

F. RESCH ET M. COANTIC \*

## ÉTUDE SUR LE FIL CHAUD ET LE FILM CHAUD DANS L'EAU

### I. — Introduction

L'anémothermomètre à fil chaud est, depuis plusieurs dizaines d'années, l'instrument principal des recherches sur la structure des écoulements turbulents d'air. En effet, par suite de ses très faibles dimensions, de sa constante de temps très réduite et des progrès réalisés dans son emploi, il permet d'accéder aux échelles de turbulence les plus fines et de déterminer avec précision le niveau des processus de transfert, diffusion et dissipation qui gouvernent l'aérothermodynamique de ces écoulements.

Aucun des appareils classiques de mesures hydrauliques ne possédant des performances comparables, l'on ne dispose encore que de peu de données sur la structure fine des écoulements turbulents d'eau. Il était donc intéressant de chercher à étendre à ce nouveau domaine la méthode du fil chaud, mais les premières tentatives effectuées en ce sens se sont heurtées à des difficultés telles que l'on a souvent considéré l'application du fil chaud aux problèmes d'hydraulique comme étant impossible.

Cependant, les études systématiques poursuivies dans plusieurs laboratoires et la fabrication de sondes spécialement destinées aux mesures dans l'eau ont permis de tels progrès au cours de ces dernières années que l'on peut penser que l'hydraulique va maintenant bénéficier de développements analogues à ceux qu'a connus l'aérodynamique grâce à l'anémomètre à fil chaud.

Le but du travail que nous avons entrepris était donc de contribuer à la mise au point de méthodes de mesure, par anémothermomètres à fil ou à film chaud, des valeurs moyennes et des fluctuations turbulentes de la vitesse d'un écoulement d'eau; et ceci avec une précision comparable à celle des mesures effectués dans l'air. Les principaux résultats auxquels cette étude a permis d'aboutir sont résumés ici, un exposé plus détaillé pouvant être trouvé dans un mémoire de thèse (Resch, 1968).

Ces recherches ont été poursuivies à l'Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence de la Faculté des Sciences de Marseille, sous la direction de M. le Professeur Favre à qui nous exprimons notre sincère reconnaissance. Elles ont bénéficié de l'aide du Commissariat à l'Energie Atomique (Service de la pile *Cabri* du Centre d'Etudes Nucléaires de Cadarache), de la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique, et du Centre National de la Recherche Scientifique, que nous prions d'agréer l'expression de notre vive gratitude.

### II. — La méthode anémométrique et les difficultés de son adaptation aux mesures dans l'eau

#### 1. Principe de la méthode.

L'anémothermomètre à fil ou à film chaud comporte un élément sensible porté à une température supérieure à celle du fluide environnant par passage d'un courant électrique. Sa résistance variant en fonction de sa température, et son refroidissement par convection étant fonction de la vitesse et

\* Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence de la Faculté des Sciences de Marseille, Laboratoire associé du C.N.R.S.

de la température de l'écoulement, un montage électrique approprié permet de traduire toute variation de ces dernières grandeurs en une variation de tension.

2. Les divers types de sondes.

L'élément sensible des sondes « à fil chaud » est constitué d'un fil de platine ou de tungstène, de 1 à 20 μ de diamètre et 0,2 à 10 mm de longueur, soudé entre deux broches servant de support et de connexion électrique. Les sondes « à film chaud » comportent un corps de sonde en verre ou plexiglas, de forme variable (cylindre, cône, dièdre, etc.), sur lequel est déposé un mince film de platine, raccordé à des contacts d'alimentation généralement noyés dans le corps de sonde. L'élément sensible est parfois isolé électriquement du fluide ambiant par une très mince couche de quartz.

3. Les modes d'utilisation.

Les deux principaux modes d'utilisation des fils et films chauds sont [voir, par exemple, Hinze (1959)] :

— le mode « à intensité constante » où le courant I de chauffage de l'élément est maintenu constant, mais sa température  $\theta_w$  et donc sa résistance

$$R_w = R_0 (1 + \lambda \theta_w) \quad (1)$$

et la tension  $E = IR_w$  à ses bornes varient;

— le mode « à température constante » ou « à résistance constante », dans lequel un circuit asservit le courant de chauffage I de façon à ce que la résistance  $R_w$  et la température  $\theta_w$  de l'élément sensible demeurent pratiquement constantes.

Pour un fil chaud utilisé à intensité constante dans un écoulement présentant des fluctuations, l'inertie thermique de l'élément sensible introduit une erreur qu'il est possible de compenser par un circuit électronique convenable [voir, par exemple, Gaviglio (1958)]. Pour un film chaud placé dans les mêmes conditions, les variations du transfert thermique de l'élément à son support constituent une cause supplémentaire d'erreur à laquelle il semble très difficile de remédier [voir Bouvard et Dumas (1967)]. C'est donc le mode d'utilisation à température constante qui a été retenu ici pour la plupart des expériences.

4. La loi de refroidissement de l'élément sensible.

La connaissance de cette loi est nécessaire si l'on veut relier les variations de tension observées aux bornes de l'élément sensible à celles des paramètres de l'écoulement que l'on cherche à mesurer. D'après l'analyse dimensionnelle des équations gouvernant le transfert de chaleur [voir, par exemple, Bird, Stewart et Lightfoot (1960)], cette loi s'exprime, pour une sonde déterminée, par une relation entre des grandeurs sans dimensions, les nombres de Nusselt, Reynolds, Prandtl et Grashof :

$$\mathcal{N} = \mathcal{N}(\mathcal{R}, \mathcal{P}, \mathcal{G}) \quad (2)$$

avec :

$$\mathcal{N} = Hd/SK (\theta_w - \theta_f), \text{ nombre de Nusselt} \quad (3)$$

$$\mathcal{R} = Vd\rho/\mu, \text{ nombre de Reynolds} \quad (4)$$

$$\mathcal{P} = \mu C_p/K, \text{ nombre de Prandtl} \quad (5)$$

$$\mathcal{G} = g\rho^2 d^3 \beta (\theta_w - \theta_f)/\mu^2, \text{ nombre de Grashof} \quad (6)$$

H : puissance thermique échangée entre l'élément et le fluide, égale à tout instant, dans le mode à température constante, à la puissance thermique apportée par effet Joule :  $W = R_w I^2$ , diminuée éventuellement d'une déperdition constante au profit du support;

d : dimension caractéristique de l'élément sensible;

S : surface de cet élément;

K : conductivité thermique du fluide;

$\theta_w, \theta_f$  : températures de l'élément et du fluide;

V : vitesse du fluide;

$\rho$  : masse spécifique du fluide;

$\mu$  : viscosité du fluide;

$C_p$  : chaleur spécifique à pression constante du fluide;

g : accélération due à la pesanteur;

$\beta$  : coefficient de dilatation du fluide.

