

Zeitschrift: Verhandlungen der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft = Actes de la Société Helvétique des Sciences Naturelles = Atti della Società Elvetica di Scienze Naturali

Herausgeber: Schweizerische Naturforschende Gesellschaft

Band: 118 (1937)

Artikel: La turbulence atmosphérique

Autor: Kampé de Fériet, J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-90412>

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: 16.01.2026

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

La turbulence atmosphérique

Par

J. KAMPÉ DE FÉRIET

Professeur à la Faculté des Sciences

Directeur de l'Institut de Mécanique des Fluides de l'Université de Lille

Dans cet exposé je me propose d'esquisser à grands traits l'état actuel en France des recherches théoriques et expérimentales sur la turbulence atmosphérique.

L'étude de la nature et des effets de la turbulence dans l'atmosphère, constitue à coup sûr un des chapitres les plus importants du problème général de la turbulence, dont on peut dire, à mon sens, que dépend tout l'avenir de la Mécanique des Fluides.

Voici deux siècles déjà que votre illustre compatriote DANIEL BERNOULLI énonçait dans son « Hydrodynamica » (1738) les équations du mouvement d'un fluide parfait; mais contrairement à ce qui se passait, au XVIII^e siècle, pour d'autres sciences (la Mécanique céleste et la Mécanique du corps solide, par exemple), les principes théoriques n'apportèrent que très peu de clarté dans l'interprétation des faits d'expérience; des hydrauliciens comme du BUIAT, l'abbé BOSSUT, BELIDOR ne purent presque rien déduire de ce premier schéma; « quoique les lois du mouvement des eaux », écrit BELIDOR (1750), « aient fait l'objet des recherches de plusieurs habiles mathématiciens, le fruit qu'ils en ont tiré se réduit seulement à quelques règles sur la hauteur et la dépense des jets, qui ne peuvent être d'un grand avantage dans la pratique. » Les expériences de COULOMB (1784), ayant montré l'importance des forces de frottement dans les fluides, conduisirent tout naturellement au second stade de la théorie, celui des fluides visqueux, dont les équations furent posées dès 1822 par NAVIER puis en 1845 par STOKES. — Mais, sauf pour les célèbres expériences du D^r POISEUILLE (1842) sur l'écoulement d'un liquide dans des tubes capillaires, où les conséquences

des équations de NAVIER-STOKES se vérifièrent avec une grande précision, presque tous les faits expérimentaux refusaient d'entrer dans le cadre fixé par la théorie; le mot de BARRÉ de SAINT VENANT (1872): « l'Hydraulique est une désespérante énigme », restait encore vrai il y a quelque vingt ans.

C'est par la porte ouverte par ce désaccord que le concept de turbulence s'est peu à peu introduit dans l'édifice de la Mécanique des Fluides. Une lumière très vive fut projetée par OSBORNE REYNOLDS (1883) lorsqu'il montra que de l'eau dans un tuyau peut s'écouler selon deux régimes bien distincts: le premier — où un filet de couleur reste net et parallèle à l'axe du tuyau — qui vérifie les équations de NAVIER-STOKES; le second — où un filet de couleur se tord en tout sens et colore tumultueusement toute la masse — qui est en désaccord complet avec ces équations; nous appelons aujourd'hui ces deux régimes *laminaire* et *turbulent*. L'opposition entre eux est donc basée essentiellement sur le caractère de simplicité, de régularité, de permanence d'une part, de complexité, de décoordination, de variation rapide dans le temps et dans l'espace, d'autre part.

* * *

Après avoir rappelé la position centrale du problème de la turbulence, au cœur même de la Mécanique des Fluides, il ne me paraît pas inutile, devant des savants adonnés à des disciplines aussi diverses que celles figurant au programme de cette Assemblée, de m'arrêter un instant sur l'intérêt que présente l'étude spéciale de la turbulence atmosphérique, pour des chapitres nombreux et variés de la Science.

On pense, tout d'abord, avec juste raison, à la *Météorologie* et à l'*Aérodynamique*; mais ces Sciences sont loin d'être les seules intéressées: l'*Astronomie*, la *Botanique*, la *Médecine*, l'*Urbanisme* même pourront tirer profit, pour des points de détail ou pour des chapitres entiers, selon les cas, des résultats de l'étude de la turbulence atmosphérique.

Pour souligner le rôle primordial de la turbulence atmosphérique dans la Météorologie, il suffit d'indiquer quelques-uns des problèmes où elle intervient directement:

Le bilan thermique de l'atmosphère, car la turbulence diffuse jusqu'à plusieurs milliers de mètres de leur source les particules

d'air réchauffées ou refroidies, par le rayonnement ou surtout par le contact avec le sol;

La différenciation des grandes masses d'air d'origine arctique, polaire, tropicale, équatoriale; l'histoire de ces masses s'inscrit en elles par des évolutions typiques de leur turbulence interne;

La diffusion de la vapeur d'eau d'origine marine ou terrestre; l'agitation turbulente constitue, en outre, un processus puissant de *condensation*; elle est en particulier la cause de la formation de certains *brouillards* et de certains *nuages* typiques.

