

<b>Zeitschrift:</b>	Bulletin technique de la Suisse romande
<b>Band:</b>	93 (1967)
<b>Heft:</b>	25
<b>Artikel:</b>	Conceptions récentes dans la mesure des écoulements atmosphériques
<b>Autor:</b>	Junod, A.
<b>DOI:</b>	<a href="https://doi.org/10.5169/seals-69098">https://doi.org/10.5169/seals-69098</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:** 27.01.2026

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

# CONCEPTIONS RÉCENTES DANS LA MESURE DES ÉCOULEMENTS ATMOSPHÉRIQUES

par A. JUNOD, Institut suisse de météorologie, Payerne

## 1. Introduction

Les écoulements de l'atmosphère, connus sous le nom de *vents*, correspondent aux mouvements turbulents d'un fluide réel — le mélange de gaz appelé air — autour d'une sphère rugueuse, la terre. Le but de cet article n'est pas de discuter les causes des mouvements atmosphériques, ni d'étudier leurs répercussions sur le phénomène « temps », mais plutôt de revoir d'un œil critique quelques notions fondamentales qui interviennent dans la mesure des écoulements fluides en pensant à des applications telles que l'évaluation du transport et de la diffusion de polluants dans l'atmosphère.

La notion d'*échelle* est essentielle dans la compréhension des écoulements atmosphériques puisque les échanges d'énergie, de quantité de mouvement, de matière en suspension sont conditionnés, dans les mouvements turbulents, par les dimensions des cellules turbulentes et leur évolution. Les considérations qui suivent se réfèrent aux échelles dites méso- et micrométéorologiques qui couvrent la gamme spatiale allant d'environ 10 km à 0,1 m et le domaine temporel correspondant d'environ 1 jour à 1 sec (rapport des extrêmes 10<sup>5</sup>).

Du point de vue instrumental, le système de mesure mis en œuvre doit comporter des capteurs assez sensibles pour transcrire avec la précision requise les mouvements relatifs aux échelles les plus fines, et de plus, une répartition spatiale des capteurs et un mode de traitement des données prévus de telle sorte que les échelles les plus grandes soient prises en considération.

## 2. Modes de description des écoulements atmosphériques

Comme en mécanique des fluides classique, on peut décrire le mouvement de l'air atmosphérique au moyen des *variables de Lagrange* ou de celles d'*Euler*. Dans le premier cas, il s'agit de suivre, dans leur mouvement, les divers éléments du fluide qui s'écoule et de décrire les propriétés mécaniques individuelles de ces éléments. Dans le domaine spatio-temporel considéré ici, les éléments ou *particules* sont constitués par certains volumes d'air des dimensions indiquées, que l'on isole par la pensée à un moment donné et dont on étudie le mouvement identifié à celui de leur centre géométrique. Il faut se souvenir que, dans un fluide en mouvement turbulent, de telles particules sont soumises à une diffusion interne et perdent progressivement leur identité géométrique, ce qui n'empêche pas, par la pensée tout au moins, de suivre indéfiniment le mouvement de leur centre géométrique.

Soit ainsi  $P$  la position d'une telle particule, repérée par son rayon-vecteur  $\vec{OP} = \vec{r}$ . Si l'on connaît  $\vec{OP}$  pour chaque particule et à tout instant, la fonction vectorielle

$$\vec{r} = \vec{r}(P; t) \quad (2,1)$$

décrit complètement le mouvement du fluide à l'échelle initiale et aux échelles supérieures. Pour une particule déterminée,  $\vec{r} = \vec{r}(P_o; t)$  donne la trajectoire du centre dont la vitesse au temps  $t$  vaut

$$\vec{V}(P_o; t) = \frac{\partial \vec{r}(P_o; t)}{\partial t}, \quad (2,2)$$

exprimée au moyen des variables de Lagrange ( $P_o; t$ ).

