

# La mesure du vent

Autor(en): **Ravussin, Pierre**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Bulletin technique de la Suisse romande**

Band (Jahr): **101 (1975)**

Heft 17

PDF erstellt am: **21.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-72570>

## **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.

# La mesure du vent

par PIERRE RAVUSSIN, Lausanne

## I. Introduction

La notion de *vent* est connue de tout le monde. Sa *force* et sa *direction* sont des concepts que l'on ressent de façon plus ou moins empirique (échelle Beaufort, tableau I).

Des besoins nouveaux — calcul de la diffusion d'un polluant à partir de la source, atterrissage d'avion par mauvais temps (3<sup>e</sup> catégorie), effet du vent sur un bâtiment, etc. — nécessitent une définition physique précise du vent ainsi qu'un système de mesure approprié.

### 1. Le vent (définition)

Le vent est le déplacement des masses d'air à la surface du globe.

La description du fluide en mouvement peut être envisagée de plusieurs manières différentes.

#### a) La description de Lagrange

Elle consiste à diviser l'espace, en un instant donné, en un très grand nombre d'éléments de volume et de suivre dans l'espace et dans le temps la trajectoire des particules de fluide qui y étaient enfermées (fig. 1).

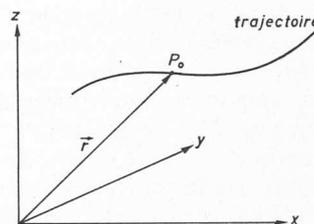


Fig. 1. — Description de Lagrange.

La trajectoire de la particule qui se trouvait au temps  $t$  au point  $P_0$  est représentée par l'équation vectorielle :

$$\vec{r} = \vec{r}(t, P_0)$$

ou

$$\begin{cases} x = x(t, a, b, c) \\ y = y(t, a, b, c) \\ z = z(t, a, b, c) \end{cases}$$

avec  $\vec{r} = \vec{r}(x, y, z)$   $x, y, z$  composantes du vecteur  $\vec{r}$   
 $P_0 = P_0(a, b, c)$   $a, b, c$  coordonnées du point  $P_0$

Tableau I — Echelle de Beaufort

Chiffre Beaufort	Terme descriptif	Vitesse du vent à 10 m de hauteur		Spécifications au large
		Nœuds	km/h	
0	Calme	1	1	La mer est comme un miroir.
1	Très légère brise	1-3	1-5	Il se forme des rides ressemblant à des écailles de poisson, mais sans aucune écume.
2	Légère brise	4-6	6-11	Vaguelettes, courtes encore, mais plus accusées. Leur crête a une apparence vitreuse, mais elles ne déferlent pas.
3	Petite brise	7-10	12-19	Très petites vagues. Les crêtes commencent à déferler. Ecume d'aspect vitreux. Parfois quelques moutons épars.
4	Jolie brise	11-16	20-28	Petites vagues devenant plus longues, moutons franchement nombreux.
5	Bonne brise	17-21	29-38	Vagues modérées prenant une forme plus nettement allongée. Naissance de nombreux moutons (éventuellement des embruns).
6	Vent frais	22-27	39-49	Des lames commencent à se former. Les crêtes d'écume blanche sont partout plus étendues. (Habituellement quelques embruns.)
7	Grand frais	28-33	50-61	La mer grossit. L'écume blanche qui provient des lames déferlantes commence à être soufflée en traînées qui s'orientent dans le lit du vent.
8	Coup de vent	34-40	62-74	Lames de hauteur moyenne et plus allongées. Du bord supérieur de leur crête commencent à se détacher des tourbillons d'embruns. L'écume est soufflée en très nettes traînées orientées dans le lit du vent.
9	Fort coup de vent	41-47	75-88	Grosses lames. Epaisse traînée d'écume dans le lit du vent. La crête des lames commence à vaciller, s'écrouler et déferler en rouleaux. Les embruns peuvent réduire la visibilité.
10	Tempête	48-55	89-102	Très grosses lames à longues crêtes en panache. L'écume produite s'agglomère en larges bancs et est soufflée dans le lit du vent en épaisses traînées blanches. Dans son ensemble, la surface des eaux semble blanche. Le déferlement en rouleaux devient intense et brutal. La visibilité est réduite.
11	Violente tempête	56-63	103-117	Lames exceptionnellement hautes (les navires de petit et de moyen tonnage peuvent, par instant, être perdus de vue). La mer est complètement recouverte de bancs d'écume blanche élongés dans la direction du vent. Partout, le bord de la crête des lames est soufflé et donne de la mousse. La visibilité est réduite.
12	Ouragan	64 et plus	118 et plus	L'air est plein d'écume et d'embruns. La mer est entièrement blanche du fait des bancs d'écume dérivante. La visibilité est très fortement réduite.

Dans cette description, on représente le fluide comme un ensemble de points matériels.

b) Point de vue de la mécanique aléatoire

La méthode souffre d'un défaut : on ne peut pas prendre des éléments de volume aussi petit que l'on veut, car dans les conditions normales, le fluide est composé de molécules ou d'atomes dont le volume propre est très petit par rapport à l'espace qu'ils occupent. Ce rapport est d'environ  $1,6 \cdot 10^{-4}$  pour l'air à  $0^\circ\text{C}$  et 1 atm de pression.

De plus, chaque molécule a un mouvement propre très désordonné (mouvement brownien) et une vitesse propre très grande par rapport au mouvement d'ensemble du fluide  $\sim 461$  m/s pour  $\text{O}_2$  à 1 atm et  $0^\circ\text{C}$ .

On est donc obligé de prendre un élément de volume de dimension finie, tel que le nombre de molécules contenu soit très grand. Mais alors ce volume d'épreuve<sup>1</sup> non seulement se déforme sur la trajectoire (fig. 2), mais encore diffuse : les molécules de ce volume se mélangent avec les molécules des volumes d'épreuves adjacents (fig. 3).