A titre d'exemple, pour un fil chaud d'allongement suffisant, la loi de refroidissement peut [cf. Hinze (1959)] être représentée dans le domaine courant d'utilisation par la relation :

$$\mathcal{N} = 0,42 \mathcal{P}^{0,22} + 0,57 \mathcal{P}^{0,33} \mathcal{R}^{0,50} \quad (7)$$

Il faut noter que les caractéristiques physiques du fluide entrant dans les relations précédentes, qui sont généralement fonction de la température, doivent être prises à une valeur convenable de cette dernière : la « température de film », qui est intermédiaire entre la température de l'élément sensible et celle du fluide environnant. Comme nous le verrons par la suite, ce point est d'une grande importance pour les mesures effectuées dans l'eau. On adopte souvent :

$$\theta_{film} = (\theta_w + \theta_f)/2 \quad (8)$$

5. Les problèmes particuliers posés par les mesures dans l'eau.

L'emploi des fils et films chauds dans l'eau rencontre, comme nous l'avons déjà signalé, des difficultés particulières dont l'étude préalable était nécessaire pour guider les recherches entreprises. Les causes d'erreurs sont nombreuses et leur effets peuvent être une dérive plus ou moins régulière ou des fluctuations erratiques de la tension aux bornes de la sonde et parfois même la destruction de cette dernière. D'après l'ensemble des travaux antérieurs (\*), les principaux facteurs pouvant affecter la stabilité des mesures sont les suivants :

(\*) Les données dont on disposait au départ de cette étude résultaient principalement des travaux de Ling (1960), Bankoff et Rosler (1962), Sabin (1963), Uskan et Reynolds (1963), Runstadler (1963), Grant (1964), Lindgren (1965), Delleur, Toebes et Liu (1966), Fabula (1966) et des documents techniques publiés par les établissements Disa, Flow Corporation et Thermo-Systems. Des résultats plus récents ont été publiés, notamment par Bouvard et Dumas (1967), McQuivey (1967), Patterson et Zakin (1967), Richardson et McQuivey (1968), Delhaye et Chevrier (1968).

- a) la conductivité de l'eau qui, si elle est trop élevée, permet le passage de courants parasites qui s'accompagnent d'effets électrochimiques;
- b) la présence de champs électriques ou magnétiques vagabonds;
- c) les impuretés chimiques en solution, qui provoquent des corrosions ou entraînent la formation de dépôts;
- d) le dégagement de l'air et des gaz dissous sous forme de bulles qui isolent l'élément sensible du fluide;
- e) la formation de bulles de vapeur d'eau sur la surface de la sonde;
- f) les phénomènes de cavitation;
- g) les particules et filaments en suspension dans l'eau qui peuvent se déposer sur la sonde ou au contraire l'éroder, la déformer et même la briser;
- h) la fissuration des films de platine et de leurs revêtements de quartz, qui résulte d'une fabrication défectueuse ou de variations de température excessives et entraîne des dérives de la résistance à froid de la sonde.

Des techniques expérimentales permettant de lutter efficacement contre ces différentes sources d'erreurs ont été mises au point :

- l'utilisation d'une eau préalablement traitée, et la réalisation des circuits hydrauliques en matériaux résistant aux attaques chimiques réduisent les inconvénients résultant des facteurs *a*, *b*, *c*;
- pour des sondes nues, il y aura en outre avantage à limiter la surface du métal en contact avec l'eau et à veiller à ce que cette surface ne comporte qu'un seul métal, choisi aussi noble que possible;
- l'emploi des revêtements en quartz est d'une grande efficacité, non seulement pour réduire ou supprimer les effets des facteurs *a*, *b*, *c*, mais encore pour lutter contre la contamination ou l'érosion des films. La réponse en fréquence est peu affectée, mais il faut veiller aux inconvénients signalés en *h*;
- le chauffage de l'élément par un courant alternatif de fréquence élevée pourrait être intéressant;
- la forme de la sonde est un facteur important : les poussières ne doivent pas être retenues et les bulles doivent être rapidement évacuées. Par contre, la solidité des fils chauds n'est généralement pas un problème sérieux, compte tenu du fait que leur allongement peut être réduit sans inconvénient. Cependant, pour une eau chargée, il y a avantage à employer des sondes à films chauds;
- pour lutter contre les facteurs *e* et *f*, il y a intérêt à disposer d'une eau dégazée, mais surtout il est indispensable de limiter la température de l'élément sensible à la valeur la plus faible possible compatible avec les exigences de sensibilité. Pour cette raison, et aussi afin de limiter les courants de chauffage à des valeurs acceptables, les coefficients de surchauffe adoptés pour les mesures dans l'eau sont en général de l'ordre de 0,03 à 0,10 seulement.

## 6. Les effets des variations de la température de l'eau.

A partir des relations qui ont été rappelées en II.4, l'on peut aisément montrer que l'effet d'une variation de la température du fluide sur la tension aux bornes d'un fil ou film chaud est double :

— un effet direct correspondant à la variation de l'écart de température  $\theta_w - \theta_f$  entre l'élément et le fluide;

— un effet indirect résultant des variations des caractéristiques physiques du fluide, qui sont fonction de  $\theta_{\text{film}}$ , et donc de  $\theta_f$ .

Pour des mesures dans l'air, l'écart de température  $\theta_w - \theta_f$  est généralement élevé, et les caractéristiques physiques dépendent peu de la température. Pour des variations modérées de  $\theta_f$ , les seconds nombres des relations du type (7) sont donc pratiquement constants et la tension *E* aux bornes de l'élément peut être ramenée à la valeur  $E_n$  qu'elle aurait pour la « température nominale »  $\theta_{fn}$  du fluide par une correction peu importante. Dans le mode « à température constante », celle-ci est de la forme :

$$E_n = E [(\theta_w - \theta_{fn}) / (\theta_w - \theta_f)]^{1/2} \quad (9)$$

Il en va tout autrement lorsque les mesures sont effectuées dans l'eau. En premier lieu, l'écart  $\theta_w - \theta_f$  étant limité à quelques degrés C, une faible variation de la température du fluide aura des effets relatifs importants. Par ailleurs, certaines des caractéristiques physiques de l'eau, et notamment sa viscosité, varient fortement avec la température. Les corrections à appliquer aux mesures sont donc importantes, et leur détermination par voie théorique est délicate car, à  $\theta_w$  et  $\theta_f$  données,  $\theta_{\text{film}}$  peut dépendre de la vitesse. Il est donc nécessaire, soit de maintenir la température de l'eau constante avec une grande précision, soit de procéder à la détermination expérimentale des effets de la variation de cette température sur la réponse de la sonde utilisée.

