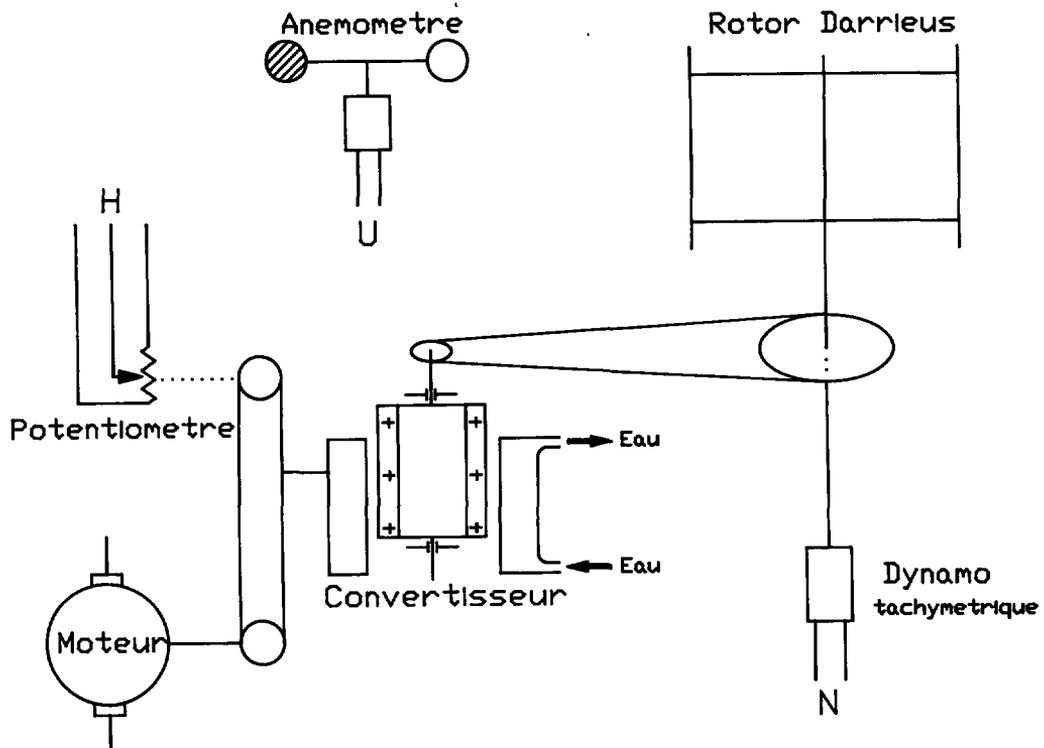


Fig. 1. — Ensemble expérimental.

[Description of the plant.]

Le système éolien testé [5, 6, 7, 8] comporte un rotor éolien de surface frontale  $12 \text{ m}^2$  à axe vertical (Darrieus) à pales droites entraînant un convertisseur mécano-thermique par une transmission à pignons et courroie crantés.

Le rotor du convertisseur supporte trois paires d'aimants permanents alternés nord-sud. Le stator en bronze, siège de courants de Foucault, est refroidi par circulation d'eau. Le déplacement relatif stator-rotor (paramètre de position  $H$ ) contrôle la charge du rotor éolien. L'asservissement de  $H$  à la vitesse de rotation  $\Omega$  suivant différentes lois de consigne  $H_C = G(\Omega)$  permet d'imposer le fonctionnement sur différentes plages de valeurs de  $V_S$ .

La mesure de la vitesse du vent  $U$  est réalisée par un anémomètre à coupelles en amont du rotor éolien, l'expérimentation n'étant effectuée que lorsque la direction du vent évite l'effet du sillage du rotor sur l'anémomètre.

Une dynamo tachymétrique et un diviseur potentiométrique mesurent la vitesse  $\Omega$  et le paramètre  $H$ .

L'acquisition des mesures, leur traitement et le contrôle du système éolien sont automatisés : micro-ordinateur et console de commande à micro-contrôleur (Motorola MC68705).

La puissance  $P_C$  absorbée par le convertisseur est calculée en fonction de  $\Omega$  et  $H$ , après un étalonnage en laboratoire.