Fig. 2. — Déformation du volume d'épreuve.

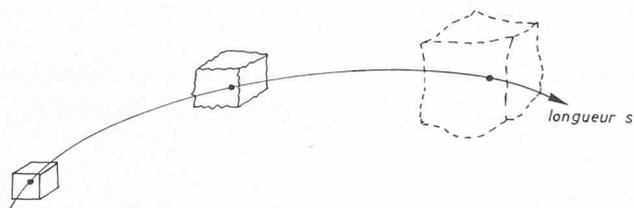


Fig. 3. — Diffusion du volume d'épreuve.

Toutefois on peut conserver le point de vue Lagrangien en définissant la trajectoire du centre d'inertie des molécules contenues dans le volume d'épreuve initial. C'est le point de vue de la mécanique aléatoire<sup>2</sup>.

L'équation  $\vec{r}(P_0, t)$  représente alors la trajectoire du centre d'inertie d'une particule aléatoire.

Le projet Eole permet de faire l'étude lagrangienne des courants en haute altitude : il consiste à suivre au moyen de satellites la position d'un certain nombre de ballons libres voyageant à altitude constante.

c) La description d'Euler

On considère en chaque point fixe  $P$  de l'espace la vitesse et la direction des particules de fluides qui y passent. On définit donc le champ vectoriel des vitesses (fig. 4).

Là aussi on est obligé d'utiliser un élément de volume fini autour du point  $P$ , sinon on aurait une fonction discontinue lors de chaque passage d'une molécule au point  $P$ .

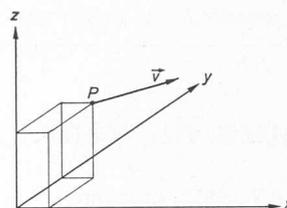
Une meilleure description consiste à rattacher à chaque point  $P$  une fonction aléatoire au sens de la théorie de la prévisibilité de la mécanique aléatoire.

On peut au sens classique définir pour chaque instant une ligne de courant qui est la courbe passant par  $P$  et tangente en chacun de ses points aux vecteurs du champ vectoriel (fig. 5).

(Il faut pour cela que le champ vectoriel soit suffisamment cohérent<sup>1</sup>. On définit aussi le chemin du vent qui est l'intégrale du vecteur vitesse au point  $P$  (fig. 6).

<sup>1</sup> Théorie de la prévisibilité, publication EPFL n° 134.

<sup>2</sup> Structure générale d'une Mécanique de la diffusion. Thèse par F. BAATARD, Multioffice 1963.



$$\vec{v} = \vec{v}(t, P) \text{ ou}$$

$$\begin{cases} u = u(x, y, z, t) \\ v = v(x, y, z, t) \\ w = w(x, y, z, t) \end{cases}$$

$$\vec{v} = \vec{v}(u, v, w); u, v, w \text{ composantes du vecteur } \vec{v} \text{ au temps } t$$

Fig. 4. — Description d'Euler.

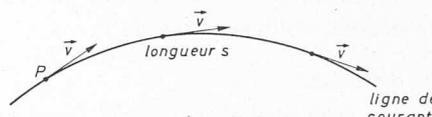


Fig. 5. — Ligne de courant.

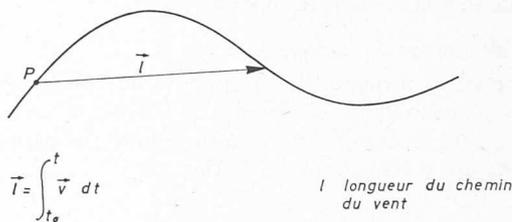


Fig. 6. — Chemin du vent.

d) Remarque

Il n'existe pas de relation biunivoque générale exacte entre la description lagrangienne aléatoire et la description eulérienne aléatoire, du fait de la diffusion. En effet, la vitesse en un point  $P$  de l'espace est la résultante, non seulement des trajectoires passant successivement en ce point  $P$  au cours du temps (point de vue classique), mais aussi partiellement des trajectoires voisines du point  $P$ .

Au sens aléatoire, on prendra la moyenne spatio-temporelle des vitesses de toutes les molécules du volume d'épreuve.

En général, les trois courbes : trajectoire, ligne de courant et chemin du vent ne sont pas confondues.

Dans le cas d'un fluide non diffusant, si le mouvement du fluide est permanent, c'est-à-dire si le champ de vecteurs vitesses ne varie pas au cours du temps, alors la famille des lignes de courant est confondue avec la famille des trajectoires.

Si le mouvement du fluide est homogène, c'est-à-dire si tous les vecteurs du champ sont identiques à un instant donné, alors la famille des trajectoires est confondue avec la famille des chemins du vent : la connaissance du vecteur en un point du champ de vecteur suffit pour décrire le champ entier.

En météorologie, heureusement, le champ du vecteur vent est souvent localement homogène : la mesure du vent en un point suffit pour la connaissance du champ dans les environs du point de mesure.

Un réseau de mesures dont les mailles sont telles que le champ vectoriel peut être considéré comme homogène dans chacune d'elles est alors suffisant.

Il faut alors pour cela prendre  $\Delta t$  suffisamment grand.

Au point de vue aléatoire, le réseau minimum est celui pour lequel le champ vectoriel dans chaque maille est suffisamment prévisible à partir des mesures.

En pratique, on utilisera donc en météorologie un réseau eulérien de points de mesures.

## 2. Méthode de mesures

On suppose tout d'abord que les instruments sont parfaits, dans un champ localement homogène.

Le vent est caractérisé par le *vecteur vent* qui peut être représenté dans l'espace de diverses manières.