## 7. Etalonnage et détermination de la sensibilité des sondes.

L'utilisation pratique des sondes anémothermométriques nécessite :

- pour la mesure des vitesses et températures moyennes du fluide, la connaissance de la « surface caractéristique » de la sonde :

$$E = E(V, \theta_f) \quad (10)$$

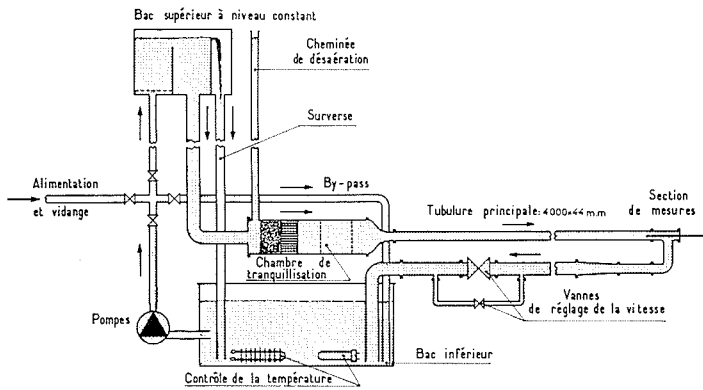
- pour la mesure des fluctuations turbulentes  $v'$ ,  $\theta'$  de ces mêmes grandeurs, la connaissance des « coefficients de sensibilité » à la vitesse, *S*, et à la température, *T*, de cette sonde, définis par :

$$e' = Sv' + T\theta' \quad (11)$$

soit, au premier ordre, par :

$$S = \left( \frac{\partial E}{\partial V} \right)_{\theta_f}, \quad T = \left( \frac{\partial E}{\partial \theta_f} \right)_V \quad (12)$$

En principe, ces quantités peuvent être déterminées par le calcul à partir de la loi de refroidissement de l'élément sensible. Ainsi, pour un fil chaud utilisé dans l'air à température constante, on déduit de (7) la classique « loi de King » :



1/ Schéma de la soufflerie tubulaire à eau.  
Diagrammatic layout of tubular water tunnel.

$$E^2/R_w = (R_w - R_f) (A + B V^{0,50}) \quad (13)$$

$R_f$  étant la résistance du fil à la température  $\theta_f$  et A et B des constantes. En supposant infinie la transconductance de l'amplificateur d'asservissement, les sensibilités S et T sont données par :

$$S = \frac{R_w - R_f}{4 \cdot I} B V^{-0,50} \quad (14)$$

$$T = - (R_0/2 \cdot I) (A + B V^{0,50}) \quad (15)$$

Les constantes qui apparaissent dans les relations précédentes doivent en fait être déterminées expérimentalement : c'est le but de l'étalonnage des sondes. Dans le cas présent, où les effets de la température du fluide sont difficiles à prévoir et où la loi de refroidissement de certains types de sondes n'est pas connue, il faudra même avoir recours à la méthode purement expérimentale proposée notamment par Gaviglio (1958). La surface caractéristique de chaque sonde est alors relevée expérimentalement et les coefficients de sensibilité sont calculés par dérivation numérique ou graphique de cette surface. La recherche de relations du type (7) reste cependant intéressante car elle facilite ensuite les opérations de tarage et le dépouillement des mesures.

### III. — Description de l'appareillage expérimental

#### 1. Le soufflerie tubulaire à eau.

Le but de cette installation était de permettre :

- l'étalonnage des sondes, en les soumettant à un courant d'eau dont la pureté, la vitesse et la température soient contrôlées. L'eau devait pouvoir être filtrée, désaérée et déminéralisée; la vitesse ajustée à volonté à des valeurs comprises entre quelques centimètres et quelques mètres par seconde; la température maintenue constante ou au contraire modifiée dans un intervalle d'une vingtaine de degrés;
- l'exécution, à titre de contrôle de la méthode, de mesures des fluctuations turbulentes dans un écoulement d'eau de caractéristiques déjà connues à la suite d'expériences effectuées dans l'air

dans les conditions de la similitude dynamique. L'écoulement turbulent pleinement développé dans une conduite cylindrique de section circulaire, dont les caractéristiques ont été déterminées avec précision [cf. Coantic (1966)], a été adopté dans ce but.

Le principe d'un fonctionnement en circuit fermé entre deux bacs à niveau constant a été retenu. L'installation réalisée est schématisée sur la figure 1. Un système de pompes, vannes de réglage et tuyauterie de by-pass alimente, sous débit variable, un bac supérieur muni de chicanes de tranquillisation et d'un dispositif de niveau constant par surverse. Une tuyauterie de forte section réunit ce bac à une chambre de tranquillisation comportant un système de répartition et d'uniformisation du débit et deux filtres antiturbulence à mailles de 1 mm. Après avoir traversé un convergent profilé, l'écoulement s'engage ensuite dans la tubulure principale, de 44 mm de diamètre et 4 000 mm de longueur, à l'extrémité de laquelle sont effectuées les mesures. Une tuyauterie de retour, munie de deux vannes à membrane pour le réglage grossier puis l'ajustement fin des vitesses, ramène enfin l'eau au bac inférieur qui sert de réserve et où la température est contrôlée à l'aide d'un circuit de réfrigération et d'une résistance de chauffage. L'installation a été entièrement réalisée en polychlorure de vinyle et en plexiglas, à l'exception de quelques éléments métalliques qui ont été soigneusement protégés contre la corrosion; elle est alimentée avec une eau filtrée et qui peut être déminéralisée par passage sur des résines échangeuses d'ions. La désaération s'effectue à la surface des bacs et grâce à une cheminée disposée à l'entrée de la chambre de tranquillisation.

La vitesse varie entre 0,03 et 3,50 m/s, le nombre de Reynolds de l'écoulement dans la tubulure variant entre 1 300 et 150 000. La température varie entre 14 et 32 °C et peut être contrôlée à  $\pm 0,05$  °C près. La résistivité de l'eau a été maintenue, lors de l'utilisation de sondes non revêtues, à des valeurs supérieures à 100 000 ohms/cm<sup>3</sup>.

#### 2. Les dispositifs de mesure des grandeurs moyennes.

Des prises de pression statique ont été disposées le long de la tubulure ainsi que dans les sections d'entrée et de sortie du convergent qui peut ainsi jouer le rôle de Venturi. Une sonde de pression totale, de géométrie voisine de celle des sondes à fils et films chauds, peut être disposée à l'emplacement de ces dernières. Après étalonnage de l'ensemble, la vitesse au droit d'une sonde se déduit ainsi directement de la dépression statique mesurée au convergent.

Pour la mesure des pressions, des manomètres différentiels à eau fonctionnant suivant le principe du tube en U inversé ont été réalisés. Leur précision, voisine de  $\pm 0,5$  mm, peut être portée à  $\pm 0,1$  mm par un dispositif optique.