L'évaluation de l'inertie  $I$  des masses en rotation et du couple de pertes mécaniques  $C_f$  permet de remonter à la puissance aérodynamique  $P_a$  du rotor éolien :

$$P_a = P_c + C_f \Omega + I \Omega \, d\Omega/dt .$$

La puissance référence pour le calcul du coefficient de puissance  $C_p$  est la puissance cinétique du vent sur la surface frontale  $S$  du rotor :

$$P_u = 1/2 \rho S U^3 .$$

### Traitement des mesures.

Une loi de consigne d'asservissement  $H_C = G(\Omega)$  quadratique permet d'imposer, pour ce convertisseur, une variation de puissance en  $\Omega^3$ . La puissance du vent étant en  $U^3$ , ceci induit un fonctionnement à vitesse spécifique  $V_S$  relativement constante (faible dispersion de  $V_S$ . voir figure 2). L'utilisation, lors de séances successives, de plusieurs lois correctement définies permet de couvrir une large plage de valeurs de  $V_S$  (2,5 à 7,5).

Les points instantanés pour une mesure chaque seconde (50 min d'enregistrements) sont représentés sur les figures 3-A, B, C pour trois des fonctions  $H_C = G_j(\Omega)$  utilisées :

$$\text{points instantanés : } C_p = P_a/P_u \quad V_S = R\Omega/U .$$

Nous avons alors appliqué, à chaque séquence de mesures précédente, un traitement par classe de valeurs de  $V_S$ .

$$V_S \in [V_S i \pm 0,05] \rightarrow C_p i = \langle P_a \rangle i / \langle P_u \rangle i .$$

Les figures 3-A, B, C reproduisent les résultats de ce traitement à côté de la représentation des points instantanés. La caractéristique, obtenue *in fine* (voir Fig. 5), y est superposée à titre de comparaison.

La première remarque est l'existence d'une forte dispersion pour les fortes valeurs de  $V_S$ .

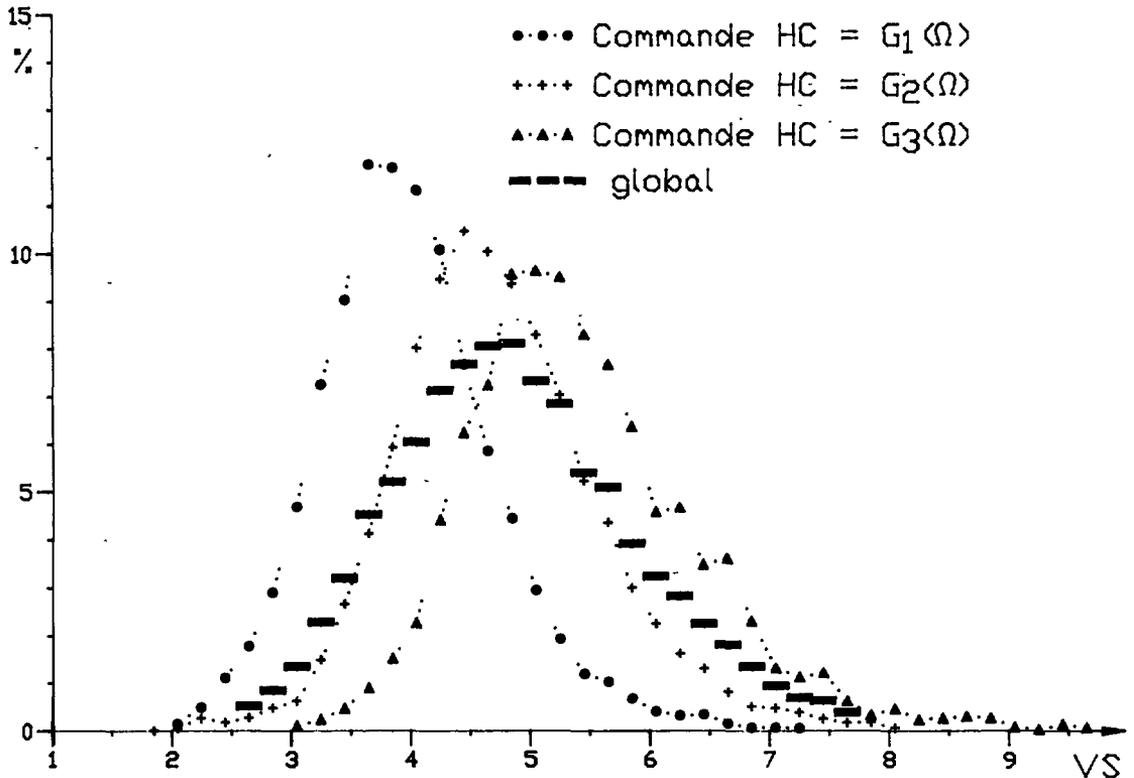


Fig. 2. — Histogrammes des valeurs de la vitesse spécifique.