### a) Coordonnées polaires

Dans un système de coordonnées polaires, on a : module du vecteur vent =  $v$  (fig. 7).

$\varphi$  = azimut, compté de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  à partir du nord dans le sens des aiguilles de la montre ;

$h$  = hauteur angulaire comptée de  $0$  à  $90^\circ$  du plan horizontal vers le zénith et de  $0$  à  $-90^\circ$  du plan horizontal vers le nadir ;

$r$  = composante horizontale du vecteur vent  $\geq 0$ .

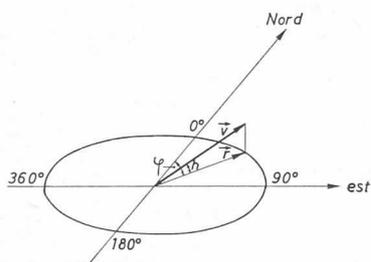
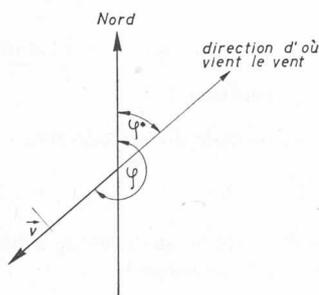


Fig. 7. — Coordonnées polaires.

En météorologie générale, on suppose souvent que le mouvement du fluide est plan, alors

$$h = 0 \quad r = v$$

De plus, on mesure l'angle non pas dans la direction où va le vent, mais dans celle d'où vient le vent (fig. 8).



$\varphi^*$  direction du vecteur vent  
(l'angle est exprimé en degrés)

$$\varphi^* = \varphi - 180^\circ \quad \text{si } \varphi > 180^\circ$$

$$\varphi^* = \varphi + 180^\circ \quad \text{si } \varphi < 180^\circ$$

Fig. 8. — Direction du vent.

L'anémomètre classique (supposé parfait !) à moulinet et girouette ne mesure directement que

$$r \text{ et } \varphi$$

### b) Coordonnées orthogonales ou cartésiennes

Lorsqu'on désire faire une mesure plus détaillée de la structure du vent, on utilise un *anémomètre cartésien* qui mesure directement les composantes orthogonales du

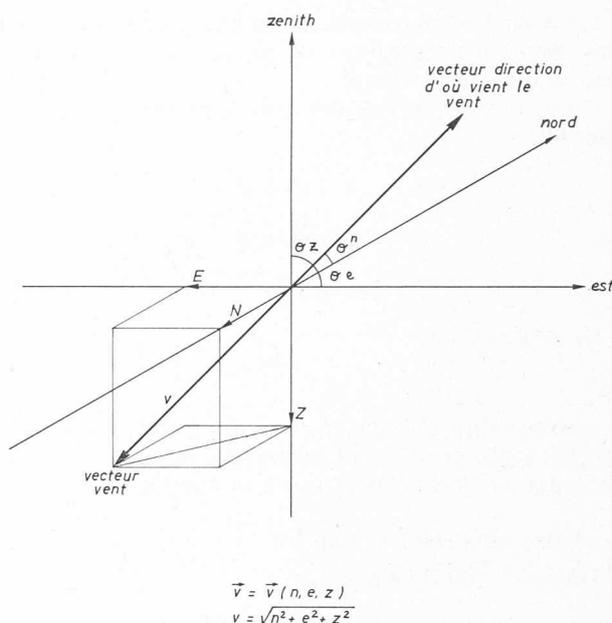


Fig. 9. — Coordonnées polaires.

vecteur vent, avec la convention que les angles directeurs se rapportent au vecteur montrant la direction d'où vient le vent (fig. 9).

- $n$  composante nord du vecteur vent ;
- $e$  composante est du vecteur vent ;
- $z$  composante zénith du vecteur vent ;

De plus, on prend la convention :

- $n$  est positif lorsque le vent vient du nord ;
- $e$  est positif lorsque le vent vient de l'est ;
- $z$  est positif lorsque le vent vient du zénith ;
- $\theta_n$  angle directeur nord de la direction du vent ;
- $\theta_e$  angle directeur est de la direction du vent ;
- $\theta_z$  angle directeur vertical de la direction du vent.

### Remarque

Dans les applications où la composante verticale est négligeable, on pose

$$\theta_n = \varphi$$

## 3. Conclusion

On voit donc que l'anémomètre classique supposé parfait donne une représentation incomplète du vecteur vent. Or, la composante verticale du vent peut atteindre 10 à 30 % de la composante horizontale en moyenne. Et même beaucoup plus dans certaines circonstances.

## II. Comparaison entre l'anémomètre classique et l'anémomètre cartésien dans un vent horizontal

En général, les instruments assurent la *quantification* de la mesure, c'est-à-dire qu'ils donnent une impulsion pour un chemin du vent donné.

- $\rho_0$  pour l'anémomètre classique ;
- $x_0$  pour l'anémomètre cartésien, composante nord ;
- $x_0$  pour l'anémomètre cartésien, composante est.

Souvent la girouette de l'anémomètre classique donne l'angle sous forme d'une grandeur analogique (tension ou déplacement proportionnel à l'angle).

On constate donc déjà un des défauts fondamentaux de l'anémomètre classique : il ne donne pas les deux coordonnées du vecteur vent sous une forme physiquement identique.

Ces anémomètres peuvent être utilisés pour effectuer des moyennes vraies, c'est-à-dire la moyenne prise entre deux intervalles de temps donnés.

Comparons la réponse des deux appareils pendant cet intervalle.