La température est déterminée à l'aide d'un thermomètre gradué en 1/10<sup>e</sup> de °C.

#### 3. Les appareillages anémométriques.

Les sondes à fils et films chauds ont été alimentées, soit à partir d'un circuit à intensité constante

réalisé à l'I.M.S.T., soit le plus souvent à partir d'un anémomètre à température constante DISA 55 A 01. Les mesures du spectre de la turbulence ont été effectuées à l'aide d'un analyseur réalisé suivant le schéma proposé par Dumas (1962) ou à l'aide d'un appareil QUAN-TECH modèle 304. Pour les très basses fréquences, le signal a été accéléré par enregistrement et reproduction magnétiques.

**IV. — Etude de sondes à fils chauds**

Plusieurs modèles de sondes anémométriques à fil chaud ont été successivement réalisés (\*) et soumis à des essais systématiques qui ont permis d'en améliorer la fabrication et de parvenir à une méthode de mesure utilisable. Cette mise au point a été effectuée au prix de nombreuses tentatives infructueuses, mais nous n'en rappellerons ici que les principales étapes.

**1. Les premiers modèles de sondes.**

Leur constitution était identique à celle des sondes utilisées dans l'air : des fils Wollaston (platine enrobé d'une gaine d'argent) de 7, 5 ou 3 μ étaient

(\*) Par M. P. CHAMBAUD, collaborateur technique au C.N.R.S.

soudés à l'étain sur des broches en acier, puis décapés à l'acide nitrique (voir la figure 2 a). Les courbes caractéristiques de telles sondes correspondent bien, comme le montre la figure 3, à la loi de King, mais leur dérive est très rapide. Cette dérive est due aux effets électrochimiques qui se produisent entre les différents métaux placés au contact de l'eau et qui provoquent l'apparition, en un temps très bref, de dépôts sur l'élément sensible.

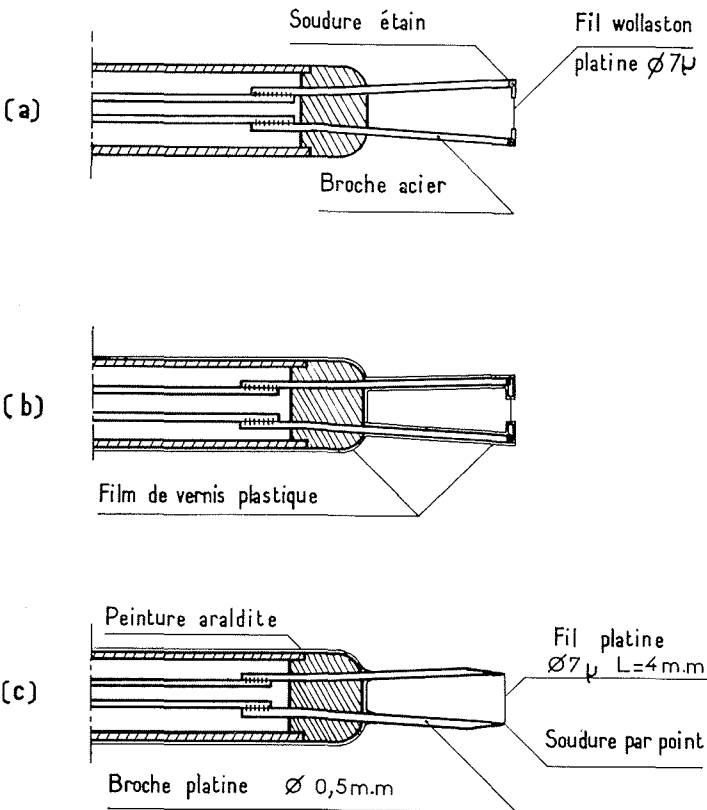
**2. Les seconds modèles de sondes.**

Afin d'éviter ces inconvénients, toute la surface de la sonde, à l'exception de l'élément sensible lui-même, a été revêtue d'un vernis plastique, isolant et hydrofuge. Ce procédé s'est révélé peu efficace, des dépôts continuant à se produire au contact des métaux différents.

**3. Les sondes entièrement en platine.**

Elles sont réalisées à partir de fils en platine pur soudés sans métal d'apport (par décharge de condensateurs) sur des broches du même métal (voir la figure 2 c). Cette technique est une modification de celle préconisée par Uskan et Reynolds, le diamètre du fil étant ramené de 20 à 7 μ et la résistance des soudures par points permettant d'éviter le recouvrement d'époxy.

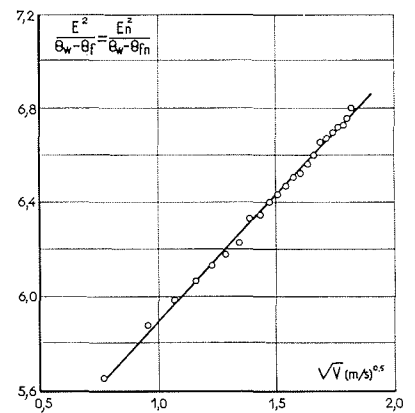
Cette méthode a donné des résultats relativement satisfaisants. Un seul métal étant en contact avec l'eau, les effets électrochimiques sont très réduits et



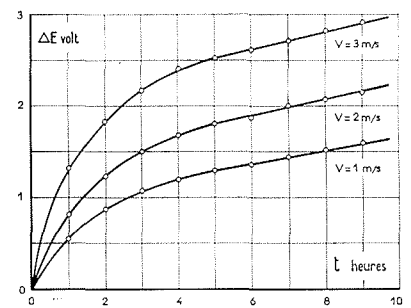
2/ Sondes à fil chaud : (a) premiers modèles, (b) seconds modèles, (c) sondes tout en platine.

Hot wire probes: (a) first types, (b) second types, (c) all-platinum probes.

3/ Vérification de la loi de King pour un fil chaud nu. Verification of King's law for a bare wire.



4/ Dérive dans le temps de la caractéristique d'un fil chaud nu tout en platine. Time drift of an all-platinum bare hot wire characteristic.



l'analyse des dépôts qui sont parfois observés montre qu'il s'agit exclusivement d'oxydes de platine. Une certaine dérive des caractéristiques, vraisemblablement due à des effets mécaniques (encrassage) et à l'attaque par oxydation, subsiste cependant. Plusieurs séries d'essais ont prouvé que cette dérive devenait une fonction linéaire du temps au bout d'un certain nombre d'heures d'utilisation, comme le montre la figure 4. Des mesures précises sont donc possibles pendant un certain laps de temps, à condition de procéder par interpolation linéaire entre un tarage initial et un tarage final.

