

Zeitschrift: Bulletin technique de la Suisse romande

Band: 94 (1968)

Heft: 3

Artikel: Système anémométrique nez (suite): dimensionnement et propriétés d'un capteur digital cartésien à hélice de chemin du vent

Autor: Ravussin, P.-E.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-69622>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 30.03.2025

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

BULLETIN TECHNIQUE DE LA SUISSE ROMANDE

Paraissant tous les 15 jours

ORGANE OFFICIEL

de la Société suisse des ingénieurs et des architectes
de la Société vaudoise des ingénieurs et des architectes (SVIA)
de la Section genevoise de la SIA
de l'Association des anciens élèves de l'EPUL (Ecole polytechnique
de l'Université de Lausanne)
et des Groupes romands des anciens élèves de l'EPF (Ecole poly-
technique fédérale de Zurich)

COMITÉ DE PATRONAGE

Président: E. Martin, arch. à Genève
Vice-président: E. d'Okolski, arch. à Lausanne
Secrétaire: S. Rieben, ing. à Genève
Membres:
Fribourg: H. Gicot, ing.; M. Waeber, arch.
Genève: G. Bovet, ing.; Cl. Groscurin, arch.; J.-C. Ott, ing.
Neuchâtel: J. Béguin, arch.; M. Chevalier, ing.
Valais: G. de Kalbermatten, ing.; D. Burgener, arch.
Vaud: A. Chevalley, ing.; A. Gardel, ing.;
M. Renaud, ing.; J.-P. Vouga, arch.

CONSEIL D'ADMINISTRATION

de la Société anonyme du « Bulletin technique »
Président: D. Bonnard, ing.
Membres: Ed. Bourquin, ing.; G. Bovet, ing.; M. Bridel; M. Cosan-
dey, ing.; J. Favre, arch.; A. Rivoire, arch.; J.-P. Stucky,
ing.
Adresse: Avenue de la Gare 10, 1000 Lausanne

RÉDACTION

D. Bonnard, E. Schnitzler, S. Rieben, ingénieurs; M. Bevilacqua,
architecte
Rédaction et Editions de la S.A. du « Bulletin technique »
Tirés à part, renseignements
Avenue de Cour 27, 1000 Lausanne

ABONNEMENTS

1 an	Suisse	Fr. 46.—	Etranger	Fr. 50.—
Sociétaires	»	» 38.—	»	» 46.—
Prix du numéro	»	» 2.30	»	» 2.50

Chèques postaux: « Bulletin technique de la Suisse romande »
N° 10 - 5775, Lausanne

Adresser toutes communications concernant abonnement, vente au
numéro, changement d'adresse, expédition, etc., à: Imprimerie
La Concorde, Terreaux 29, 1000 Lausanne

ANNONCES

Tarif des annonces:
1/1 page Fr. 450.—
1/2 » » 235.—
1/4 » » 120.—
1/8 » » 62.—

Adresse: Annonces Suisses S.A.
Place Bel-Air 2. Tél. (021) 22 33 26, 1000 Lausanne et succursales



SOMMAIRE

Système anémométrique NEZ (suite), par P.-E. Ravussin, ingénieur physicien EPUL-SIA.
Degré de prévisibilité d'un système aléatoire et bases théoriques d'une prévision numérique, par François Baatard, professeur à l'EPUL.
Répartition des fonctions thermodynamiques à la sortie d'une cheminée par vents calmes, par S. Krikorian, ing. électricien EPUL.
Divers — Bibliographie — Société suisse des ingénieurs et des architectes.
Documentation générale. — Documentation du bâtiment. — Informations diverses.

SYSTÈME ANÉMOMÉTRIQUE NEZ (suite)¹

Dimensionnement et propriétés d'un capteur digital cartésien à hélice de chemin du vent

par P.-E. RAVUSSIN, ingénieur physicien EPUL-SIA²

1. Etude théorique et expérimentale

1.1 Introduction

La précision et la finesse d'une mesure physique est déterminée principalement par le capteur.

La cadence d'échantillonnage optimum d'un capteur digital sera déterminée a priori à partir des propriétés du capteur.