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{n^2 + e^2 + z^2} \\ \bar{v} &= \sqrt{\bar{n}^2 + \bar{e}^2 + \bar{z}^2} \\ \|\vec{v}\| &= \sqrt{\bar{n}^2 + \bar{e}^2 + \bar{z}^2} \end{aligned}$$

On peut voir que

$$\bar{v} \geq \|\vec{v}\|$$

L'anémomètre classique donnera donc systématiquement une valeur plus grande que l'anémomètre cartésien. L'erreur dépendra des fluctuations du vent en direction.

### 1. Anémomètre classique (fig. 10)

Donnée :  $\vec{v}(t)$  entre  $t_1$  et  $t_2$

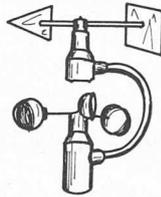


Fig. 10. — Anémomètre classique.

#### a) Moulinet à $t_2$

$$\text{Nombre de tops } n_r = \frac{1}{\rho_0} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} r dt$$

comme nous avons supposé le vent horizontal  $\vec{v} = \vec{r}$

$$\text{et } n_2 = \frac{1}{\rho_0} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} v dt = \frac{1}{\rho_0} \bar{v}$$

$\bar{v}$  moyenne du module du vecteur vent ;

$\bar{v}$  est la longueur de la trajectoire du vent sur l'intervalle de temps.

#### b) Girouette à $t_2$

$\varphi(t_2)$  est la direction du vecteur vent au temps  $t_2$

A partir de l'enregistrement de l'angle  $\varphi$  on peut aussi estimer la moyenne vraie de la direction qui est une indication qui n'a pas grande signification physique (cf. exemple).

$$\bar{\varphi} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \varphi dt$$

Les couples  $\bar{v}, \bar{\varphi}(t_2)$

ou  $\bar{v} \bar{\varphi}$

n'ont pas de signification physique exacte.

### 2. Anémomètre cartésien (fig. 11)

Au temps  $t_2$

$$\text{nombre de tops nord } n_n = \frac{1}{x_0} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} n dt = \frac{1}{x_0} \bar{n}$$

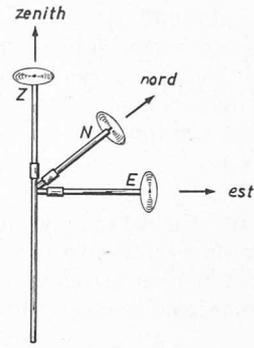


Fig. 11. — Anémomètre cartésien NEZ.

$$\text{nombre de tops est } n_e = \frac{1}{x} \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} e dt = \frac{1}{x_0} \bar{e}$$

$$\text{Composante horizontale } r = \sqrt{n^2 + e^2}$$

Coordonnées polaires

$$\varphi = \arccos \frac{n}{r}$$

$$r = \sqrt{n^2 + e^2}$$

Coordonnées cartésiennes

$$n, e, z$$

$\bar{n}$  et  $\bar{e}$  sont les moyennes des composantes du vecteur vent  $\vec{v}$  ou composantes du vecteur vent moyen.

$$\text{En effet : } \vec{v} = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} \vec{v} dt = \frac{1}{t_2 - t_1} \left[ \int_{t_1}^{t_2} n dt + \int_{t_1}^{t_2} e dt \right] =$$

$$= \frac{1}{t_2 - t_1} \left[ \vec{u}_n \int_{t_1}^{t_2} n dt + \vec{u}_e \int_{t_1}^{t_2} e dt \right] = \frac{1}{t_2 - t_1} (\bar{n} \vec{u}_n + \bar{e} \vec{u}_e)$$

$\vec{u}_n, \vec{u}_e$  vecteurs unitaires selon les axes nord et est.

Il ne faut pas confondre

$\bar{v}$  moyenne du module du vecteur vent

$\vec{v}$  vecteur vent moyen

$\vec{v}$  représente la position au temps  $t_2$  d'une particule d'air ayant passé en 0 au temps  $t_1$

Son module  $\|\vec{v}\|$  est le chemin du vent.

Sa direction est donnée par  $\theta_m = \arctg \frac{\bar{e}}{\bar{n}}$  en général  $\theta_m \neq \bar{\theta}$  (fig. 12)

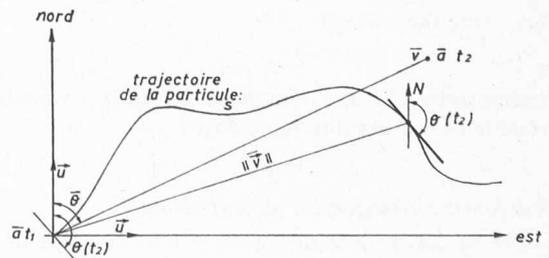


Fig. 12. — Trajectoire et chemin du vent.

### 3. Résumé

Dans un champ vectoriel homogène :

$\vec{v}$	vecteur vent
$v$	module du vecteur vent
$r$	composante horizontale du vecteur vent
$h$	élévation du vecteur vent
$\varphi$	direction du vecteur vent
$n$	composante nord du vecteur vent
$e$	composante est du vecteur vent
$z$	composante zénith du vecteur vent
$\theta_n$	angle directeur nord de la direction du vent
$\theta_e$	angle directeur est de la direction du vent
$\theta_z$	angle directeur vertical de la direction du vent
$\bar{v}$	moyenne vraie du module du vecteur vent ou longueur de la trajectoire du vent
$\bar{\varphi}$	moyenne vraie de la direction du vecteur vent horizontal
$\vec{v}$	vecteur vent moyen
$\ \vec{v}\ $	module du vecteur vent moyen ou chemin du vent
$\varphi_m$	direction du chemin du vent horizontal
$\bar{n}$	composante nord moyenne du vecteur vent
$\bar{e}$	composante est moyenne du vecteur vent
$\bar{z}$	composante zénith moyenne du vecteur vent
$s$	trajectoire du vent
$l$	chemin du vent

### III. Exemples

Nous allons montrer par quelques exemples numériques et pratiques la différence qui existe entre les mesures données par un anémomètre classique et un anémomètre cartésien.