Bien entendu, chacun connaît l'étroite dépendance de l'avion et du milieu aérien qui le porte. Tous ceux qui ont l'habitude de voyager sur les lignes commerciales savent combien la sensation de confort varie avec l'état de l'atmosphère; les accélérations subies par un avion de ligne moderne du fait de la turbulence atmosphérique sont en moyenne de l'ordre de 0,5 g.; elles atteignent couramment 1 g. et parfois 2 ou 3 g. dans des circonstances spéciales; dans ce dernier cas, les passagers, qui décollent du siège, apprécient peu le voyage, en général. Mais les recherches modernes ont montré que l'influence de la turbulence s'étendait encore beaucoup plus loin, en modifiant les qualités aérodynamiques de l'appareil elles-mêmes. On s'en est aperçu en constatant que les polaires d'une même maquette, déterminées successivement dans deux souffleries, peuvent présenter de très importantes différences; d'une soufflerie à l'autre la valeur de la portance maxima de certains profils d'aile peut en particulier varier de 50 %.¹ Comme la vitesse d'atterrissage d'un avion et sa stabilité latérale dépendent précisément de la valeur du maximum de portance, on comprend l'intérêt primordial qui s'attache à une mesure précise de la turbulence atmosphérique au cours des essais en vol d'un prototype, pour pouvoir chiffrer comment les performances réalisées sont affectées par les conditions du jour de l'épreuve.

¹ Par exemple dans la soufflerie de PASADENA (Californie) en faisant varier la turbulence par des grillages, C. B. MILLIKAN a trouvé que le C_z maximum de l'aile N. A. C. A. 2412 pouvait varier de 1,2 à 1,6. — C. B. MILLIKAN et A. L. KLEIN, The effect of Turbulence: An Investigation of Maximum Lift Coefficient and Turbulence in Wind Tunnels and in Flight (Aircraft Engineering 1933). — Depuis cette époque ce sujet a été l'objet de nombreux travaux, qui tous ont confirmé la grande sensibilité du C_z maximum d'une aile à la turbulence du courant d'air.

Le fait lui-même de la discordance des mesures des diverses souffleries est bien digne d'attention; les deux courants d'air dont la vitesse moyenne mesurée par un tube de Pitot est la même, 40 m./sec. par exemple, diffèrent donc par « quelque chose », qui nous est caché: ce quelque chose, assez puissant pour modifier aussi profondément les effets de l'écoulement sur une aile, est précisément ce que nous appelons leur turbulence. Si au tube de Pitot nous substituons un instrument de mesure plus fin, un fil chaud, les enregistrements auront une allure très différente pour les deux souffleries; au mouvement d'ensemble, seul visible sur les moyennes faites par le tube de Pitot, se superposent d'une manière typique pour chaque soufflerie, des changements de direction et de grandeur de la vitesse, dont la complexité va en croissant avec la finesse de l'appareil de mesure. H. L. DRYDEN,¹ le grand spécialiste américain du fil chaud en soufflerie, a trouvé qu'une part importante (16 %) revient encore aux perturbations dont la fréquence s'étale entre 500 et 1500 par seconde.

En dehors des applications classiques et évidentes à la Météorologie et l'Aérodynamique, comme premier exemple d'une science qui, sur un point précis, est en contact avec la turbulence atmosphérique, je citerai l'Astronomie: je n'ai pas besoin de rappeler que la scintillation des étoiles, la qualité des images dans un instrument dépendent de l'atmosphère. Or ce sont précisément, tout le long du rayon lumineux, les variations rapides de pression de densité et de température, de particules d'air différenciées les unes par rapport aux autres qui entraînent les phénomènes optiques si redoutés des astronomes: le choix de l'emplacement d'un Observatoire peut donc d'ores et déjà bénéficier dans une large mesure des règles connues liant la turbulence à l'orographie et au climat général.

Je terminerai en indiquant encore quelques contributions possibles aux Sciences biologiques.

Tout d'abord les échanges thermiques entre un corps et un fluide dépendent, tout comme les forces aérodynamiques, non

¹ H. L. DRYDEN, « Measurements of intensity and scale of wind-tunnel turbulence and their relation to the critical Reynolds number of spheres. » N. A. C. A. N° 581 — 1937.

seulement de la vitesse moyenne du fluide, mais encore de sa turbulence.¹

Cette remarque permettra peut-être aux naturalistes de glaner des faits intéressants sur l'influence du vent en Physiologie végétale ou animale; peut-être aussi à la Climatologie médicale d'expliquer certaines actions favorables ou nuisibles du vent sur l'organisme humain d'après son degré de turbulence.

La turbulence joue enfin un rôle fondamental dans la diffusion des matières en suspension: poussières et microbes, ions et cristaux de sel, grains de sables, grains de pollen. Le regretté WILHELM SCHMIDT² a consacré une magistrale étude à ce point de vue, qui ouvrira certainement des aperçus nouveaux à ceux d'entre vous qui se préoccupent d'Hygiène urbaine, d'Océanographie (diffusion du plancton) ou de Géographie botanique (voir en particulier les mesures si curieuses de diffusion du pollen sur les bateaux-phares de la Baltique).