[Histograms of tip-speed ratio's values.]

La seconde remarque, en comparant les résultats des séquences présentées, est qu'il semble exister une surévaluation de  $C_p$  pour les fortes valeurs et une sous-évaluation pour les faibles valeurs; fortes et faibles valeurs s'entendent par rapport à la valeur moyenne de  $V_S$  pour la séquence de mesures considérée.

Les deux observations précédentes peuvent être expliquées par l'influence perturbatrice des écarts  $\delta U$  de mesure sur la vitesse du vent, écarts qui apparaissent comme la cause première de la forte dispersion des points instantanés.

La vitesse du vent  $U$  figure au dénominateur des expressions de  $V_S$  et de  $C_p$ , élevée au cube dans celle du coefficient de puissance :

$$\delta V_S/V_S = -\delta U/U \quad \text{et} \quad \delta C_p/C_p = -3\delta U/U.$$

Un écart de mesure  $\delta U$  sur la vitesse du vent  $U$  déplace obliquement le point représentatif  $C_p, V_S$ .

La position réelle du point dans une classe de  $V_S$  peut donc avoir été déplacée dans une classe adjacente de valeur inférieure ou supérieure. La valeur moyenne des écarts  $\delta U$  est nulle, tout au moins dans les classes comportant un grand nombre de points de mesure; c'est-à-dire que le nombre de points déplacés dans une classe supérieure par des écarts négatifs est égal au nombre de points déplacés dans une classe inférieure par des écarts positifs.