Exemple 1 : Rafale (fig. 13)

Prenons un modèle de rafale caractérisé par

$$v = v_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (\text{décroissance exponentielle})$$

$$\varphi = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\tau} t \quad (\text{rotation constante du vecteur vent})$$

Regardons ce que l'on mesure au bout d'un temps  $\tau = t_2 - t_1$

$$\bar{v} = v_0 \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} dt = v_0 \left(1 - \frac{1}{e}\right) = 0,632 v_0$$

$$\bar{\varphi} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} t dt = \frac{\pi}{4} (45^\circ)$$

$$\varphi(t_2) = \varphi(\tau) = \frac{\pi}{2} (90^\circ)$$

$$n = v \cdot \cos \varphi$$

$$e = v \cdot \sin \varphi$$

$$\bar{n} = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} v \cos \varphi dt = \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} v_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cos \frac{\pi}{2} t dt$$

$$\bar{n} = v_0 \frac{2\pi/e + 4}{4 + \pi^2} = 0,438 v_0$$

$$\bar{e} = v_0 \frac{1}{\tau} \int_0^{\tau} v_0 e^{-\frac{t}{\tau}} \cdot \sin \frac{\pi}{2} t dt$$

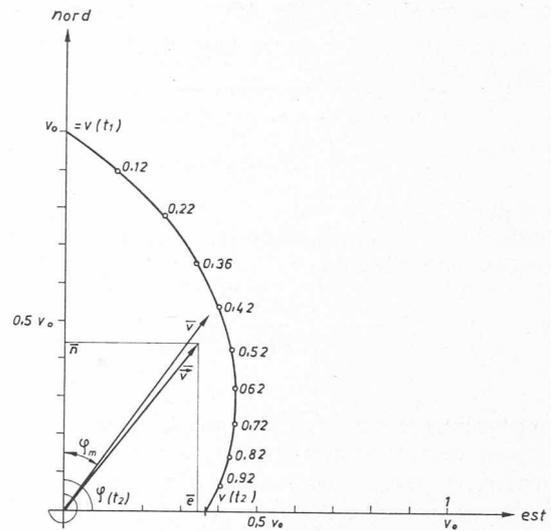


Fig. 13. — Rafale.

$$\bar{e} = v_0 \frac{4\pi - 4}{4 + \pi^2} = 0,347 v_0$$

$$\varphi_m = \arctan \frac{\bar{e}}{\bar{n}} = \arctan 0,7921 = 38^\circ 24'$$

$$\|\vec{v}\| = 0,56 v_0 = \sqrt{e^2 + n^2}$$

$$\text{Différence relative} \frac{\bar{v} - \|\vec{v}\|}{\|\vec{v}\|} = 0,129$$

Erreur + 13 %

Différence d'angle  $45^\circ - 38^\circ 24' = 6^\circ 36'$

Exemple 2 : Vent turbulent (fig. 14)

On peut décomposer le vecteur du vent turbulent en une composante  $\vec{a}$  fixe en direction et en amplitude et une composante  $\vec{c}$  d'amplitude fixe mais dont la direction  $\omega$  varie continuellement avec le temps (écoulement plan).

Le modèle se caractérise par l'angle  $\hat{v}$  qui est l'angle maximum que fait le vecteur vent avec la direction moyenne (lit du vent).

$$\hat{v} = \arcsin \frac{c}{a}$$

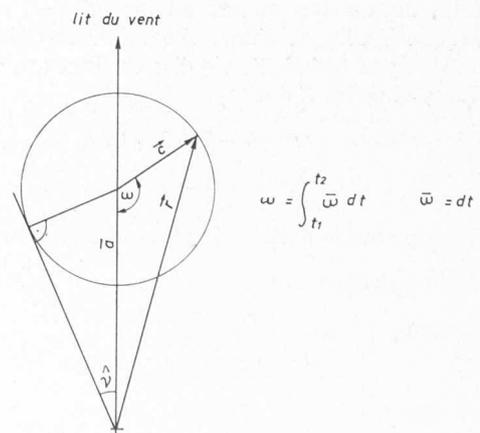


Fig. 14. — Vent turbulent.

a) *Anémomètre classique* (fig. 15)

L'anémomètre mesure le module de la composante horizontale du vecteur vent

$$\vec{r} = \vec{a} + \vec{c} = \vec{v}$$

$$r^2 = a^2 + c^2 - 2ac \cos \omega$$

Lorsqu'on mesure le vent avec l'anémomètre classique, on obtient au bout d'un certain temps  $\Delta t$  la moyenne de la composante horizontale  $r$

$$\bar{r} = \bar{v} = \frac{s}{\Delta t} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \sqrt{a^2 + c^2 - ac \cos \omega} d\omega$$

On peut intégrer cette équation numériquement.  
On peut aussi démontrer que  $\bar{r} > a$ .  
En outre, on peut calculer la valeur quadratique moyenne.

$$\bar{r}^2 = \bar{a}^2 + \bar{c}^2$$

b) *Anémomètre cartésien*

Pour simplifier le calcul nous supposons qu'un bras est orienté dans le lit du vent (ce qui ne change rien au résultat).