### V. — Etude de sondes à films chauds

Divers modèles de sondes de fabrication industrielle ont été expérimentés : films nus sur extrémité de dièdre (DISA 55 A 80), films isolés par dépôt de quartz sur extrémité de dièdre (DISA 55 A 81 et Thermo-Systems 1232), sur cylindre (Thermo-Systems 1210), sur cône (Thermo-Systems 1230).

#### 1. Les films chauds non isolés.

Ainsi que l'on pouvait le prévoir, ces sondes ont donné des résultats analogues à ceux qui avaient été obtenus avec des fils en platine pur. La figure 5 présente, à titre d'exemple, les caractéristiques, du type « loi de King », d'une de ces sondes pour deux valeurs différentes de son coefficient de surchauffe. La dérive peut être corrigée, comme précédemment, par une méthode d'interpolation linéaire.

#### 2. Les films isolés sur dièdres et cylindres.

Pour un temps d'emploi limité, la précision des résultats obtenus avec ces sondes est tout à fait acceptable. Après un certain nombre d'heures, une dérive se produit cependant. Elle paraît provenir uniquement du dépôt des particules en suspension dans l'eau sur le bord d'attaque des éléments sensibles. Un simple nettoyage permet, comme le montre la figure 6, de retrouver la caractéristique initiale. La dérive peut d'ailleurs être corrigée d'après une méthode qui sera exposée plus loin.

#### 3. Les films coniques isolés.

Ce dernier type de sonde est celui qui nous a donné les résultats les plus satisfaisants. Le revêtement de quartz paraît protéger efficacement l'élément sensible contre toutes les attaques, et la géométrie de la sonde empêche tout dépôt de particules sur le film. Des mesures poursuivies pendant plus de dix heures consécutives ne font apparaître aucune dérive importante des caractéristiques (voir fig. 7). La résistance de la sonde demeure inchangée après plusieurs mois d'utilisation.

Ceci étant, un étalonnage complet en fonction de la vitesse et de la température de l'eau a été effectué pour une sonde de ce type. La variation de la résistance à froid  $R_f$  du film en fonction de la tem-

pérature  $\theta_f$  de l'eau a été déterminée en premier lieu. Comme le montre la figure 8, une relation de la forme (1) est vérifiée, mais le coefficient  $\lambda$  est égal à 1/345 et non pas à 1/273 qui est la valeur communément adoptée pour le platine. La résistance  $R_w$  et la température  $\theta_w$  du film utilisé obéissent à la relation :

$$R_w = 6,53 (1 + \theta_w/345) \quad (16)$$

La température du film étant maintenue égale à 46,50 °C, les variations de la tension à ses bornes ont ensuite été relevées en fonction de la température  $\theta_f$  et de la vitesse  $V$  du fluide. La figure 9 présente les résultats de cet étalonnage sous la forme de sections par des plans  $V = Cte$  de la surface caractéristique  $E = E(V, \theta_f)$ . La connaissance de cette surface permet, comme on l'a vu en II.7, la détermination des coefficients de sensibilité de la sonde, dont les valeurs ont été portées sur la figure 10.

Ces résultats confirment les remarques faites en II.6 au sujet de l'influence des variations de température sur les mesures anémométriques dans l'eau : dans un cas typique ( $V = 1,5$  m/s,  $\theta_f = 24$  °C), un écart de température de 2 °C a le même effet sur la tension aux bornes du film qu'une variation de vitesse de 0,39 m/s.

### VI. — Correction de la dérive de films isolés

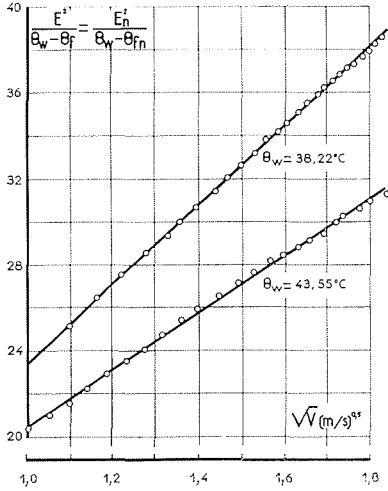
Richardson et MacQuivey (1968) ont proposé une méthode de correction de la dérive des films isolés sur dièdres ou cylindres basée sur l'hypothèse suivante : la diminution du transfert thermique du film au fluide résultant d'un dépôt de particules est équivalente à celle qui résulterait d'un abaissement de la température du film.

Afin de vérifier cette hypothèse, le réseau des caractéristiques  $E = E(V)$  à différentes valeurs du coefficient de surchauffe :

$$a_w = (R_w - R_f)/R_f \quad (17)$$

a été relevé (voir figure 11 a) pour une sonde en dièdre non contaminée. Puis, la sonde ayant été volontairement contaminée par une utilisation prolongée durant une vingtaine d'heures, sa caractéristique a été relevée à nouveau pour la valeur  $a_w = 0,10$  et portée sur le même graphique (courbe en pointillé), où l'on peut constater une nette dérive par rapport à la caractéristique initiale. A partir des résultats précédents, l'on établit alors le réseau des courbes  $E = E(a_w)$  à différentes valeurs de la vitesse (voir fig. 11 b), puis l'on reporte sur chacune de ces courbes le point correspondant à la sonde contaminée. Comme le montre la figure 11 b, le coefficient apparent de surchauffe  $a_w'$  ainsi déterminé reste constant à toutes les vitesses. L'hypothèse de Richardson et MacQuivey est donc vérifiée.

Les caractéristiques d'une sonde ayant été relevées au départ, il suffira donc d'une mesure de  $E(V)$  pour déterminer son coefficient apparent de surchauffe, et par conséquent sa caractéristique et ses sensibilités effectives lorsqu'elle a été contaminée.



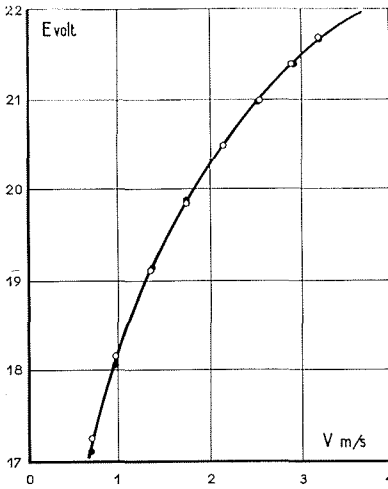
5/ Caractéristiques d'un film chaud non isolé sur dièdre.

Characteristics of a non-insulated hot film on a dihedral.

6/ Caractéristique d'un film chaud sur dièdre, isolé par dépôt de quartz :  
 ○ première série de mesures, après contamination, puis nettoyage.  
 ● deuxième série de mesures, après nettoyage.

Characteristic of a quartz-insulated hot film, on a dihedral :  
 ○ = first series of measurements; ● = second series after contamination and cleaning.