1.2 Chemin du vent

Nous définirons le chemin du vent x selon l'axe Ox comme l'intégrale temporelle de la projection orthogonale \dot{x} sur cet axe de la vitesse v du vent au point de mesure O :

$$x = \int_{t_1}^{t_2} \dot{x} dt$$

La digitalisation de la mesure impose de définir un chemin du vent minimum Δx correspondant à une impulsion électrique (top).

Au point de vue physique, cela n'a pas de sens de prendre $\Delta x \ll d$, où d est le \varnothing de l'hélice, car le plus

petit volume (cylindrique) d'épreuve aura un $\varnothing d$. Cependant, il faut une « fréquence » d'échantillonnage plus élevée que la fréquence limite du phénomène à observer si l'on veut conserver toute l'information.

Par analogie avec le théorème de Shannon, nous avons pris

$$\Delta x \approx \frac{d}{2} \quad \Delta x = 0,1 \text{ m}$$

Cette distance correspond à un tiers de tour d'hélice. 1 top correspond à 10 cm de chemin du vent mesuré.

1.3 Propriétés du capteur

L'énergie cinétique acquise par l'hélice est perdue par le vent.

On peut écrire:

$$\frac{1}{2} I \dot{\varphi}^2 = \frac{1}{2} M \dot{x}^2$$

¹ Voir *Bulletin technique* du 16 décembre 1967, un premier article de M. Ravussin sur le système anémométrique lui-même (Réd.).

² Exposé présenté lors du *Colloque sur la diffusion turbulente*, organisé le 22 juin 1967 à l'École polytechnique de l'Université de Lausanne.

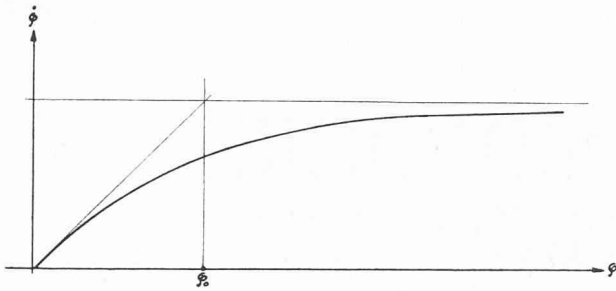


Fig. 1. — Réponse d'une hélice initialement arrêtée dans un vent de vitesse constante.

où I moment d'inertie de l'hélice
 $\dot{\phi}$ vitesse de rotation
 M masse d'air déplacée
 \dot{x} vitesse du vent

En régime stationnaire, on a :

$$\dot{\phi} = \alpha \dot{x}$$

α est déterminé par le pas de l'hélice.

$$\alpha = \frac{2\pi}{0,3} \quad \text{radian/mètre}$$

M représente la masse d'air interceptée par l'hélice. C'est donc un cylindre de longueur x_0 et de section égale à la surface du cercle balayé par l'hélice.

$$M = \rho \pi r^2 x_0$$

ρ masse spécifique de l'air

r rayon de l'hélice

On peut donc écrire :

$$\alpha^2 I = M$$

$$I = \frac{\rho \pi r^2 x_0}{\alpha^2}$$

$$x_0 = \frac{\alpha^2 I}{\rho \pi r^2}$$

x_0 représente la distance de réponse de l'hélice. Cette distance est indépendante de la vitesse du vent.

Par conséquent, le temps de réponse de l'hélice dépend de la vitesse du vent.

$$\tau = \frac{x_0}{\dot{x}}$$

On remarque que x_0 dépend de ρ , donc de la pression, de la température et de l'humidité de l'air (PTU).

Si la section de la pale de l'hélice ne dépend pas du rayon (pale de section constante mais de forme variable), on peut écrire :

$$I = \int_0^r r^2 \rho_h S(r) dr$$

où S section de la pale de l'hélice (= cte)
 ρ_h masse spécifique de l'hélice

$$I = \frac{1}{3} r^2 M_h$$

M_h masse de l'hélice = 12 g
d'où

$$x_0 = \frac{\alpha^2 M_h}{3 \pi \rho}$$

La distance de réponse est indépendante du rayon de l'hélice.

$$x_0 = \frac{12 \cdot 10^{-3} \cdot 400 \pi}{3 \cdot 9 \cdot 1,293} = 0,43 \text{ m}$$

1.4 Dynamique du mouvement de l'hélice

On peut se représenter le mouvement de l'hélice de la manière suivante.