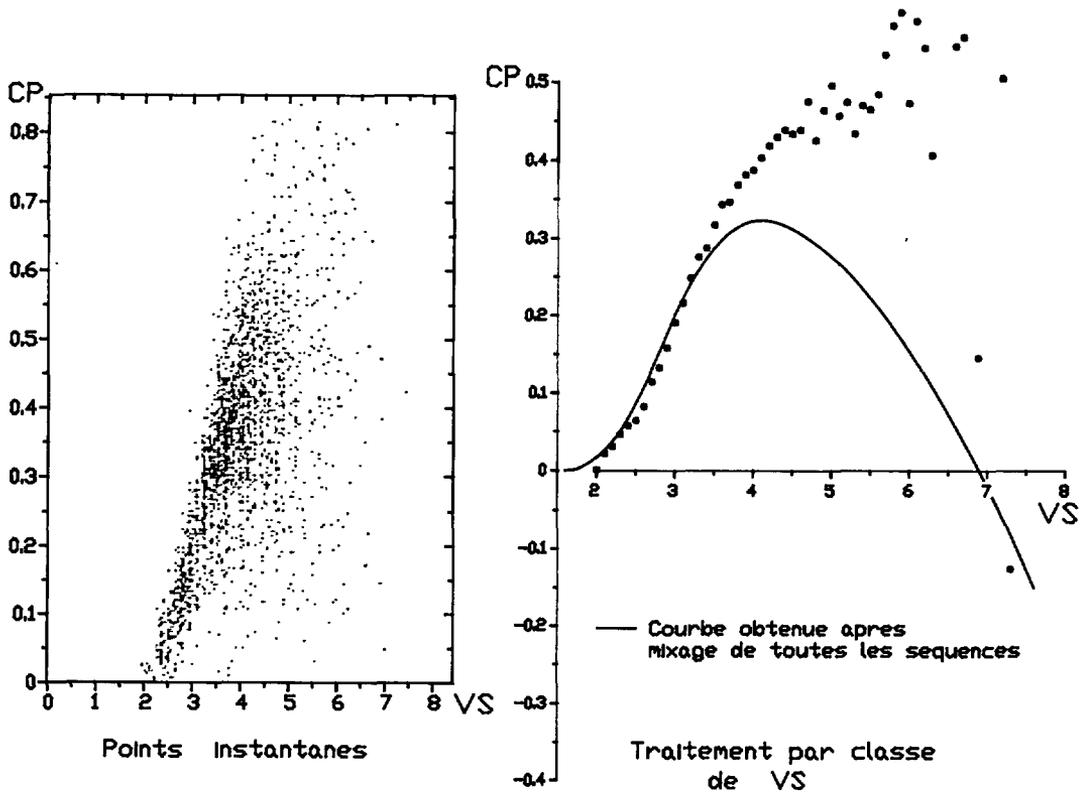


Fig. 3a. — Séquence de 50 min obtenue avec une fonction  $H_C = G1(\Omega)$ .

[50 min experimental session with a control function  $H_C = G1(\Omega)$ .]

Si la distribution des valeurs de  $V_S$  était uniforme (histogramme « plat »), l'incidence des  $\delta U$  serait inexistante par les contributions équivalentes pour une classe de la part des deux classes adjacentes.

Mais, nous avons vu que, pour une séquence de mesures obtenue avec une fonction d'indice  $j$  donné, l'histogramme (Fig. 2) est *en cloche*. Mis à part pour les classes proches de la valeur médiane où l'histogramme est de moins forte pente, l'influence sur la puissance moyenne  $\langle P_u \rangle_i$  et sur le coefficient de puissance  $C_P i$  n'est pas équivalente de la part des deux classes  $(i + 1)$  et  $(i - 1)$  : voir figure 4.

A gauche de la médiane (*faibles* valeurs de  $V_S$ ), l'apport de la classe  $(i + 1)$  est plus important que celui de la classe  $(i - 1)$ . Ceci entraîne donc une sous-évaluation de  $C_P i$ .

Inversement, à droite de la médiane (*fortes* valeurs de  $V_S$ ), les déplacements entre classes de  $V_S$  liés aux écarts de mesure engendrent statistiquement une surévaluation du coefficient de puissance  $C_P i$ .

Nous pouvons en conclure que, pour minimiser l'influence des écarts de mesure, *il est nécessaire d'élargir la zone de valeurs de la vitesse spécifique  $V_S$  autour de la médiane pour laquelle l'histogramme est relativement plat.*

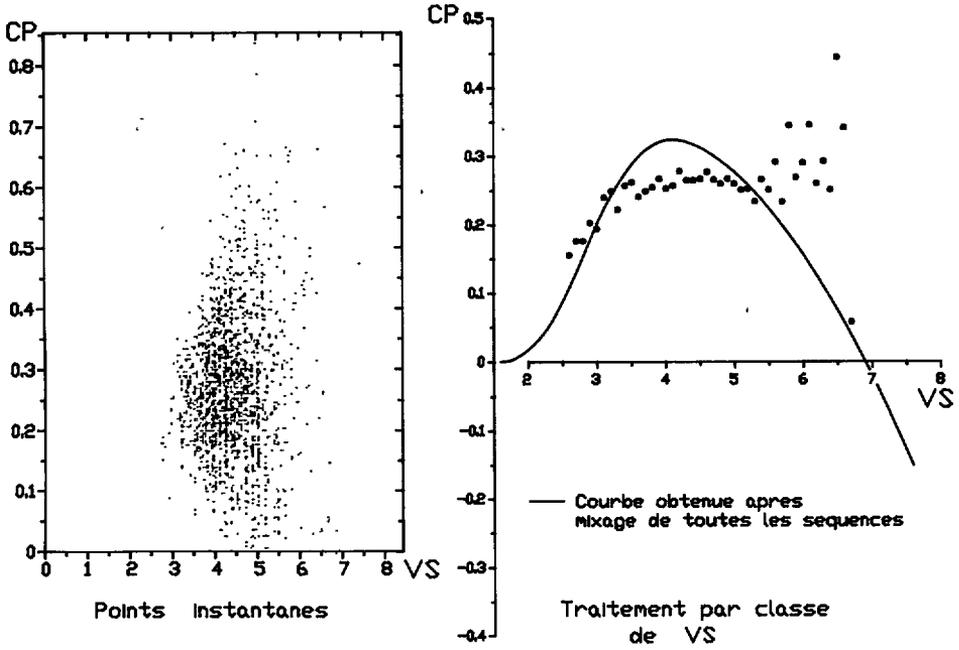


Fig. 3b. — Séquence de 50 min obtenue avec une fonction  $H_C = G2(\Omega)$ .