5/



7/ Vérification de la stabilité dans le temps de la caractéristique d'un film conique isolé.  
 Time stability of the characteristic of an insulated conical film.

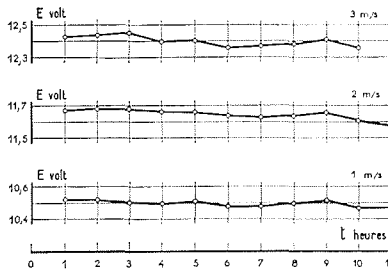
8/ Variation de la résistance à froid d'un film conique en fonction de la température de l'eau.  
 Variation of the cold resistance of a conical film with water temperature.

Variation of the cold resistance of a conical film with water temperature.

9/ Résultats de l'étalonnage d'un film conique en fonction de la vitesse et de la température de l'eau.  
 Results of calibration of a conical film with varying flow velocity and water temperature.

Results of calibration of a conical film with varying flow velocity and water temperature.

6/



10/ Coefficients de sensibilité à la vitesse et à la température d'un film chaud conique isolé.

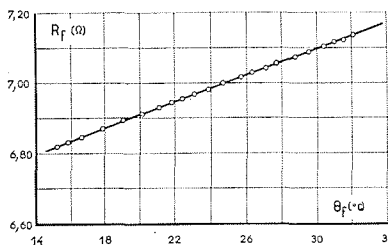
Velocity and temperature sensitivity coefficients for an insulated conical hot film.

11/ Vérification de l'hypothèse de Richardson et McQuivey :

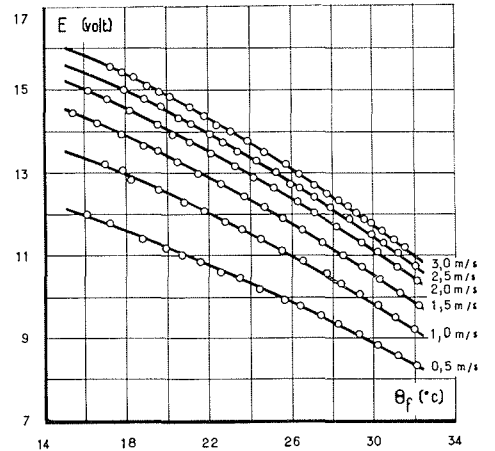
(a) caractéristiques :  
 — avant contamination,  
 - - - - après contamination;  
 (b) détermination du coefficient apparent de surchauffe de la sonde contaminée.

Confirmation of Richardson and McQuivey's assumption:  
 (a) characteristics before contamination —, after contamination - - - - ;  
 (b) determination of apparent over heat coefficient for the contaminated probe.

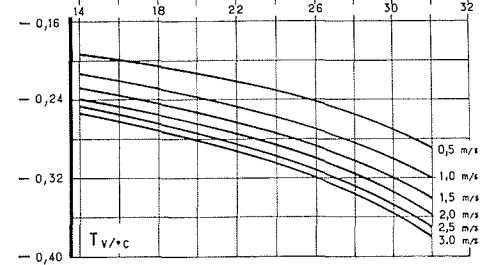
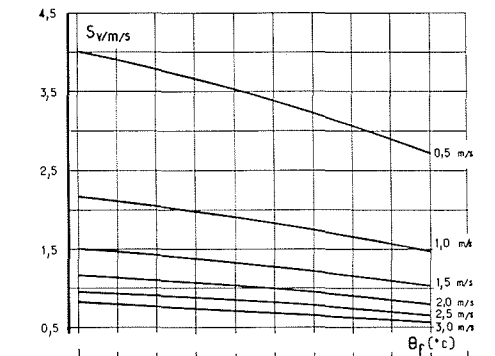
7/



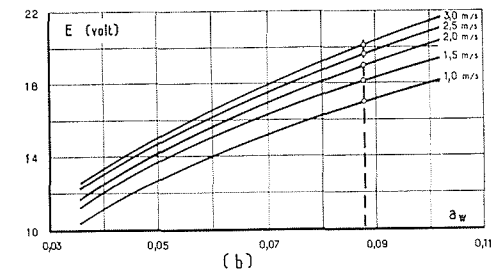
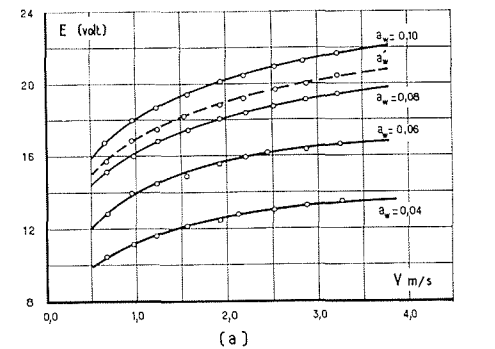
8/



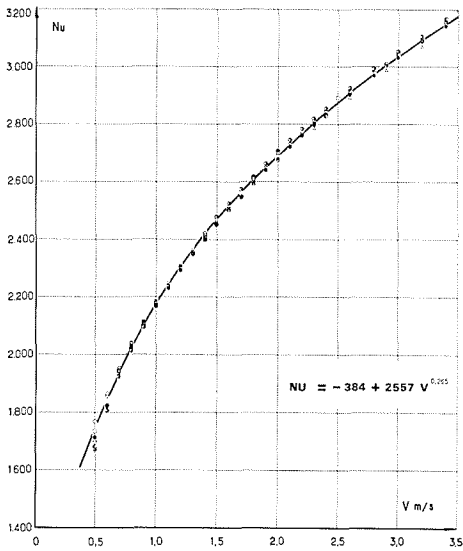
9/



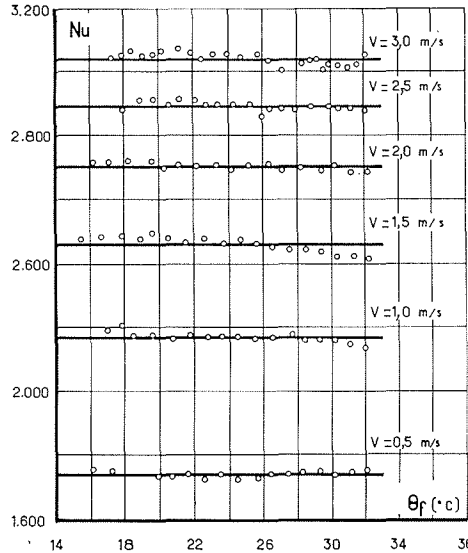
10/



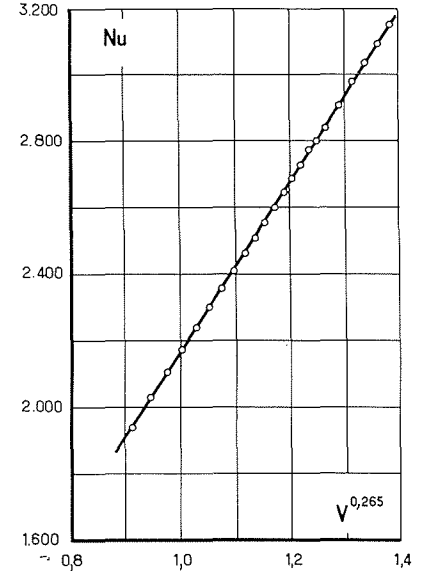
11/



12/ Variation du nombre de Nusselt d'un film chaud conique, en fonction de la vitesse, à différentes températures.  
Conical hot film Nusselt number variation with flow velocity for various temperatures.