Supposons l'hélice initialement arrêtée dans un vent à vitesse constante. La vitesse de rotation de l'hélice va croître exponentiellement par rapport à la rotation (et non pas au temps).

$$\dot{\phi}_o = \dot{\phi}_o (1 - e^{-\phi/\phi_o})$$

$$\dot{\phi}_o = \alpha \dot{x}_o$$

$$\phi_o = \alpha x_o$$

\dot{x}_o vitesse du vent

x_o distance de réponse de l'hélice

En dérivant, on obtient :

$$\phi_o \ddot{\phi} = (\dot{\phi}_o - \dot{\phi}) \dot{\phi} \quad \text{ou} \quad \dot{\phi}_o = \frac{\phi_o \ddot{\phi}}{\dot{\phi}} + \dot{\phi}$$

L'accélération de l'hélice est proportionnelle au produit de la vitesse de rotation par l'écart entre la vitesse de rotation et la vitesse de rotation finale.

$\dot{\phi}_o$ représente la valeur effective de la vitesse du vent. Nous écrivons :

$$\alpha \dot{x}' = \frac{\phi_o \ddot{\phi}}{\dot{\phi}} + \dot{\phi}$$

$$\dot{x}' = \frac{x_o \ddot{x}}{\dot{x}} + \dot{x}$$

avec : \dot{x}' vitesse du vent effective

\dot{x} vitesse du vent mesurée

\ddot{x} accélération du vent mesurée

Cette équation permet de calculer la vitesse du vent à partir des valeurs mesurées lors d'une variation brusque (turbulence).

2. Vérification expérimentale

2.1 Principe

On mesure l'accélération de l'hélice (arrêtée au préalable dans un vent de vitesse moyenne constante).

2.2 Méthode

Les impulsions du système NEZ sont envoyées sur un enregistreur graphique dont la vitesse de défilement est constante.

Pour adapter la vitesse de défilement à la fréquence des tops, ceux-ci sont préalablement enregistrés sur Ampex à vitesse maximum et lus à une vitesse huit fois plus faible.

La distance séparant deux tops sur le papier est proportionnelle au temps écoulé.

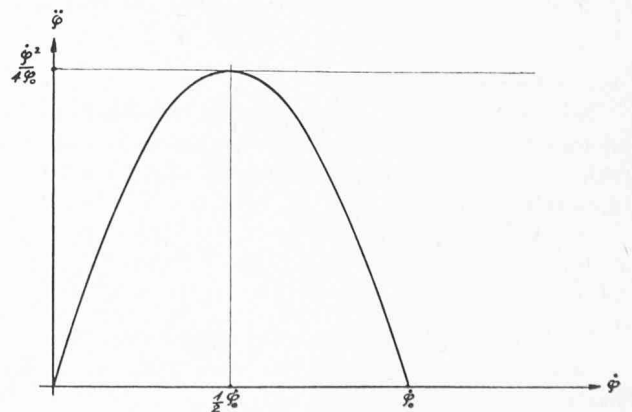


Fig. 2. — Accélération d'une hélice initialement arrêtée dans un vent de vitesse constante.

$$\Delta t = k \Delta l \quad \begin{array}{l} t \text{ temps} \\ l \text{ longueur} \end{array}$$

La vitesse de l'hélice est proportionnelle à l'inverse de cette longueur.

$$\dot{x} = \frac{\Delta x}{k \Delta l} \quad \begin{array}{l} \dot{\phi} = \alpha \dot{x} \\ \Delta x = 0,1 \text{ m} \end{array}$$

On utilise directement la vitesse apparente \dot{x} (ou mesurée) du vent à la place de la vitesse de rotation. L'accélération est égale au rapport de la différence des vitesses correspondant à trois impulsions successives par le temps moyen séparant ces impulsions.

$$\ddot{x} = \frac{2(\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n)}{\Delta t_n + \Delta t_{n+1}} \quad \Delta t_n = t_n - t_{n-1}$$

Pratiquement, nous avons opéré de la manière suivante :

L'hélice est initialement arrêtée sur une position précédant de peu l'émission d'un top. Ainsi, le premier top émis peut être considéré comme l'origine de la mesure (Top n° 0).