Nous aurons  $\vec{r} = \vec{n} + \vec{e}$

et  $r^2 = n^2 + e^2$

avec  $n = a - c \cdot \cos \omega$

$e = c \cdot \sin \omega$

d'où  $\bar{n} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} (a - c \cdot \cos \omega) d\omega = a$

$\bar{e} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} c \cdot \sin \omega d\omega = 0$

d'où  $\|\vec{v}\| = a$

On voit que là aussi :  $\bar{v} > \|\vec{v}\|$

En prenant par exemple :  $v = 30^\circ$   
on obtient en intégrant graphiquement :

$$\frac{\bar{v} - \|\vec{v}\|}{\|\vec{v}\|} = 5,5 \%$$

*Exemple 3 : Application numérique*

Le 17.2.1971, entre 18 h et 19 h à Blattenberg près de Rüthi, nous avons mesuré au moyen d'un anémomètre classique Wælfle et d'un anémomètre cartésien NEZ un vent de fœhn turbulent, régulier en direction et en force.

Le système NEZ donne,

$$n^* = -576\ 219 \text{ tops}$$

$$e^* = -196\ 636 \text{ tops}$$

L'anémomètre classique indique pendant le même temps :

chemin du vent  $\bar{v} = 76 \pm 1 \text{ km}$

direction  $\bar{\varphi} = 210^\circ \pm 5^\circ$

$2\hat{v} = 60^\circ \pm 10^\circ$

on a donc  $\bar{v} = 21,1 \text{ m/s}$

et  $\bar{\varphi} = 210^\circ \pm 5^\circ$

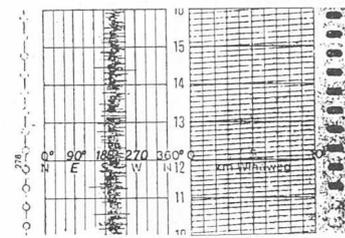


Fig. 15. — Mesures par anémomètre Wælfle.

L'anémomètre cartésien donne

$$\varphi_m = \text{arc tg} \frac{576\ 219}{196\ 636} = 198^\circ 51'$$

Nous allons corriger les valeurs données, mesurées par l'anémomètre cartésien, par itération sur le graphique de la réponse angulaire de l'hélice.

arc tg	n	$\varphi_m$	e
0,34 125	676 219	198°51'	196 636
0,40 968	590 745	202°16'	242 014
0,414	591 200	202°30'	244 867

d'où  $\varphi_m = 202^\circ 30'$

L'erreur sur  $\varphi_m$  peut être estimée à  $\pm 1^\circ$ .

Il faut tenir compte encore du facteur de calibration des hélices qui vaut 1,062

d'où  $\|\vec{v}\| = 1\ 062 \sqrt{\bar{n}^2 + \bar{e}^2} = 18,9 \text{ m/sec}$

$$\frac{v - \|\vec{v}\|}{\|\vec{v}\|} = 11 \%$$

On constate une légère divergence entre  $\bar{\varphi}$  et  $\varphi_m$ . Cela peut provenir soit que le lit du vent ait varié de quelques degrés au cours de la mesure ou plus probablement que les deux anémomètres ne soient pas rigoureusement orientés.

L'écart qui existe entre le vecteur vent moyen  $\|\vec{v}\| = 18,9 \text{ m/sec}$ , le module du vecteur vent  $\bar{v} = 21,1 \text{ m/sec}$ , illustre bien la différence qui existe entre la *trajectoire du vent s* et le *chemin du vent l* même pour un vent constant en moyenne en direction et en amplitude.

Nous n'avons pas tenu compte dans ces calculs de la composante verticale du vent qui conduit à une surestimation du vent. Cela peut expliquer l'écart entre la valeur théorique (5,5 %) et la valeur expérimentale (11 %).

*Exemple 4 : Mesures fines du vent turbulent*

Un anémomètre tridimensionnel NEZ installé en milieu perturbé (milieu urbain) a enregistré le 23 avril 1975 un vent du nord (bise).

L'anémomètre était couplé à un mini-ordinateur P652 Olivetti. Le calculateur recevait une mesure toutes les 10 secondes N, E, Z. Il effectuait et imprimait les résultats des calculs suivants toutes les 10 minutes.

1. La vitesse du chemin du vent :  $\|\vec{v}\|$  (vecteur moyen)

$$\|\vec{v}\| = \frac{l}{t} = \frac{\sqrt{(\sum \Delta N)^2 + (\sum \Delta E)^2 + (\sum \Delta Z)^2}}{t} \text{ [m/s]}$$

2. La vitesse de la trajectoire :  $v$

$$v = \frac{s}{t} = \frac{1}{n} \sum \frac{\sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta Z^2}}{dt} \text{ [m/s]}$$

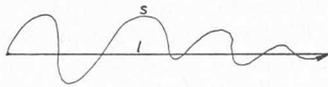


Fig. 16. — Chemin trajectoire du vent.

3. La moyenne de la direction Nord  $\bar{\theta}_N$

$$\bar{\theta}_N = \frac{1}{n} \sum \arccos \frac{N}{\sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta Z^2}} + k(90^\circ)$$

4. La direction Nord moyenne du chemin du vent  $\bar{\theta}_{Nm}$

(angle que fait  $\vec{v}$  avec la direction nord).