* * *

En France l'étude théorique et expérimentale de la turbulence atmosphérique est actuellement confiée par le Ministère de l'Air (avril 1935) à un groupe de chercheurs, formant une Commission présidée par M. WEHRLÉ, directeur de l'Office National Météorologique, et comprenant MM. BALDIT, sous-chef de Section technique à l'Office National Météorologique; BÉNARD, professeur à la Sorbonne; DEDEBANT, chef du Service scientifique de l'Office National Météorologique; DUPONT, chef de la Section aérodynamique du Service technique d'Aéronautique; IDRAC, professeur à l'Institut

¹ A titre d'indication pour l'ordre de grandeur, H.-L. DRYDEN donne pour le problème le mieux étudié, l'écoulement d'un liquide dans un tuyau cylindrique, des valeurs du coefficient de transmission de la chaleur α , pour les deux régimes laminaire et turbulent qui conduisent à:

$$\frac{\alpha \text{ (turbulent)}}{\alpha \text{ (laminaire)}} = 0,0075 R^{3/4}$$

R désignant le nombre de Reynolds de l'écoulement: H.-L. DRYDEN. — Aerodynamics of Cooling, dans Aerodynamic Theory de W.-F. DURAND. T. VI, p. 272 (Berlin 1936). Par conséquent pour $R = 10\,000$, valeur pour laquelle l'écoulement est normalement turbulent, mais qui avec des précautions exceptionnelles a pu encore donner parfois un écoulement laminaire, le rapport des deux coefficients de transmission atteindrait 7,5.

² W. SCHMIDT, Der Massenaustausch in freier Luft und verwandte Erscheinungen. Hamburg 1925.

Océanographique; KAMPÉ DE FÉRIET, directeur de l'Institut de Mécanique des Fluides; MÉTRAL, professeur au Conservatoire National des Arts et Métiers; la mort devait malheureusement interrompre bientôt (mai 1935) la collaboration si fructueuse de P. IDRAC, qui fut un précurseur dans le défrichement de ce domaine.

M. WEHRLÉ et son collaborateur M. DEDEBANT se sont donné pour but, depuis plusieurs années, de construire une synthèse théorique de la turbulence atmosphérique destinée à s'épanouir en une Mécanique de l'Atmosphère riche en perspectives nouvelles et hardies.¹

Cette œuvre, qui sur plusieurs points est encore en voie de création, est essentiellement fondée sur les concepts d'*échelle* et de *probabilité*.

Chacun comprend que les unités commodés ne doivent pas être les mêmes quand on décrit les tourbillons se détachant derrière une maquette en soufflerie ou le vaste mouvement giratoire couvrant toute l'Europe, que l'école norvégienne de Météorologie appelle un cyclone; mais pour MM. WEHRLÉ et DEDEBANT la notion d'échelle comporte une signification beaucoup plus profonde, liée à la définition de ce qu'ils appellent un *étage* de perturbation.

¹ G. DEDEBANT, PH. SCHERESCHEWSKY et PH. WEHRLÉ: Sur la similitude statistique dans les mouvements turbulents des fluides (Comptes-rendus Acad. Sc., t. 198, 1934, p. 1571; Sur une classe de mouvements naturels des fluides visqueux, caractérisée par un minimum de la puissance dissipée; cas du soleil (Comptes-rendus Acad. Sc., t. 199, 1934, p. 1287).

G. DEDEBANT, PH. WEHRLÉ, PH. SCHERESCHEWSKY: Le maximum de probabilité dans les mouvements permanents. Application à la turbulence (Comptes-rendus Acad. Sc., t. 200, 1935, p. 203).

G. DEDEBANT, PH. SCHERESCHEWSKY et PH. WEHRLÉ: Théorie de la circulation générale de l'atmosphère. Le champ moyen de température (Comptes-rendus Acad. Sc., t. 201, 1935, p. 346); Théorie de la circulation générale de l'atmosphère. La loi de rotation et le champ de pression (Comptes-rendus Acad. Sc., t. 201, 1935, p. 453).

G. DEDEBANT et PH. WEHRLÉ: La circulation générale de l'atmosphère sur un globe uniforme déduite d'un principe de moindre dissipation (Communication au Congrès de l'U. G. G. I., Lisbonne 1933); Le rôle de l'échelle en météorologie (Compte-rendu du 68^e Congrès pour l'avancement des Sciences, Paris 1935).

Voir un large exposé didactique, avec l'accent sur le côté philosophique de leur construction, dans G. DEDEBANT et PH. WEHRLÉ: «La Mécanique de l'Atmosphère et des grands milieux fluides fondée sur les concepts d'échelle et de probabilité » Thalès 1935.

Plaçons-nous pour étudier un fluide au point de vue d'Euler, c'est-à-dire mesurons les divers éléments (vitesse, température, etc.) en des points fixes P de l'espace; supposons le mouvement moyen stationnaire, c'est-à-dire que les indications d'instruments grossiers (comme le tube de Pitot dans une soufflerie) sont constantes.

Prenons comme support pour notre pensée le point de vue de la théorie cinétique; si nous disposions d'un anémomètre idéal, à la taille du démon de Maxwell, nous enregistrerions la vitesse individuelle de chacune des molécules passant au point P ; puisque le mouvement est stationnaire, la moyenne de ces vitesses pour un intervalle de temps très long est constante et les vitesses individuelles se distribuent selon une courbe de fréquence bien déterminée autour de cette moyenne.