Un exemple pratique de ce mode d'étude des écoulements atmosphériques est fourni par le sondage ~ horizontal (multiple) du vent : on lâche à un moment et d'un endroit donnés, un (ou plusieurs) ballon(s) à son (leur) altitude d'équilibre et l'on relève les positions successives par télémétrie optique ou radioélectrique. L'équation (2,2) est alors applicable, si l'on admet que le (chaque) ballon décrit la même trajectoire que la particule d'air qui l'englobe. Comme l'ont montré Angell et Pack [1], la variance des écarts entre les positions d'une paire de ballons est une mesure de la diffusion pour les particules d'air de dimensions comparables. Les expériences en principe analogues où l'on marque un certain volume d'air par un traceur réparti (radioactif, fluorescent, fumigène) ne permettent pas en général une exploitation directe des résultats en variables de Lagrange, car les mesures sont faites en des points fixes sous le vent de la source, souvent sous forme de mesures de concentration. Il faut alors qu'un modèle adéquat de diffusion turbulente soit introduit si l'on veut retrouver le mouvement même des particules fluides par  $\vec{r}(P; t)$  et ses dérivées.

Bien que théoriquement très attractif, le traitement du mouvement en variables de Lagrange se prête mal à une expérimentation intensive, car la poursuite simultanée d'un grand nombre de particules traçantes se heurte à des difficultés techniques plus élevées que l'acquisition de données à l'aide d'un nombre équivalent de capteurs fixes. C'est donc surtout pour des raisons de commodité que les capteurs eulériens connaissent un développement relativement aussi important. Dans le mode de description d'*Euler*, on considère l'espace fixe dans lequel se meut le fluide et on imagine qu'à l'instant  $t$ , on connaisse en chaque point  $P$  de l'espace la vitesse de la particule qui y passe.  $\vec{V}(P; t)$  et ses composantes constituent les variables d'*Euler*. Pour mieux saisir les différences avec le mode de description de Lagrange, exprimons, en variables d'*Euler*, la dérivée par rapport au temps, le long d'une trajectoire, d'un champ vectoriel ou scalaire lié à une particule, de la vitesse par exemple :

$$\vec{a} = \frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V} \nabla) \vec{V}. \quad (2,3)$$

Cette expression montre que la dérivée totale par rapport au temps se compose d'une dérivée partielle

au point choisi de l'espace, plus un taux de variation le long de la trajectoire.

Pour rendre les mouvements atmosphériques accessibles aux calculs pratiques, il faut formuler certaines hypothèses simplificatrices comme des conditions d'invariance étendues à un certain domaine : homogénéité, isotropie ou stationnarité de l'écoulement turbulent. De plus, le traitement des problèmes fondamentaux se trouve notamment simplifié lorsqu'une relation définie existe entre certaines propriétés statistiques de la partie fluctuante (turbulente) du mouvement, telles que les fonctions d'autocorrélation et de corrélation spatiale.

### 3. La notion de vitesse du vent

Pour comprendre le mode de fonctionnement des divers capteurs de vent et le genre de données qu'ils fournissent, il n'est pas superflu de revenir sur la notion élémentaire de vitesse du vent, sur ses propriétés et les conséquences qui en découlent.

Soit  $\vec{V}(t)$  le vecteur-vitesse de l'écoulement atmosphérique en un point donné. Par rapport à un système d'axes cartésiens centré en ce point,  $\vec{V}(t)$  peut être décrit de trois manières (fig. 1) :

par ses trois composantes cartésiennes :

$$\vec{V}(V_x, V_y, V_z),$$

par ses trois composantes polaires :

$$\vec{V}(V, \theta, \phi),$$

par ses trois composantes planaires :

$$\vec{V}(\vec{V}_{xy}, \vec{V}_{yz}, \vec{V}_{zx}), \text{ projections du vecteur-vitesse sur les plans } 0xy, 0yz, 0zx.$$