La distance séparant les différents tops successifs est mesurée :

$$l_1 \dots l_n \dots$$

On calcule ensuite :

$$\dot{x}_n = \frac{\Delta x}{k [l_n - l_{n-1}]} \quad [\text{m/s}]$$

Δx distance correspondant à un top

\dot{x}_n valeur moyenne de la vitesse entre deux tops mesurée à

$$\bar{t}_n = k \frac{l_{n-1} + l_n}{2}$$

puis

$$\ddot{x}_n = \frac{\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n}{t_{n+1} - t_n} = \frac{2(\dot{x}_{n+1} - \dot{x}_n)}{k(l_{n+1} - l_{n-1})} \quad [\text{m/s}^2]$$

pris au temps

$$\bar{t}_n = \frac{t_n + t_{n+1}}{2} = \frac{k}{2} (l_{n+1} + l_{n-1})$$

2.3 Dépouillement simplifié

Le graphique montre le résultat de l'application de la formule

$$\dot{x}'_n = \frac{x_0 \ddot{x}_n}{\dot{x}_n} + \dot{x}_n \quad \text{pris à } t_n$$

au lieu de

$$\dot{x}'_n = \frac{x_0 \ddot{x}_n}{\bar{\dot{x}}_n} + \bar{\dot{x}}_n \quad \text{pris à } \bar{t}_n$$

Nous avons pris :

$$x_0 = 0,43 \text{ m valeur théorique}$$

$$\alpha = \frac{20\pi}{3} \text{ radian/mètre}$$

$$k = 9,42 \cdot 10^{-3} \text{ sec/m}$$

k a été calculé après mesure de la vitesse moyenne de rotation de l'hélice au moyen d'un stroboscope et d'après la moyenne de \dot{x} prise sur les dix dernières mesures. Etant donné l'incertitude qui règne sur la valeur du glissement de l'hélice (α réel \neq α géométrique) et sur x_0 , nous pouvons considérer les appareils comme parfaits.

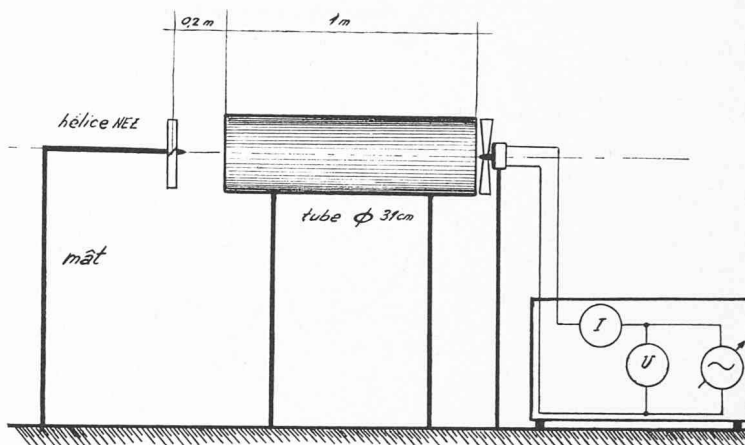


Fig. 3. — Dispositif expérimental permettant de mesurer les paramètres de l'hélice.

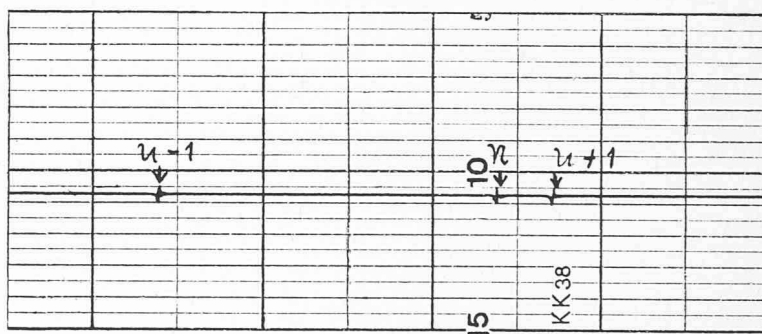


Fig. 4. — Fragment de l'enregistrement graphique.