Tout anémomètre concret fait (plus ou moins bien selon sa sensibilité) une moyenne sur les vitesses des molécules passant pendant un intervalle de temps $\triangle t$ dans un volume $\triangle \omega$ entourant le point P . Partant donc par la pensée des vitesses moléculaires, examinons-les par le procédé du *crible*; subdivisons pour cela un intervalle de temps très long en fractions de durées $T/2$ que nous numérotions 1, 2, n ; groupons d'un côté les intervalles fractionnaires de numéros impairs et d'un autre ceux de numéros pairs. En général les deux moyennes calculées sur les vitesses moléculaires de tous les intervalles pairs, d'une part, et de tous les intervalles impairs, d'autre part, seront égales et égales aussi à la moyenne générale constante calculée sur un intervalle très long quelconque; en outre les deux courbes de fréquence donnant la dispersion des vitesses moléculaires dans les groupes des intervalles pairs et impairs seront identiques. Lorsque ces deux moyennes sont distinctes, le procédé de crible nous révèle l'existence d'une organisation macroscopique constituant un *étage* de perturbations dont la période est T . MM. WEHRLÉ et DEDEBANT disent qu'il existe alors une turbulence d'échelle T .

De ces vues théoriques il découle évidemment cette conséquence pratique que l'anémomètre le mieux adapté pour révéler cette turbulence est celui qui mesure exactement les moyennes sur un intervalle égal à $T/2$.

Dans son état actuel la théorie se propose d'étudier le cas, où il n'existe entre le chaos moléculaire de la théorie cinétique et le mouvement moyen seul accessible aux équations classiques de

la Mécanique des Fluides, qu'un seul étage de perturbation; elle pourrait se généraliser sans peine au cas d'un nombre fini d'étages. Mais la question s'ouvre immédiatement de rechercher quel est dans les cas concrets le *spectre* de la turbulence: groupes de lignes discrètes de valeurs T_1, T_2, \dots, T_K , séparées par des zones de silence ou bande continue remplissant tout un intervalle ($T' T''$); ce problème fondamental n'a pas encore reçu de réponse, bien que les recherches de DRYDEN, citées plus haut, me fassent penser que ce soit la deuxième hypothèse la plus probable.

La notion d'échelle, explicitée en un point fixe P , s'étend à l'espace, par la considération du groupe spatial de molécules constituant une *particule*, passant en des points P', P'' , voisins de P et dont les moyennes, calculées sur la demi-période $T/2$ présentent les mêmes fluctuations qu'en P .

Cette notion essentielle étant acquise, MM. DEDEBANT et WEHRLÉ se proposent de construire la Mécanique statistique des particules. La valeur moyenne en P pour un intervalle très long d'une propriété mesurable du fluide (vitesse, pression, température, etc.) étant désignée par \bar{f} , la valeur moyenne de cette même propriété pour une certaine demi-période $T/2$ étant f , on la décompose sous la forme:

$$f = \bar{f} + f',$$

f' désigne la composante turbulente de cette propriété pour la particule qui a défilé dans un petit volume entourant P pendant l'intervalle de temps considéré.

Le point de vue statistique pur exige qu'on renonce à toute connaissance individuelle des valeurs f' ; on doit les considérer comme des *variables aléatoires*; il faut *pulvériser la chronologie*, ne pas s'attacher à la succession dans le temps des valeurs f' , mais uniquement à leur distribution statistique définie par des courbes de fréquence.

La description d'un mouvement turbulent comprend donc deux parts: le mouvement moyen, correspondant à des champs de fonctions \bar{f} continues et dérivables en $(x y z)$, indépendantes, d'ailleurs, de t , puisque le mouvement est stationnaire; le mouvement d'agitation turbulente correspondant aux f' , fonctions qui ne sont continues et dérivables ni en $(x y z)$, ni en t et qui ne doivent intervenir dans les équations que par des paramètres statistiques judicieusement choisis et déduits de leurs courbes de fréquence. Cette introduction d'un champ de variables aléatoires dans la Méca-

nique des Fluides me paraît un des apports essentiels de MM. WEHRLÉ et DEDEBANT.

La route est maintenant tracée pour écrire les équations du mouvement moyen, où ne figurent que des fonctions \bar{f} et des paramètres statistiques des variables aléatoires f' ; je ne puis ici entrer dans les détails. Je me contenterai d'indiquer le rôle joué dans cette Mécanique de la Turbulence par un *principe de moindre dissipation*: dans un mouvement stationnaire, l'arrangement des vitesses des particules à l'échelle considérée doit être tel que l'énergie dissipée par les forces de frottement soit minima; au point de vue statistique cette distribution des vitesses doit d'ailleurs correspondre à *l'état le plus probable du système*. Ce principe à priori a déjà reçu la sanction de plusieurs vérifications. A l'échelle du globe terrestre il conduit à un schéma de la circulation générale dont l'accord qualificatif et quantitatif avec l'expérience est meilleur que ne pouvaient le laisser espérer les hypothèses simplificatrices (globe terrestre parfaitement lisse, etc.).

* * *

Pour montrer une autre face de notre activité il me reste à donner un aperçu de quelques-unes de nos recherches expérimentales.

Jusqu'à présent on s'est presque toujours contenté de tarer les anémomètres selon une méthode qu'on pourrait appeler statique, en les plaçant dans un courant d'air à vitesse uniforme; mais on possède très peu de résultats sur la manière dont ils réagissent dans un courant d'air à vitesse variable; cette étude paraît cependant la préface indispensable de toute recherche sérieuse sur la turbulence; quel crédit accorder à une courbe anémométrique, lorsqu'on ne connaît pas dans quelles limites elle déforme la réalité?