On a les relations suivantes :

$$V = \sqrt{V_x^2 + V_y^2 + V_z^2} \\ V_x = V \cos \phi \cos \theta; V_y = V \cos \phi \sin \theta; V_z = V \sin \phi \quad (3,1)$$

$$V_{xy} = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}; V_{yz} = \sqrt{V_y^2 + V_z^2}; V_{zx} = \sqrt{V_x^2 + V_z^2} \quad (3,2)$$

$$V = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_{xy}^2 + V_{yz}^2 + V_{zx}^2} \quad (3,3)$$

$$V_x = V_{xy} \cos \theta; V_y = V_{xy} \sin \theta; V_z = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{V_{xy}^2 + V_{yz}^2 + V_{zx}^2} \sin \phi \quad (3,3)$$

Etant des intensités de vecteurs, les quantités  $V_{xy}$ ,  $V_{yz}$  et  $V_{zx}$  sont essentiellement positives. En météorologie, on donne traditionnellement les quantités  $V_{xy}$  = « vitesse (horizontale) du vent » et  $\theta^*$  = « direction du vent » comptée dans le sens des aiguilles d'une montre à partir d'un axe  $0x$  orienté vers le sud. Ainsi un vent d'est, dont le vecteur représentatif pointe vers l'ouest, à une direction de  $90^\circ$ .

Le traitement statistique des données de vent fait intervenir les moments statistiques des divers ordres de la vitesse et en premier lieu le *vecteur-vitesse moyen*

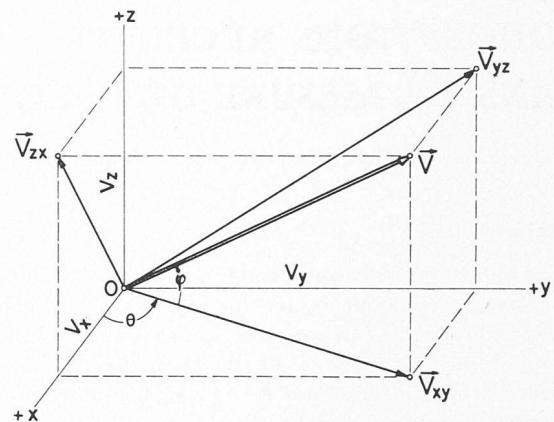


Fig. 1. — Représentation du vecteur-vitesse.

pendant l'intervalle de temps  $(t_1, t_2)$ . On a par définition :

$$\bar{\vec{V}} = \frac{1}{t_2 - t_1} \sum_{i=1}^n \vec{V}_i \delta t = \frac{1}{n} \sum \vec{V}_i, \quad (3,4)$$

si l'on découpe l'intervalle  $(t_1, t_2)$  en  $n$  tronçons élémentaires  $\delta t$  tels que  $t_2 - t_1 = n \delta t$ . Par exemple,  $\delta t$  sera le temps d'égalisation (averaging time) du capteur de vent et  $t_2 - t_1$  la période d'échantillonnage (sampling time) (Junod [2]).

Il découle du théorème des projections que

$\bar{\vec{V}}(\bar{V}_x, \bar{V}_y, \bar{V}_z)$  est donné par

$$\bar{V}_x = \frac{1}{n} \sum V_{x,i}; \bar{V}_y = \frac{1}{n} \sum V_{y,i}; \bar{V}_z = \frac{1}{n} \sum V_{z,i}. \quad (3,5)$$

Si l'on veut obtenir le vecteur-vitesse moyen  $\bar{\vec{V}}$  à l'aide de ses composantes polaires  $(V', \theta', \phi')$  ou planaires  $(V'_{xy}, V'_{yz}, V'_{zx})$ , il faut noter que, à cause des relations (3,1) à (3,4) :

$$V' = \sqrt{\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2 + \bar{V}_z^2} < \bar{V} = \frac{1}{n} \sum V_i, \quad (3,6)$$

$$V'_{xy} = \sqrt{\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2} < \bar{V}_{xy} = \frac{1}{n} \sum V_{xy,i}; \quad (3,7)$$

$$V'_{yz} < \bar{V}_{yz}; V'_{zx} < \bar{V}_{zx}$$

$$\cos \theta' = \frac{\bar{V}_x}{V'_{xy}} \neq \cos \bar{\theta} = \cos \left( \frac{1}{n} \sum \theta_i \right); \quad (3,8)$$

$$\sin \phi' = \frac{\bar{V}_z}{V'_{xy}} \neq \sin \bar{\phi}' = \sin \left( \frac{1}{n} \sum \phi_i \right).$$