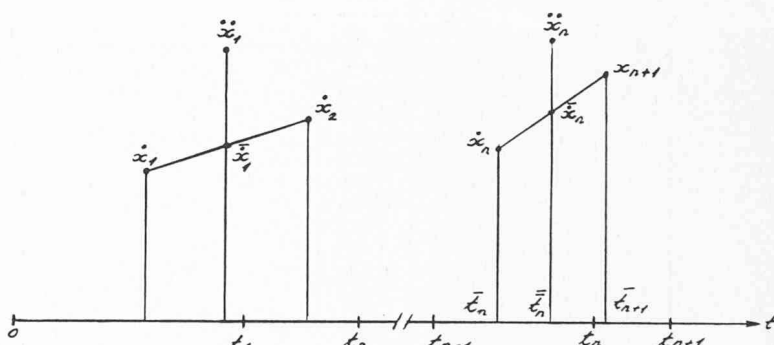


Fig. 5. — Graphique des différents paramètres : vitesse mesurée \dot{x} , accélération \ddot{x} , vitesse corrigée \dot{x}' correspondant aux différentes époques t , \bar{t} et \bar{t} .

2.4 Vérifications de la valeur de x_0

x_0 détermine l'amplitude de la correction à apporter sur la valeur lue.

La moyenne des dix premières mesures donne 0,9028 m/s au lieu de 0,8 m/s mesuré lorsque l'hélice est arrêtée.

La moyenne sur les trente-cinq premières mesures donne 0,979 m/s au lieu de 0,975 m/s mesuré au stroboscope sur la vitesse de rotation de l'hélice. Pour cette valeur, l'accord est excellent.

On remarque encore une variation périodique de la vitesse du vent de longueur d'onde de 30 cm et 60 cm. Cette valeur est égale à $\frac{1}{4}$ et $\frac{1}{2}$ de la longueur séparant l'hélice du ventilateur. On a probablement un effet de résonance.