Les recherches les plus importantes ont été effectuées par WILHELM SCHMIDT, mais il a dû malheureusement se borner à des variations de vitesse, beaucoup trop lentes, pour notre objet, de l'ordre d'une dizaine de secondes, obtenues en imprimant des pulsations d'ensemble à la vitesse d'une soufflerie.

Une des premières décisions de la Commission de la turbulence atmosphérique a été la création, à la grande Soufflerie de l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille, d'un équipement complet pour l'étude du comportement d'un anémomètre dans un courant d'air à

vitesse rapidement variable. Ce matériel se compose de deux appareils.

Le 1^{er} appareil a pour but de résoudre le problème suivant : sachant que le courant d'air passe par une série de maxima et de minima, dont la période est connue, comment réagit l'anémomètre.

Il est évident que pour chaque type d'anémomètre existe une période minima au-dessous de laquelle il ne réagit plus ; pour certaines périodes il peut d'autre part se produire en vertu des phénomènes de lancer, une résonance critique. Le dispositif très simple, dont l'idée est due à M. ANDRÉ MARTINOT-LAGARDE, consiste en une hélice coupe-vent, qui tourne dans la veine de la Soufflerie en avant de l'anémomètre dans un plan normal à l'axe de la Soufflerie ; elle fait périodiquement varier la vitesse du courant d'air frappant l'anémomètre, qui se trouve tantôt dans le courant général de la Soufflerie, tantôt dans le sillage de la pale ; en réglant la vitesse de rotation de l'hélice on peut réaliser toute période inférieure à 30 sec., la durée de passage d'une pale étant dans ce cas limite de 4,2 sec.

Le 2^e appareil permet d'étudier l'effet d'une rafale brusque sur l'anémomètre ; on le place sur un chariot se déplaçant perpendiculairement à la veine de la Soufflerie ; il part d'une vitesse nulle et passe à la vitesse constante du jet de la Soufflerie en traversant une couche limite entourant cette veine, dont l'épaisseur ne dépasse pas 0,25 mètre ; en réglant la vitesse du chariot (variable de 0,10 à 1,50 m./sec.) et la vitesse du courant d'air dans la veine (de 0 à 65 m./sec. on peut réaliser à volonté une rafale d'amplitude et d'accélération données.

Les différents types d'anémomètres en service dans les stations météorologiques ont été successivement soumis à cet ensemble de tests ; en outre on s'est servi de l'installation pour mettre au point un nouvel appareil.

Cet appareil (fig. 1) que nous appelons un anémoclinomètre, a été étudié et réalisé à l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille ; il détermine le vecteur vitesse du vent en grandeur et en direction, au moyen de la mesure de trois différences de pression :

- a) la différence, entre la pression totale P_T prise au col d'un Venturi dont l'axe perce horizontalement la sphère et une pression de référence P_S définie par un ensemble de trous

répartis uniformément sur toute la surface de la sphère, donne la valeur de la vitesse V par la formule;

$$P_T - P_S = 1,4 q \quad (a)$$

$$q = \text{pression dynamique} = \rho \frac{V^2}{2}$$

b) la différence entre les pressions P_D et P_G de deux trous placés symétriquement par rapport à l'axe du Venturi dans un plan horizontal donne l'azimut A :