En d'autres termes, le seul moyen de former le vecteur-vitesse moyen et ses composantes est d'effectuer d'abord les moyennes de ses composantes cartésiennes. Pourtant, dans la pratique météorologique, il est encore courant que l'on confonde  $V'_{xy}$  et  $\bar{V}_{xy}$ ,  $\theta'$  et  $\bar{\theta}$ , commettant ainsi des erreurs systématiques déjà signalées par MacCready [3] sous le nom de « data processing errors ».

#### 4. Applications

##### 4.1 Vitesses moyennes et turbulence

Supposons que, pendant la période d'échantillonnage, on choisisse un axe  $0x$  coïncidant avec la direction de la projection de  $\vec{V}$  sur le plan horizontal. Alors  $V'_{xy} = \bar{V}_x$ . Bernstein [4] a montré que l'écart-type de la direction  $\sigma_\theta$  est lié de façon simple aux grandeurs  $\bar{V}_x$  et  $\bar{V}_{xy}$  :

$$\frac{\bar{V}_x}{\bar{V}_{xy}} = e^{-\frac{1}{2}\sigma_\theta^2}, \quad (4.1,1)$$

lorsqu'on admet d'une part qu'il n'existe aucune corrélation entre vitesse horizontale et direction du vent, d'autre part que la répartition des directions  $\theta$  est gaussienne, hypothèses largement vérifiées par l'expérience.

Or  $\sigma_\theta$ , qui est une mesure de la composante latérale de la turbulence de l'écoulement, intervient dans le modèle de diffusion de Hay et Pasquill (Pasquill [5]), fréquemment utilisé dans les calculs de concentration de polluants sous le vent d'une source. L'équation (4.1,1) permet d'évaluer expérimentalement un moment statistique du 2<sup>e</sup> ordre ( $\sigma_\theta^2$ ) à l'aide de deux moments du 1<sup>er</sup> ordre d'obtention facile.

##### 4.2 Vitesses moyennes et dilution de polluants

Dans les modèles mathématiques de la diffusion turbulente, la concentration de polluants sous le vent de sources ponctuelles, linéaires ou superficielles est donnée par des formules (les plus célèbres sont celles de Sutton)

où intervient le facteur  $\frac{1}{u}$ , inverse d'une certaine

vitesse moyenne du vent. Nous appuyant sur les résultats de la section 3, nous allons déterminer de quelle vitesse moyenne il s'agit. La forme même des formules de diffusion évoquées indique que la dilution progressive des polluants procède de deux effets séparables qui se multiplient : un étirement longitudinal du volume de polluants par le courant moyen qui l'entraîne à la sortie de la cheminée, et une expansion dans toutes les directions due à la diffusion turbulente (la diffusion moléculaire étant négligeable).

Ayant admis cette séparation des effets, nous préciserons la grandeur essentielle intervenant dans le premier à l'aide de l'exemple simple d'écoulements plans stationnaires (fig. 2).

On suppose que les polluants sont émis par bouffées régulièrement espacées dans le temps d'une source linéaire indéfinie. Dans les trois cas A, B et C, la vitesse est constante en intensité ; elle varie périodiquement de direction en B et C, si bien que le front de l'écoulement se propage à des vitesses se trouvant dans les rapports 4 : 2 : 1 en A, B et C. Introduisant un système d'axes cartésiens quelconques  $Oxy$  dans le plan de l'écoulement, on a donc :

$$\bar{V}_{xy}(A) = \bar{V}_{xy}(B) = \bar{V}_{xy}(C), \quad (4.2,1)$$

$$\text{mais } V'_{xy}(A) = 2V'_{xy}(B) = 4V'_{xy}(C). \quad (4.2,2)$$

Quant à la concentration  $s$  de polluants, la figure 2 montre clairement que :