13/ Variation du nombre de Nusselt d'un film chaud conique en fonction de la température de l'eau, à différentes vitesses / Conical hot film Nusselt number variation with water temperature for various flow velocities.



14/ Loi de refroidissement du film chaud conique :  
— = équation (28).  
Conical hot film cooling law :  
— = equation (28).

### VII. — Loi de refroidissement d'un film de forme conique

Les films coniques revêtus de quartz ayant, en raison de leur stabilité, fait l'objet d'un étalonnage complet, il était intéressant de chercher à déterminer la forme exacte de la relation (2) gouvernant le refroidissement de ce nouveau type de sonde anémométrique.

Dans le domaine courant d'utilisation, on peut prévoir que cette relation sera représentée de façon satisfaisante par une expression de la forme :

$$\mathcal{R} = A + B \mathcal{R}^a + C \mathcal{R}^b \mathcal{R}^c \quad (18)$$

où le terme A correspond au transfert thermique du film à son support, le terme B  $\mathcal{R}^a$  à la conduction et convection naturelle du film au fluide, et le terme C  $\mathcal{R}^b \mathcal{R}^c$  à la convection forcée. Pour un étalonnage effectué à des valeurs données des températures de l'élément et du fluide, cette expression se ramène, en admettant que  $\theta_{\text{film}}$  conserve aussi une valeur donnée, à une relation particulière :

$$E^2 = A_1 + B_1 V^c \quad (19)$$

Nous avons, en premier lieu, cherché à déterminer la valeur de l'exposant c en nous basant comme l'a fait Fabula (1966) sur l'équation (19) et sur les divers tarages dont nous disposons. Cette détermination peut, par exemple, s'effectuer en traçant à partir des résultats expérimentaux les graphiques représentatifs d'équations déduites de (19) :

$$\log \left( 2 E \frac{dE}{dV} \right) = \log c B_1 + (c - 1) \log V \quad (20)$$

ou :

$$E^2 = A_1 + \frac{1}{c} V \frac{dE^2}{dV} \quad (21)$$

Mais les valeurs de c ainsi obtenues sont variables, les opérations de dérivation nécessitées par de telles méthodes ayant pour effet d'amplifier la dispersion inévitable entre les différentes séries de mesures.

Afin d'obtenir une meilleure représentation de l'ensemble des résultats, les nombres de Nusselt calculés d'après (3) et (8) (\*) pour tous les étalonnages effectués ont été regroupés sur deux graphiques, en fonction, d'une part (fig. 12), de la vitesse et, d'autre part (fig. 13), de la température de l'eau. L'on peut alors constater que, dans tout le domaine de ces mesures, le nombre de Nusselt ne dépend pratiquement que de la vitesse du fluide et non pas de sa température. En se référant à la relation (18), l'on peut donc conclure que :

— la somme des termes A et B  $\mathcal{R}^a$  est indépendante de  $\theta_f$ , en dépit des variations du nombre de Prandtl. Ceci s'explique à la fois par l'écart relativement faible qui, existe entre les « températures de film » d'un étalonnage à l'autre, et par la valeur de l'exposant a, qui ne dépasse vraisemblablement pas 0,3. L'on peut donc poser ici :

$$A + B \mathcal{R}^a = D = \text{Cte} \quad (22)$$

— le terme C  $\mathcal{R}^b \mathcal{R}^c$  est également indépendant de  $\theta_f$ . Or, d'après (4) et (5), il vient :

$$C \mathcal{R}^b \mathcal{R}^c = C d^c \delta^{-b} \nu^{b-c} V^c \quad (23)$$

où  $\delta$  est le coefficient de diffusivité thermique de l'eau, qui varie assez peu avec la température, alors que  $\nu$  est le coefficient de viscosité cinématique de l'eau, qui varie de façon importante avec la température. L'on doit donc avoir :

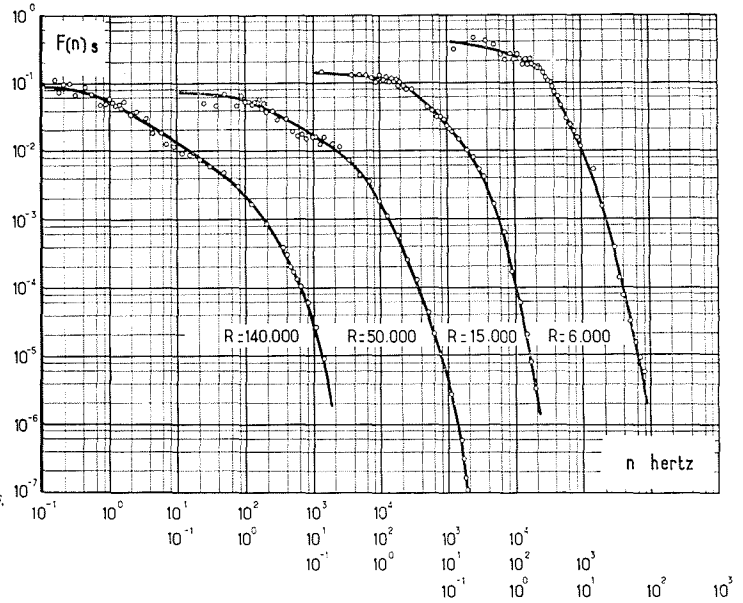
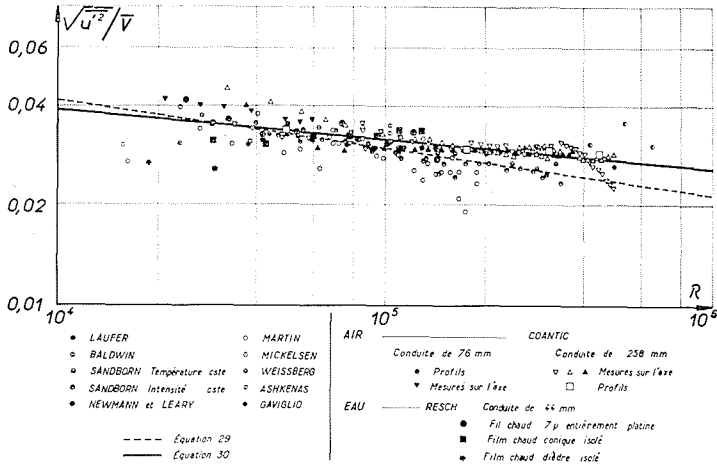
$$b = c = n \quad (24)$$

(\*) Le rapport S/d est pris égal à 0,6 mm, longueur du film.