$\theta_{Nm}$  est compté de  $0^\circ$  à  $360^\circ$  à partir de la direction nord, dans le sens des aiguilles de la montre

$$\bar{\theta}_{Nm} = \arccos \frac{\sum \Delta N}{\|\vec{v}\|} + k(90^\circ)$$

5. La moyenne de la direction verticale

$$\bar{\theta}_Z = \frac{1}{n} \sum \left( \arcsin \left( \frac{\Delta Z}{\sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta Z^2}} \right) \right)$$

6. La direction verticale moyenne du chemin du vent

(angle que fait le vecteur moyen avec le plan horizontal, compté de  $0^\circ$  à  $90^\circ$  lorsque le vent est descendant, compté de  $0^\circ$  à  $-90^\circ$  lorsque le vent est ascendant.

$$\theta_{Zm} = \arcsin \frac{\sum \Delta N}{\|\vec{v}\|}$$

7. L'écart type de la vitesse

$$\sigma_v = \sqrt{\frac{1}{n} (\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta Z^2) - \left( \frac{1}{n} \sum \sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta Z^2} \right)^2}$$

8. L'écart type de la direction nord  $\sigma_{\theta_N}$

$$\sigma_{\theta_N} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left( \arccos \left( \frac{\Delta N}{\sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta Z^2}} \right) \right)^2 - \left( \frac{1}{n} \sum \arccos \frac{\Delta N}{\sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta Z^2}} \right)^2}$$

9. L'écart type de la direction verticale  $\sigma_{\theta_Z}$

$$\sigma_{\theta_Z} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left( \arcsin \left( \frac{\Delta Z}{\sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta Z^2}} \right) \right)^2 - \left( \frac{1}{n} \sum \arcsin \frac{\Delta Z}{\sqrt{\Delta N^2 + \Delta E^2 + \Delta Z^2}} \right)^2}$$

De ces mesures, on peut en tirer les constatations suivantes :

1. Le vent était fortement perturbé, puisqu'il semble provenir de l'Ouest-Nord Ouest.
2. La composante verticale du vent est loin d'être négligeable :  $\theta_{Zm} = -12^\circ$  correspond à une composante verticale ascendante de 20 % du vecteur vent.
3. Le vent est si turbulent que la trajectoire du vent  $s$  est près de 3 fois plus grande que le chemin du vent  $l$  (fig. 16).

Cela est très significatif car un anémomètre à moulinet ne peut pas mesurer un tel phénomène.

4. On observe en valeur absolue une différence de près de  $20^\circ$  entre les directions des chemins du vent et la direction moyenne : une girouette donnerait dans ces conditions une erreur systématique de  $20^\circ$  ! Ce phéno-

Tableau II — Tableau de mesures.

$\ \vec{v}\ $ [m/s]	$\bar{v}$ [m/s]	$\bar{\theta}_N$ [°]	$\theta_{Nm}$ [°]	$\bar{\theta}_Z$ [°]	$\theta_{Zm}$ [°]	$\sigma_v$ [m/s]	$\sigma_{\theta_N}$ [°]	$\sigma_{\theta_Z}$ [°]
0.23	0.91	98	118	-13	-62	0.50	36	23
0.14	1.02	93	100	-12	-76	0.58	44	22
0.25	0.83	101	130	-5	-24	0.42	42	31
0.49	1.04	106	127	-12	-28	0.51	36	30
0.60	1.09	111	144	-10	-25	0.57	38	22
0.26	0.96	91	99	-10	-17	0.66	43	29
0.33	1.06	100	140	-9	-30	0.52	47	24
0.17	1.02	95	149	-6	-31	0.48	44	23
0.34	0.95	93	112	-18	-50	0.57	40	21
0.29	1.06	100	133	-15	-46	0.71	40	29
0.49	0.95	105	125	-14	-30	0.43	39	26
0.38	1.01	101	128	-14	-33	0.51	36	23
0.30	1.06	97	113	-6	-9	0.64	40	27
0.39	0.81	102	120	-11	-18	0.40	39	25
0.27	1.05	102	145	-9	-34	0.65	41	25
0.21	0.97	92	110	-7	-16	0.48	40	24
0.23	0.79	92	98	-15	-69	0.39	40	22
0.45	0.83	87	92	-11	-27	0.43	45	28
0.36	0.87	104	126	-12	-34	0.44	37	30
0.21	0.97	103	144	-12	-33	0.57	46	30
0.39	0.99	98	116	-13	-29	0.51	35	24
0.29	0.83	107	155	-9	-19	0.54	40	26
0.35	0.94	91	97	-5	-22	0.51	44	24
0.50	0.84	109	124	-19	-26	0.48	45	21
0.59	1.07	105	120	-20	-33	0.56	36	20
0.24	0.77	97	134	-13	-30	0.41	42	21
0.17	0.74	102	118	-4	-6	0.63	44	26
0.33	0.81	100	134	-16	-39	0.41	44	17
0.14	0.79	79	56	3	1	0.41	41	29
0.25	0.82	99	120	-5	-6	0.59	43	27
0.33	1.00	101	110	-10	-12	0.71	38	24
0.26	0.64	97	117	-13	-30	0.39	48	22
0.11	0.59	92	111	-12	-56	0.36	51	22
0.21	0.95	90	124	-11	-49	0.91	45	28
0.40	1.01	105	139	-18	-45	0.54	42	23
0.30	1.15	104	125	-13	-44	0.53	42	24
0.34	1.05	100	118	-16	-55	0.48	35	29
0.21	0.95	88	83	-18	-80	0.49	39	26
0.19	1.07	89	89	-7	-37	0.63	44	24
0.34	0.99	96	113	-17	-47	0.44	41	26
0.72	1.28	108	129	-17	-29	0.56	34	25
0.35	1.17	99	106	-15	-46	0.56	35	27
0.55	1.48	95	107	-20	-52	0.67	37	27
0.60	1.74	116	135	-20	-33	0.53	39	23
0.42	1.15	103	127	-11	-29	0.53	37	29
0.44	1.10	103	125	-13	-32	0.63	37	28
0.50	1.05	116	147	-16	-31	0.62	32	20
0.48	1.30	96	113	-16	-44	0.82	44	23
0.59	1.30	103	127	-13	-29	0.60	40	24
0.29	0.94	100	125	-9	-40	0.54	38	27
0.50	1.18	101	127	-19	-33	0.56	38	25
0.66	1.26	102	117	-20	-39	0.57	41	21
0.39	1.23	107	144	-12	-33	0.66	37	26
0.24	1.07	95	123	-15	-53	0.58	42	30
0.42	1.06	107	152	-11	-25	0.58	44	23
0.37	1.18	102	133	-11	-41	0.57	31	30
0.33	0.93	95	109	-8	-28	0.54	39	28
0.50	1.00	101	120	-26	-46	0.64	39	24
0.21	1.01	98	134	-11	-43	0.53	38	24
0.26	1.11	94	109	-13	-52	0.62	41	27
0.28	0.91	101	145	-10	-34	0.48	40	25
0.25	0.92	93	94	-14	-59	0.52	47	25

Bise  
23.04.75  
15h.30  
st=10"  
t=10'

mène s'explique par le fait que la direction du vent ne varie pas de façon symétrique par rapport à la direction moyenne (fig. 17).