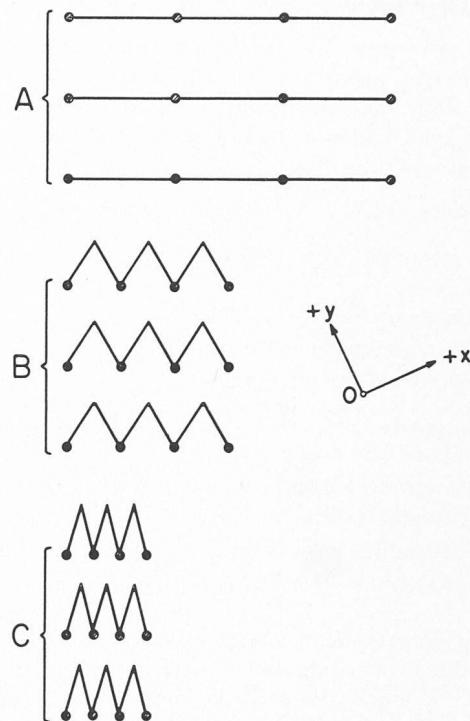


Fig. 2. — Dilution de polluants sans diffusion.

$$s(A) = \frac{1}{2}s(B) = \frac{1}{4}s(C), \quad (4.2,3)$$

et donc, en général :

$$s \approx \frac{1}{V'_{xy}} = \frac{1}{\sqrt{\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2}} \quad (4.2,4)$$

C'est l'intensité du vecteur-vitesse moyen de l'écoulement qui intervient dans la dilution sans diffusion des polluants ; il convient donc d'identifier le  $\bar{u}$  des formules de diffusion à  $V'_{xy}$  pour un écoulement en moyenne horizontal.

##### 4.3 Vitesses moyennes et distance de transport

Dans les problèmes de transport et diffusion de polluants par l'atmosphère — et particulièrement lorsqu'il s'agit de débris radioactifs — on cherche à déterminer certaines distances de transport définies comme la distance atteinte par le front du vent passant sur la source au temps  $t_1$  après un intervalle  $t_2 - t_1$  au cours duquel le champ vectoriel du vent a gardé une certaine homogénéité. Il résulte des considérations précédentes, en particulier de la figure 2, que la meilleure approximation possible de cette distance partant d'un point de la trajectoire s'écrit :

$$L_{t_2-t_1} = (t_2 - t_1) V'_{xy} = (t_2 - t_1) \sqrt{\bar{V}_x^2 + \bar{V}_y^2}, \quad (4.3,1)$$

lorsqu'on suppose que l'écoulement est resté quasi horizontal.

## 5. Une classification des capteurs de vent

Nous avons vu, dans les sections précédentes, le rôle privilégié que jouent les composantes cartésiennes du vecteur vent. Ce fait nous conduit à classer les capteurs de vent (anémomètres) en deux catégories suivant qu'ils mesurent directement ou pas les composantes cartésiennes ( $V_x$ ,  $V_y$ ,  $V_z$ ) du vecteur vent  $\vec{V}$ .

A la première catégorie — *capteurs cartésiens* — appartiennent :

- les anémomètres à hélice ;
- les anémomètres à traînée ;
- les anémomètres soniques.

A la seconde catégorie — *capteurs non cartésiens* — se rattachent :

- les girouettes uni ou bidirectionnelles (capteurs angulaires) ;
- les moulinets à cupules                           } capteurs  
les anémomètres à fil ou film chaud           } planaires.

Actuellement encore, la combinaison la plus usitée en météorologie comporte une girouette ( $\rightarrow \theta^*$ ) et un moulinet à cupules ( $\rightarrow V_{xy}$ ). Comme nous l'avons vu, il n'est pas possible de trouver les composantes du vecteur vent moyen en formant séparément des moyennes sur les données fournies par ces dispositifs. Il faudrait, à chaque instant, reconstituer les composantes cartésiennes  $V_x = V_{xy} \cos \theta$  et  $V_y = V_{xy} \sin \theta$ , puis sommer. Le détour entraînerait une quantité de travail considérable et une notable imprécision. Un procédé usuel, bien qu'en principe condamnable, consiste à former  $\bar{V}_{xy}$  et à lui adjoindre la dominante de  $\theta^*$  pendant l'intervalle de temps considéré. Il en résulte toujours une surestimation de  $V'_{xy}$  qui peut atteindre plu-

sieurs dizaines de pour-cent en cas de vents faibles et variables. Cette surestimation est particulièrement mal-venue dans les calculs de concentrations et de doses de polluants, car elle conduit toujours à une sous-estimation des risques réels.