Réponse d'une hélice NEZ

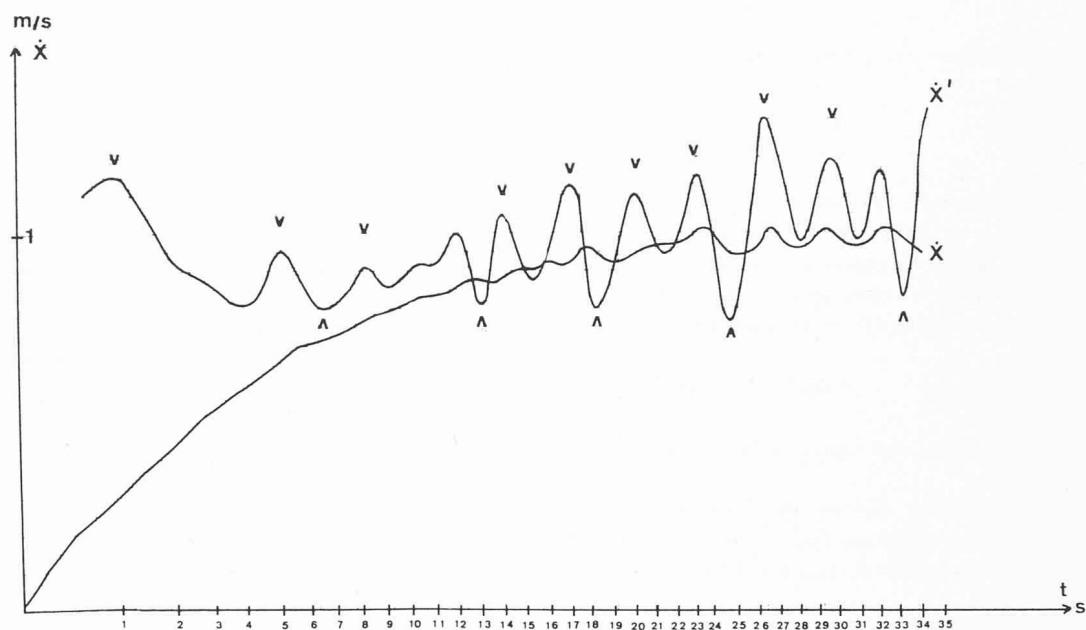


Fig. 6. — Graphique de la réponse \dot{x} et \ddot{x} d'une hélice NEZ

n	l_n	\dot{x}_n	\dot{x}'_n
1	5,50	0,193	1,166
2	8,40	0,366	0,923
3	10,55	0,493	0,851
4	12,40	0,574	0,798
5	14,10	0,624	0,960
6	15,62	0,698	0,825
7	17,08	0,727	0,814
8	18,50	0,747	0,913
9	19,85	0,786	0,866
10	21,17	0,804	0,912
11	22,45	0,829	0,916
12	23,70	0,849	1,006
13	24,90	0,884	0,795
14	26,13	0,863	1,056
15	27,30	0,907	0,877
16	28,48	0,900	0,930
17	29,65	0,907	1,142
18	30,75	0,965	0,789
19	31,90	0,923	0,923
20	33,05	0,923	1,107
21	34,15	0,965	0,965
22	35,25	0,965	0,965
23	36,35	0,965	1,167
24	37,40	1,011	0,818
25	38,50	0,965	0,788
26	39,65	0,923	1,315
27	40,70	1,011	1,204
28	41,80	0,965	0,965
29	42,90	0,965	1,167
30	43,95	1,011	1,204
31	45,05	0,965	0,965
32	46,15	0,965	1,167
33	47,20	1,011	0,818
34	48,30	0,965	1,235
35	49,38	0,900	

Fig. 7. — Tableau des mesures.

2.5 Mesures annexes

Couple de frottement.
Couple d'entraînement.

L'hélice est arrêtée au moyen d'une cale placée sur le trajet d'une pale, de telle sorte qu'une autre pale soit horizontale.

La masse M est augmentée jusqu'à ce que l'hélice se mette à tourner.

Sachant que le couple est proportionnel au carré de la vitesse (loi analogue à la portance d'une aile), on doit avoir :

$$\frac{M}{\dot{x}_m^2} = \text{cte}$$

On obtient :

\dot{x}_m (m/s)	M (g)	M/\dot{x}_m^2
0,8	0,310	0,485
1,1	0,610	0,504
2,15	2,090	0,452
3,2	4,59	0,448

ce qui laisse croire que les valeurs de 0,8 et 1,1 m/s sont trop basses ; valeurs corrigées 0,83 m/s et 1,16 m/s. Nous pouvons en conclure que la valeur de x_0 est

légèrement trop élevée de $\frac{0,9 - 0,83}{0,83} = 8,45\%$,

d'où $x_0 = 0,4$ m

Notons encore que le fait de prendre la formule simplifiée revient à sous-estimer la correction, donc à sur-estimer x_0 .

Nous n'avons pas tenu compte de l'influence de P , T et U sur la valeur de ρ .

$$\rho = \rho(P, T, U)$$

2.6 Seuil du capteur

Extrapolons la vitesse de rotation correspondant à un couple égal au couple de frottement :

$$\frac{M}{\dot{x}^2} = 0,45 \quad \text{pour} \quad M = 0,01 \text{ g}$$

$$\dot{x}_s = 0,15 \text{ m/s}$$

2.7 Conclusion

L'emploi d'un petit ordinateur est indispensable lorsqu'on désire utiliser sans perte de temps toutes les possibilités de finesse du système NEZ.