$$P_D - P_G = 0,05 q A$$

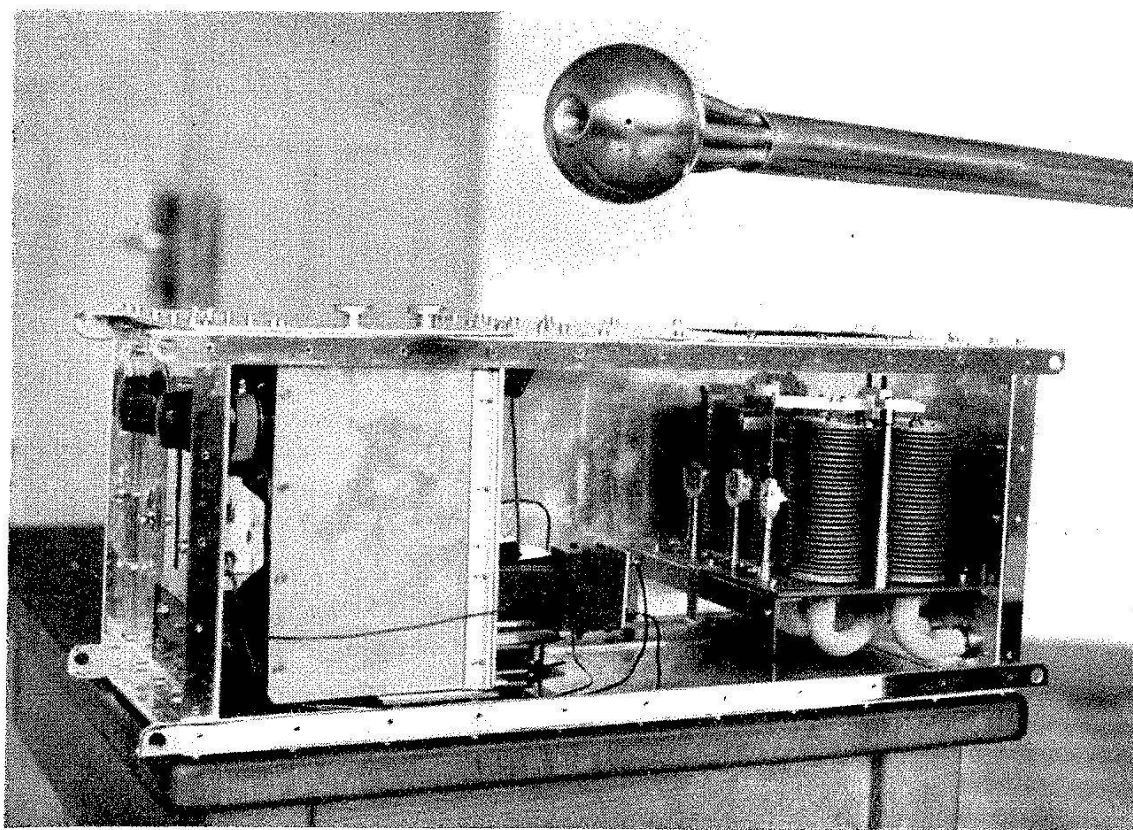


Fig. 1

c) la différence entre les pressions P_H et P_B de deux trous placés de la même façon que les précédents, mais dans un plan vertical donne le site S :

$$P_H - P_B = 0,05 q S$$

L'avantage essentiel de l'anémoclinomètre, par rapport aux autres appareils similaires, réside dans l'idée, due à mon collaborateur M. ANDRÉ MARTINOT-LAGARDE, de placer la prise de pression totale P_T au col d'un Venturi: la mesure de la grandeur de la vitesse est ainsi rendue indépendante dans de larges limites de ses variations de direction; en effet le coefficient de q dans la formule (a)

ne varie pas de plus de 3 % tant que le vecteur vitesse ne fait pas avec l'axe du Venturi un angle supérieur à 45°. Les sphères simplement percées de trous, qui avaient été utilisées antérieurement par quelques chercheurs, étaient pratiquement inutilisables, car le dépouillement nécessitait des approximations successives, la mesure de la grandeur et de la direction de la vitesse réagissant mutuellement l'une sur l'autre.

Cette propriété caractéristique, laissant la latitude au vecteur vitesse de se déplacer à l'intérieur d'un angle de 90° dans les deux plans horizontal et vertical, permet dans les études aérologiques, après avoir orienté l'anémoclinomètre dans la direction moyenne du vent, de la laisser fixe sans avoir besoin de le monter sur une girouette, comme c'est le cas pour l'anémomètre classique à dépression de DINES.

Le type actuel a fait l'objet d'une mise au point approfondie de la part de mon collaborateur M. ROLLIN, qui a étudié ses caractéristiques (durée de réponse, sensibilité, etc.) au moyen de l'installation décrite plus haut; il a aussi déterminé les diamètres optima pour l'ouverture du Venturi, les paires de trous horizontale et verticale, les tuyaux qui conduisent aux manomètres. Il a mis au point un manomètre triple à enregistrement optique qui donne sur une seule bande de papier sensible à grande vitesse de déroulement, les trois courbes V, A, S; le seuil de l'anémoclinomètre est de 0,1 sec.

Parmi les très nombreuses recherches effectuées au Centre National de Vol Sans Moteur de la Banne d'Ordanche (près de la Bourboule, en Auvergne) je dois faire une place toute spéciale aux mesures en vol, effectuées sur l'initiative et sous la direction de M. l'Ingénieur en chef DUPONT; les résultats obtenus au cours des premiers essais, en 1936,¹ qui ont comporté 16 séances de vol d'une durée totale d'environ 25 heures, sont déjà suffisamment fructueux pour que l'avion-laboratoire apparaisse dès maintenant comme un des moyens d'investigation les plus puissants que possède la Commission.

L'avion équipé était un multiplace bimoteur POTEZ 540 choisi à cause de ses dimensions importantes (envergure 22,2 m., masse

¹ Une nouvelle campagne a eu lieu en 1937 avec un matériel encore perfectionné et trois avions: Potez 54, Potez 25, Potez 58; M. DUPONT publiera prochainement le Compte rendu détaillé de ses recherches.