[50 min experimental session with a control function  $H_C = G2(\Omega)$ .]

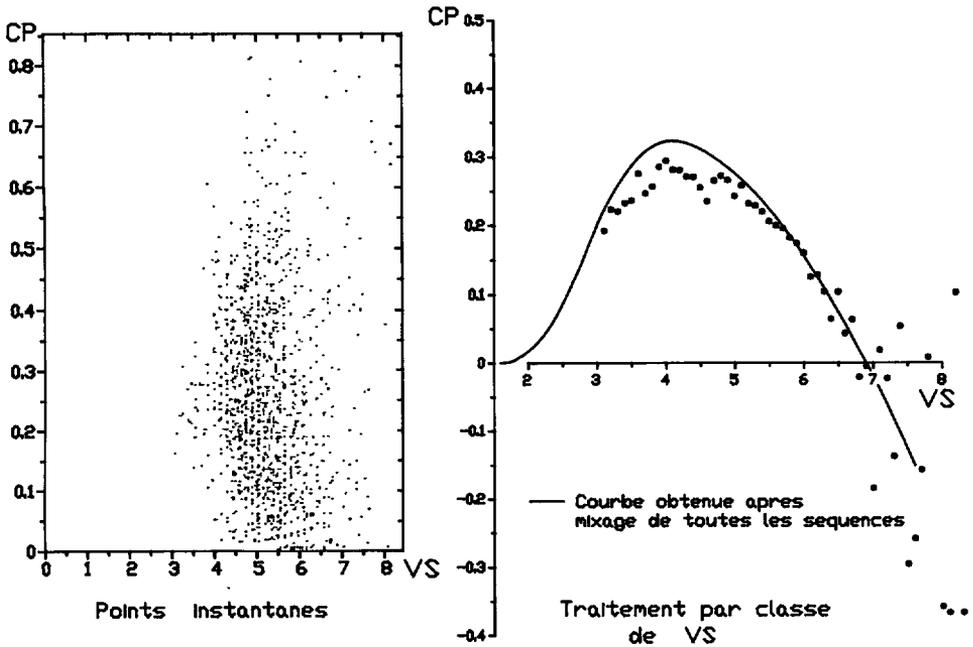


Fig. 3c. — Séquence de 50 min obtenue avec une fonction  $H_C = G3(\Omega)$ .

[50 min experimental session with a control function  $H_C = G3(\Omega)$ .]