Ces faits nous ont amené à entreprendre le développement d'un système anémométrique purement cartésien et digital, en vue d'un traitement statistique aussi aisément que possible des données pertinentes du vent qui interviennent dans les études pratiques de diffusion turbulente. Le champ d'application du système n'est d'ailleurs nullement limité à cette utilisation. Le choix s'est porté sur des capteurs à hélice, plus simples à mettre en œuvre que les dispositifs soniques et qui présentent l'avantage, sur les anémomètres à traînée, de posséder une réponse pratiquement linéaire à la vitesse coaxiale. Le système NEZ, qui résulte de ce développement, est décrit par P.-E. Ravussin dans un article paru récemment dans ce Bulletin. Nos travaux ont bénéficié de l'appui financier de la Commission fédérale de l'hygiène de l'air d'une part, des six industries chimiques bâloises CIBA, Durand & Huguenin, F. Hoffman-La Roche & Co., J. R. Geigy, Lonza et Sandoz d'autre part.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. K. ANGELL et D. H. PACK : Atmospheric lateral diffusion estimates from tetroons. *J. Appl. Met.* 4, 418-425, 1965.
- [2] A. JUNOD : Influence du relief sur le spectre de la turbulence atmosphérique ; approche expérimentale. Actes SHSN, 82-84, 1965.
- [3] P. B. MACREADY Jr. : Mean wind speed measurements in turbulence. *J. Appl. Met.* 5, 219-225, 1966.
- [4] A. B. BERNSTEIN : An examination of three wind profile hypotheses. *J. Appl. Met.* 5, 217-219, 1966.
- [5] F. PASQUILL : *Atmospheric Diffusion*, 297 p. Van Nostrand, London, 1962

# SYSTÈME ANÉMOMÉTRIQUE NEZ

par P. E. RAVUSSIN, ingénieur physicien EPUL-SIA<sup>1</sup>

## 1. Introduction

Le système anémométrique NEZ à axes cartésiens est destiné à la mesure instantanée du vecteur vent dont la connaissance des variations a une importance primordiale dans l'étude des phénomènes de diffusion. Il permet l'étude de la turbulence qui joue un rôle important dans les problèmes de pollution de l'air ainsi que dans certaines constructions (ponts, tours, téléphériques). Ce système présente également des avantages certains pour les questions de sécurité aéronautique. Des dispositifs additionnels permettent d'obtenir les moyennes vraies ou les moyennes flottantes. Le système NEZ est particulièrement utile pour la mesure des vents faibles et variables.

## 2. Le capteur codeur NEZ

### 2.1 Le capteur

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

du système NEZ se composent de trois hélices montées à l'extrémité de trois bras perpendiculaires qui sont interchangeables. (Fig. 1.)

La réponse de chaque hélice est quasi cosinusoidale par rapport à l'angle que fait le vent avec l'axe de l'hélice.

Chaque hélice mesure donc une des composantes cartésiennes du vecteur vent. Les bras peuvent être orientés respectivement vers le nord (N), vers l'est (E) et verticalement (Z). Ils peuvent être aussi placés respectivement parallèle et perpendiculaire à une piste d'aviation, ce qui permet de mesurer directement la composante longitudinale et latérale du vent sur la piste. La composante verticale est utile pour l'atterrissement des avions.

Les bras ont un diamètre de 20 mm et une longueur de 400 mm. Une partie de l'électronique est logée à

<sup>1</sup> Exposé présenté lors du Colloque sur la diffusion turbulente, organisé le 22 juin 1967 à l'Ecole polytechnique de l'Université de Lausanne.