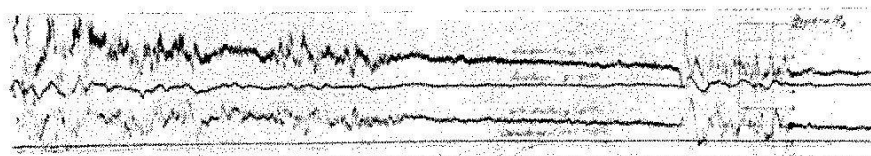
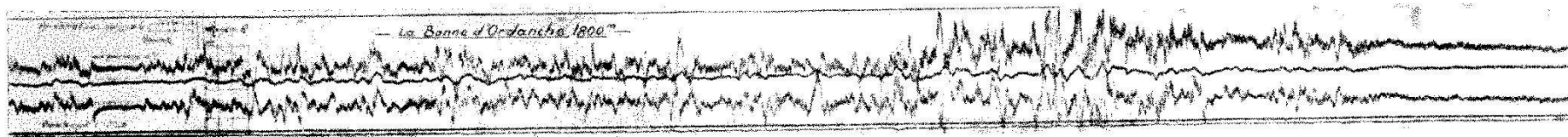
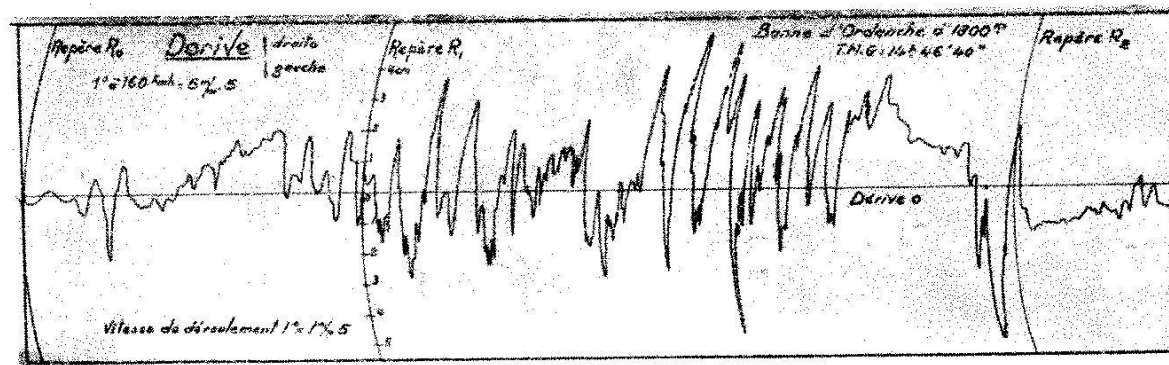
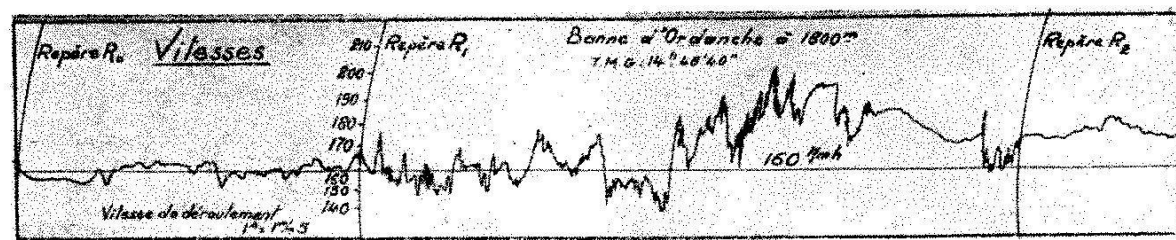


Fig. 2

7 tonnes) et surtout de sa grande stabilité, en vue de séparer facilement la part des perturbations atmosphériques et des réactions de l'appareil; il emportait les instruments suivants:

- a) Un accélérographe BAUDOUIN, comportant trois lames de quartz piézoélectrique, mesurant les accélérations instantanées parallèlement à l'axe de giration de l'avion; une des lames était placée sur le plancher de l'avion, au voisinage du centre de gravité, les deux autres aux extrémités de chaque aile.
- b) Un anémoclinomètre porté par une hampe de 1,20 m. environ en avant du fuselage; il mesurait, en ce point la grandeur de la vitesse relative de l'air et les deux angles d'incidence et de dérapage.
- c) Un appareil Askania enregistrant sur la même bande sensible, quatre spots correspondant à la mesure de: la pression (altimètre); la vitesse (Venturi); la température (thermomètre à résistance); l'inclinaison de l'appareil par rapport à la verticale (pendule amorti).
- d) Un météorographe O. N. M. mesurant la température, la pression et l'état hygrométrique.

En outre l'Observateur, placé dans la tourelle avant, photographiait le ciel à intervalles très rapprochés, de manière à pouvoir reconstituer le déroulement de ses aspects caractéristiques.

Le programme des essais a comporté:

- 1° Le survol fréquent de la *Banne d'Ordanche* (1467 m. d'altitude) à des hauteurs allant de 100 à 500 mètres dans quatre directions croisées de manière à étalonner les mesures faites en vol par rapport aux mesures des appareils similaires placés au sol.
- 2° Des vols de longue durée, au-dessus de contrées variées, pour dégager l'évolution de la turbulence en fonction de l'orographie; dans ce but l'avion a accompli, en partant de Clermont-Ferrand, les voyages suivants: *Pau; Lyon; Marignane; Marignane - Istres - Porquerolles - Marignane; Marignane - Clermont-Ferrand.*
- 3° Des vols d'exploration au-dessous, autour et à l'intérieur des nuages de convection: cumulus et cumulo-nimbus; trois séances ont été consacrées à cette recherche.

La figure 2 montre un exemple des enregistrements fournis par l'anémoclinomètre et par l'accélérographe (bande inférieure de la

figure, plus longue que les autres, car la vitesse de déroulement était plus grande que celle des manomètres enregistreurs Richard).

La figure 2 se rapporte à un passage de l'avion à 300 m. au-dessus de la crête Puy-Loup-Banne d'Ordanche, dans une violente bourrasque où la vitesse du vent au sol atteignait 25 m./sec. L'intensité des rafales est mise en évidence par la courbe de vitesse de l'anémoclinomètre qui saute brusquement de 140 à 190 km./h., tandis que la dérive oscille rapidement à plusieurs reprises entre -8° et $+8^{\circ}$. Pour l'accélérographe un déplacement de 1 cm. du spot (l'échelle de la reproduction est donnée par un quadrillage, près du repère R, dont les mailles ont 1 cm.) correspond à g.; la courbe médiane donne l'accélération du centre de gravité; les deux autres les accélérations en bout d'aile. Au passage le plus critique, on voit que l'avion ayant une accélération générale égale à 1 g., amorce un mouvement de rotation très rapide autour de son axe longitudinal, une des ailes accusant une accélération de $+4$ g. 5, l'autre de -4 g. 5.