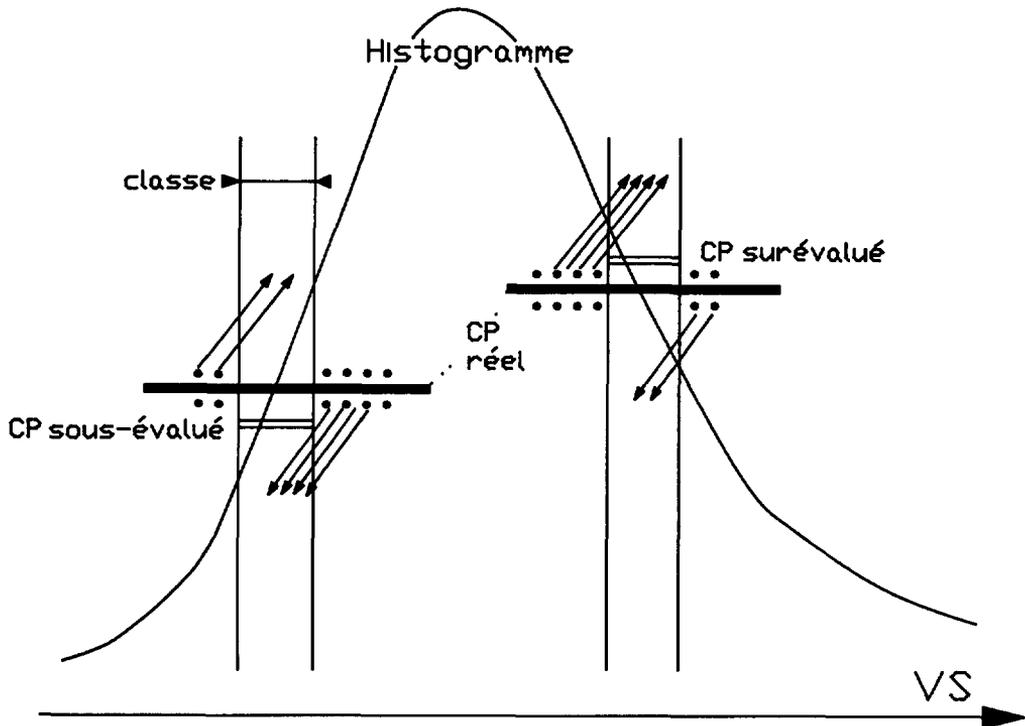


Fig. 4. — Influence sur  $C_p$  des écarts de mesure sur  $U$  avec un histogramme des  $V_s$  en cloche.

[Influence over  $C_p$  from deviations of measure over  $U$  with a *bell-shaped*  $V_s$ 's histogram.]

Dans ce but, nous avons procédé à l'enregistrement de séquences de mesure de durée comprise entre 20 et 50 min représentant au total 7,5 h de fonctionnement en utilisant les différentes fonctions d'asservissement.

Le traitement par classe de valeur de  $V_s$  est effectué pour toutes les séquences enregistrées. L'on procède ensuite à un mixage consistant à regrouper les séquences par fonction d'asservissement utilisée et à poursuivre le traitement par classe en pondérant la contribution de chacune des quatre fonctions, afin de compenser leur nombre inégal de points de mesures.

L'histogramme global des valeurs de  $V_s$  traitées est représenté sur la figure 2 : de valeur crête plus faible, il présente des variations de moins forte pente que ceux correspondant à chaque fonction.

Le résultat de ce mixage est présenté sur la figure 5. Ainsi ce rotor Darrieus offre un coefficient de puissance maximal de 0,32 pour une vitesse spécifique optimale égale à 4,1.

Il est intéressant de noter la faible dispersion des points autour de la courbe moyenne.

La justesse de cette caractéristique a été postérieurement démontrée par son utilisation pour le calcul des lois de commande  $H_C = G(\Omega)$  assurant le contrôle optimal de l'éolienne et la limitation de vitesse de rotation par décrochage aérodynamique, le comportement de l'éolienne correspondant alors parfaitement à la commande.

Un autre point à souligner concerne la faible durée de l'expérimentation nécessaire (7,5 h). Ceci résulte de l'absence du filtrage par l'emploi de critère(s) de stabilité sur les points de mesures.

Cette procédure d'expérimentation et de traitement des mesures en vue de la caractérisation aérodynamique d'un rotor éolien est applicable dès lors que l'on dispose d'un moyen de