Cette expérience démontre que seul un anémomètre tridimensionnel, capable de mesurer les composantes du

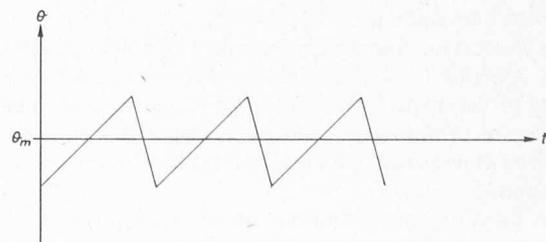


Fig. 17. — Variations de la direction du vent.

vecteur vent peut donner une mesure correcte d'un vent turbulent (tableau II).

Dans le cas d'un calcul de diffusion d'un polluant,  $I$ ,  $\theta_{Nm}$  et  $\theta_{Zm}$  permettent de calculer le transport du polluant, tandis que  $\sigma_v$ ,  $\sigma_{\theta N}$  et  $\sigma_{\theta Z}$  permettent d'en calculer la concentration et la dispersion.

#### IV. Conclusion

Cette simple mesure met en évidence l'impossibilité de mesurer au moyen d'un anémomètre classique la *structure*

*fine du vent* (turbulence, rafales, etc.). Or celle-ci joue un rôle primordial dans la diffusion atmosphérique (polluants), les échanges avec le sol (agriculture), l'influence sur les structures (construction), l'atterrissage par mauvaise visibilité (catégorie III), etc.

Adresse de l'auteur :

Pierre Emile Ravussin  
Ingénieur SIA, D<sup>r</sup> ès sc. techn.  
Résidence Grand Vue C  
1092 Belmont-sur-Lausanne

## Centre professionnel pour l'industrie et l'artisanat — Genève



Fig. 1. — Vue d'ensemble du Centre professionnel.  
Etat actuel des travaux.

Le Grand Conseil genevois, en accordant dans sa séance de fin juin 1975 le crédit de 8,781 millions de francs que lui demandait le Conseil d'Etat, a ouvert la voie à la réalisation de la cinquième étape, donc à l'achèvement du Centre professionnel à Lancy. C'est un ouvrage ayant demandé dix ans de travaux préparatoires et près de dix ans pour la réalisation (fig. 1).

La mise en train de cette cinquième étape, comprenant deux salles de gymnastique et des parkings, suivra de peu l'achèvement ce mois de la quatrième étape, qui portait sur deux bâtiments.

#### Historique

C'est en 1958 que débutèrent les travaux préparatoires en vue de la construction d'un centre professionnel moderne à Genève, par une visite du Centre professionnel de Lausanne, suivie par l'élaboration d'avant-projets sur la base des besoins définis en commun par la direction de l'Ecole, les représentants des milieux professionnels et les maîtres de métier enseignant à l'Ecole.

Le choix d'un premier emplacement en 1965 — la Pointe de la Jonction — devait se révéler défavorable à l'examen des 34 projets reçus lors d'un concours pour la construction du Centre professionnel. L'espace disponible était parcimonieux et ne permettait en aucun cas une future extension du Centre.

Un droit de superficie pour un terrain approprié, situé à Lancy, ayant pu être assuré en 1966, les architectes ayant obtenu le premier prix du concours — MM. L. Archinard,

A. et E. Billaud, L. Tréaud et J. Zuber — sont chargés en 1967, par le Département des travaux publics, d'élaborer des plans adaptés au nouvel emplacement (fig. 2).

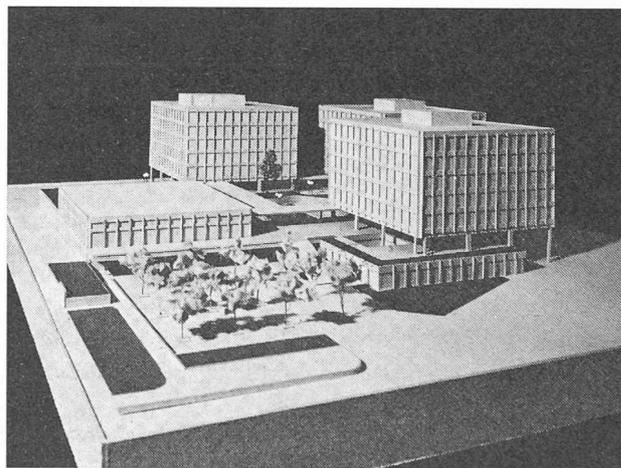


Fig. 2. — Maquette du projet élaboré pour l'emplacement de Lancy.

En outre, de nouvelles visites d'écoles dans toute la Suisse permettent de tenir compte de nombreuses expériences pour la mise au point du projet.

En 1968, une planification par étapes, basée sur des avant-projets de M. F. Duc, architecte, est adoptée.

Il est à relever la dynamique dont ont eu à faire preuve les responsables de ce projet, à cause de l'évolution intervenue pendant les travaux préparatoires aussi bien dans