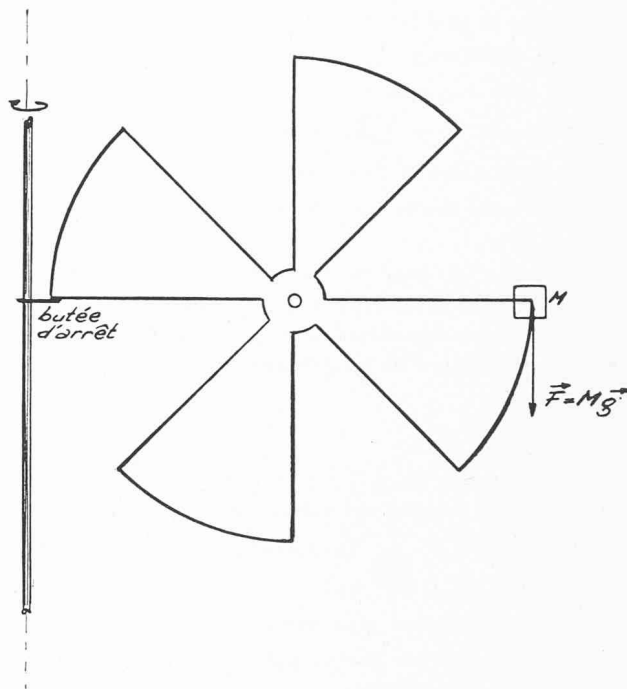


Fig. 8. — Dispositif utilisé pour la mesure du couple d'entraînement et du couple de frottement.

DEGRÉ DE PRÉVISIBILITÉ D'UN SYSTÈME ALÉATOIRE ET BASES THÉORIQUES D'UNE PRÉVISION NUMÉRIQUE *

par FRANÇOIS BAATARD, professeur à l'EPUL

Dans l'*Essai d'une axiomatique aléatoire*, Georges Dedeant a développé mathématiquement les éléments qui permettent la prévision numérique d'un événement aléatoire : vent, pression barométrique, trajectoires d'un groupe de particules d'un fluide turbulent, etc., c'est-à-dire de tout phénomène siège d'une *diffusion turbulente*.

L'Essai précité développe la structure mathématique de la *mécanique aléatoire* de Dedeant et Wehrlé.

Dedeant prouve l'*identité des nombres aléatoires et des vecteurs de l'espace de Hilbert* et leur axiomatique commune.

Rappelons qu'une fonction aléatoire $X(t)$ est décomposable en :

1. Une *fonction certaine*, au sens de l'analyse classique.
2. Une *fonction aléatoire à dépendance stochastique* (ou de probabilité) et traduite pratiquement par la corrélation.
3. Une *fonction aléatoire indépendante en probabilité* et donnant les fluctuations du système.

L'indice de connexion est un indice pratique qui fixe le *degré de prévisibilité* d'un système aléatoire en fonction des données disponibles ; il est lié à la nature de la continuité de la fonction aléatoire décrivant le phénomène.

1. Enoncé et solution du problème de la prévision.

a) Enoncé

Les *données*, c'est-à-dire les résultats des mesures, par exemple du vecteur vitesse vent, sont des vecteurs \vec{X}_i situés dans le *plan du « passé »* ; il en faut tirer la pré-

sion d'une valeur future, qui est un vecteur spatial \vec{X} inconnu décomposable en

1° un vecteur coplanaire aux \vec{X}_i c'est-à-dire :

$$\vec{X} \text{ passé} = \sum_1^n a_i \vec{X}_i, \text{ connu par combinaison linéaire}$$

des \vec{X}_i ;

2° un vecteur inconnu, purement aléatoire \vec{X}'_f , orthogonal à la variété précédente, donc au plan du passé, et qui est le *vecteur futur*, aléatoire au sens mathématique du terme.

Ainsi :

$$\vec{X} \text{ inconnu} = \vec{X} \text{ passé} + \vec{X}'_f \text{ futur} \quad (1)$$

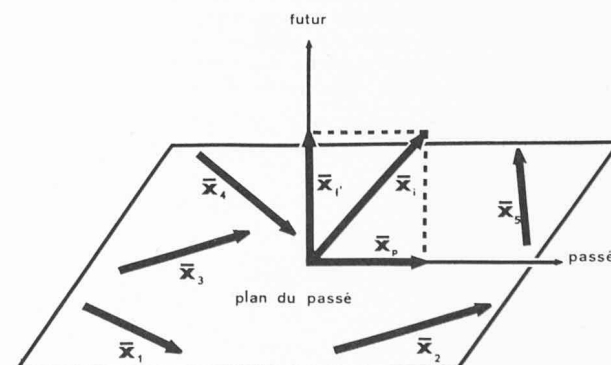


Fig. 1

* Nous avons basé cet exposé sur les travaux de Dedeant et Wehrlé ainsi que sur une correspondance personnelle avec ces deux auteurs.