Au cours d'un des vols l'avion volant contre le vent dans une bourrasque de NW, le 27 septembre, au-dessus des monts du Forez, dans la région d'Ambert, essaya de franchir le col de la Croix de l'Homme Mort, au-dessous de nuages de pluie traînant très bas sur la ligne de crête, mais pris dans le rabattant du col et se trouvant trop bas pour le franchir, le pilote, environ 50 m. avant le col « enleva » brusquement son appareil sur une aile pour le faire virer; au cours de cette manœuvre l'enregistrement montre que l'accélération atteignit $+10$ g. sur l'aile haute

* * *

J'indiquerai enfin comment, depuis 1933, j'ai systématiquement utilisé les nuages comme méthode de visualisation des mouvements atmosphériques, méthode évidemment critiquable puisque la présence du nuage perturbe l'atmosphère, mais néanmoins très intéressante puisqu'elle est la seule à pouvoir nous donner des renseignements sur les mouvements d'une portion suffisamment étendue de l'atmosphère.

L'application du cinéma à l'enregistrement des mouvements des nuages date du début de la technique cinématographique; il serait donc trop long d'en faire ici l'historique.

Les mouvements des masses nuageuses s'effectuent à la vitesse de quelques mètres par seconde et s'observent en général à des distances de plusieurs kilomètres; contrairement à ce qui se passe pour la plupart des phénomènes de Mécanique des Fluides observés dans les Laboratoires, il y a intérêt à accélérer ces mouvements.

En prenant un film à une cadence très lente (depuis une vue toutes les secondes jusqu'à une vue toutes les 10 secondes) la projection normale (20 vues par seconde) accélère de 20 à 200 fois l'évolution des nuages observés.

J'ai effectué des campagnes de recherches successivement en Savoie, en Auvergne, dans l'Oberland Bernois et dans le Haut-Valais; je me suis attaché aux trois objets suivants:

- 1° Etude des mouvements des cumulus dont la formation est due principalement à des ascendances d'origine thermique (film réalisé à la Banne d'Ordanche, Auvergne, en vue de documenter le centre National de Vol sans Moteur);
- 2° étude des mouvements périodiques qui animent les tours cumuliformes dominant une mer de nuages (film réalisé en Haute-Savoie autour du Mont Blanc et dans l'Oberland Bernois à la Station Scientifique du Jungfraujoeh);
- 3° étude de l'écoulement autour d'une montagne isolée de forme géométrique très simple (film réalisé au Mont Cervin).

Sur chacun de ces films on a pointé le déplacement de certains détails fins de la masse nuageuse, bien identifiables d'une vue à la suivante; on en déduit facilement un faisceau de trajectoires des particules d'air atmosphérique.

L'étude de l'écoulement autour du Mont Cervin s'est montrée particulièrement fructueuse à cause de la forme simple de cette montagne, d'une pureté presque géométrique; le Cervin est en effet une pyramide à 4 faces (sommet 4505 m.), avec arêtes presque rectilignes et des faces quasi-planes posée sur un socle bien dégagé et relativement plat (2000 à 2500 m.).

Par vent du secteur N à W un nuage de sillage manifeste un premier rouleau tourbillonnaire d'une épaisseur d'environ 500 m. dont la branche descendante est à 2 km. du sommet; au delà s'étend un second rouleau très net dont le centre est vers 4 km.; en outre, dans la partie inférieure de la face au vent se déroule un tourbillon hélicoïdal analogue aux tourbillons marginaux des ailes d'avions.

On a confronté les résultats des films avec des essais sur une maquette de 0,40 m. de haut dans la grande soufflerie de l'Institut de Mécanique des Fluides de Lille, l'accord a été tout à fait remarquable.¹

Une grande partie de ces recherches ayant été accomplies dans vos belles montagnes, pour lesquelles mon amour est fervent, j'acquitterai donc une part de ma dette de reconnaissance pour l'hospitalité si aimablement accordée à un chercheur français, en vous projetant quelques-unes des bandes réalisées autour du *Mont Cervin*. C'est par là que je terminerai ce voyage à vol d'oiseau à travers mon vaste sujet, bien heureux si j'ai pu vous convaincre de l'intérêt des problèmes que nous nous efforçons de résoudre.

¹ J. KAMPÉ DE FÉRIET: Atmosphärische Strömungen. Wolkenstudien nach Kinaufnahmen im Hochgebirge (Jungfrau und Matterhorn). (Meteorologische Zeitschrift, 1936, p. 271—280.) Voir aussi les écrits plus détaillés de mon collaborateur A. DESCAMPS. Sur l'exploration en Soufflerie d'une maquette du Cervin. (Association des Ingénieurs de l'Ecole des Mines de Mons, 1937, 1^{er} fascicule, n° 60.) Une campagne d'étude des courants aériens à la Station scientifique du Jungfraujoch (idem 1937, 2^e fascicule, n° 61).