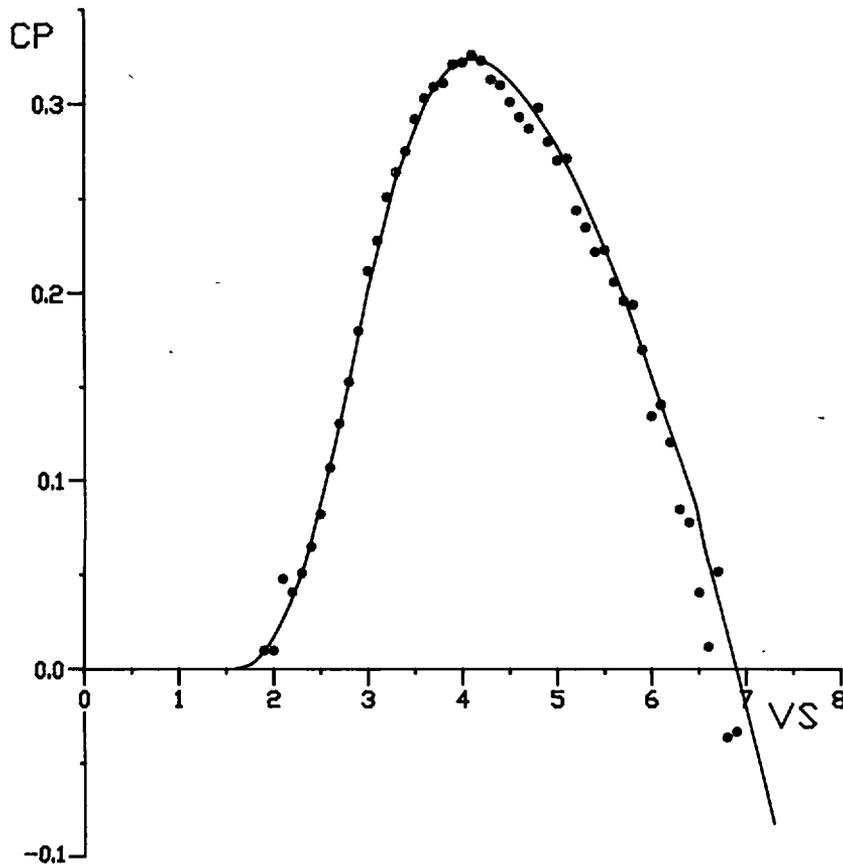


Fig. 5. — Caractéristique du rotor éolien.

[Characteristic of the wind turbine.]

contrôle d'un paramètre du système qui permet de le faire fonctionner uniformément sur une large plage de valeurs de la vitesse spécifique.

*Nomenclature :*

$U$  vitesse du vent libre (« à l'infini amont »)

$\Omega$  vitesse angulaire de rotation

$H$  paramètre de position relative stator-rotor du convertisseur

$H_C$  valeur de consigne du paramètre  $H$

$R$  rayon du rotor

$S$  surface frontale du rotor

$I$  inertie des masses en rotation

$\rho$  masse volumique de l'air

$C_f$  couple de pertes mécaniques

$P_c$  puissance absorbée par le convertisseur, fonction de  $\Omega$  et  $H$  obtenue par étalonnage du convertisseur

$P_u$  puissance cinétique du vent sur la surface frontale  $P_u = 1/2 \rho S U^3$

$P_a$  puissance aérodynamique du rotor éolien

$$P_a = P_c + C_f \Omega + I \Omega \, d\Omega/dt$$

$V_s$  vitesse spécifique  $V_s = R\Omega/U$

$C_p$  coefficient de puissance aérodynamique  $C_p = \langle P_a \rangle / \langle P_u \rangle$

$\langle . \rangle$  symbole de la valeur moyenne par classe de  $V_s$ .

### Bibliographie

- [1] SHELDAHL R. E., Comparaison of field and wind-tunnel Darrieus wind-turbine data, *Journal of Energy*, 5, n 4 (1981).
- [2] AKINS R. E., Performance evaluation of wind energy conversion systems using the method of bins-current status, Sandia National Laboratories, SAND 77-1375, March 1978.
- [3] UNFORS T., JOHANSON H., SVENSSON T., Measuring and evaluating system for small wind power unit. Report Chalmers University of technology, Gothenburg, March 1979.
- [4] UNFORS T., Measurements of a WECS with Darrieus rotor in different windspeeds and at varying rotor speed. 4<sup>e</sup> international symposium on wind energy systems, September 21-24, 1982, Stockholm, vol. 1, paper F4.
- [5] DE BENNETOT M., COUDEVILLE H., FABRE B., Eddy current converter for vertical-axis wind turbines, EWEC proceedings, Hambourg, 22-26/10/1984, E13, p. 320.
- [6] COUDEVILLE H., FABRE B., DE BENNETOT M., Adaptation convertisseur-éolienne en vue d'un fonctionnement autonome. Séminaire International « Le comportement aérodynamique des éoliennes », Sophia-Antipolis, 28-30 avril 1986.
- [7] COUDEVILLE H., FABRE B., Système de chauffage éolien. Salon Européen des Techniques du Vent, acte n 26, Saint Malo, 17-19 juin 1987.
- [8] FABRE B., Contrôle d'une éolienne Darrieus par un convertisseur mécano-thermique à courants de Foucault, Thèse de doctorat de l'Université Pierre et Marie Curie, Paris, 4 juillet 1989.