15/ Mesures d'intensité de turbulence : comparaison entre les résultats obtenus dans des écoulements d'eau et d'air dynamiquement semblables.

Measurement of intensities of turbulence: comparison of results obtained in dynamically similar water and air flows.



16/ Spectres de la turbulence à divers nombre de Reynolds. Turbulence spectra for various Reynolds numbers.

et, par conséquent :

$$C \mathcal{R}^b \mathcal{R}^c = C (\mathcal{R} \mathcal{R})^n = C P \epsilon^n = C_1 \delta^{-n} V^n \tag{25}$$

où  $P \epsilon$  est le nombre de Péclet de l'écoulement autour du film chaud.

En conclusion, la loi de refroidissement du film conique semble pouvoir être représentée par une relation de la forme :

$$\mathcal{R} = D + C P \epsilon^n \tag{26}$$

Ceci paraît logique, puisque l'on sait que c'est le nombre de Péclet qui gouverne le transfert de chaleur dans les couches limites laminaires et que l'écoulement qui se développe sur le cône de la sonde est vraisemblablement de ce type ( $\mathcal{R}_x$  n'y dépasse pas 400).

En fait, dans le domaine couvert par nos mesures, l'on peut montrer que la variation relative du terme  $\delta^{-n}$  est inférieure à 1 %. Il vient alors :

$$\mathcal{R} = D + F V^n \tag{27}$$

Les constantes  $D$  et  $F$  et l'exposant  $n$  ont été déterminés de façon à représenter au mieux l'ensemble des résultats expérimentaux. La méthode numérique, mise au point sur le calculateur Pallas du Centre de Calcul de la Faculté des Sciences de Marseille, consiste à déterminer par la méthode des moindres carrés les constantes  $D$  et  $F$  à partir des valeurs expérimentales de  $\mathcal{R}$  et de  $V$ , ceci pour différentes valeurs de  $n$ . On cherche ensuite la valeur de  $n$  qui minimise l'erreur quadratique moyenne entre les points expérimentaux et la courbe  $\mathcal{R} = D + F V^n$ ; et l'on retient enfin les valeurs correspondantes de  $D$  et  $F$ . Cette méthode a donné :

$$n = 0,265 \quad D = -384 \quad F = 2\,557$$

Dans l'intervalle 0,7-3,5 m/s, la loi de refroidisse-

ment de la sonde utilisée est donc représentée (voir fig. 14) par l'équation :

$$\mathcal{R} = -384 + 2\,557 V^{0,265} \tag{28}$$

### VIII. — Mesures de l'intensité de la turbulence

Ces mesures ont été effectuées dans l'axe de la conduite cylindrique de la soufflerie à eau, dans des conditions d'écoulement turbulent pleinement développé et pour des nombres de Reynolds compris entre 15 000 et 150 000.

Une correction a été appliquée pour tenir compte, notamment aux vitesses les plus basses, de la réponse en fréquence de l'amplificateur quadratique utilisé. Plusieurs types de sondes ont été employées, à des fins de comparaison : fils nus en platine, films isolés sur dièdre et sur cône. Leurs sensibilités ont été déterminées par les différentes méthodes exposées précédemment et, pour le film conique, à partir de l'équation (28).

Les résultats obtenus au cours de trois séries de mesures ont été reportés sur la figure 15, dans un système de coordonnées logarithmiques dont les ordonnées correspondent aux intensités relatives de turbulence  $\sqrt{u'^2}/V$  et les abscisses aux nombres de Reynolds basés sur le diamètre de la conduite et la vitesse en son centre. Sur cette figure sont également portés les résultats donnés par Coantic (1966) pour des écoulements d'air dynamiquement semblables, et les droites représentant les relations empiriques proposées par Sandborn (1955) :

$$\sqrt{u'^2}/V = 0,144 R^{-0,146} \tag{29}$$

et par Coantic (1966) :

$$\sqrt{u'^2}/V = 0,087 R^{-0,088} \tag{30}$$

L'accord entre les résultats obtenus dans l'eau et ceux qui l'avaient été précédemment dans l'air apparaît comme satisfaisant, et la dispersion des mesures est tout à fait comparable. La précision des méthodes anémométriques mises au point pour l'eau est donc du même ordre de grandeur que celle des méthodes couramment utilisées dans l'air, en ce qui concerne la mesure des intensités de turbulence.

**IX — Mesures du spectre de la turbulence**

La répartition spectrale de l'énergie du signal turbulent a été déterminée pour les nombres de Reynolds : 6 000, 15 000, 50 000 et 140 000. Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 16, dans le système de coordonnées classique,  $\log n, \log F(n)$ , avec la normalisation :

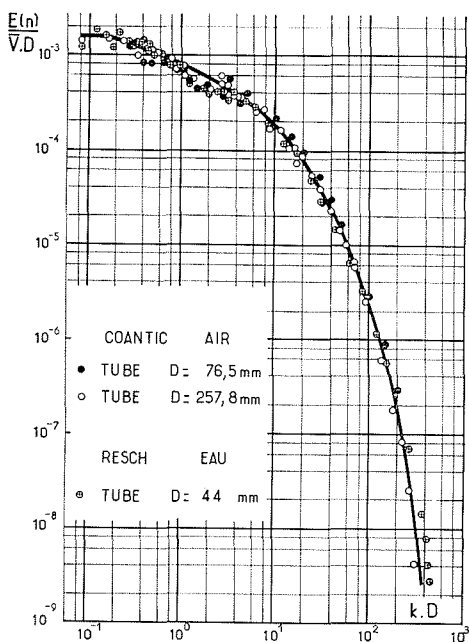
$$\int_0^\infty F(n) dn = 1 \quad (31)$$

D'après les lois de la similitude dynamique des écoulements, les spectres d'énergie relevés dans des conduites de différents diamètres et avec des fluides différents, mais pour une même valeur du nombre de Reynolds, doivent être identiques dans le système de coordonnées sans dimensions ayant pour abscisse le nombre de Strouhal :

$$kD = 2\pi nD/V$$

et pour ordonnée l'énergie réduite :

$$E(n)/VD = \overline{u'^2} F(n)/VD.$$



17/ Comparaison du spectre déterminé dans un écoulement d'eau avec ceux relevés antérieurement dans des écoulements d'air dynamiquement semblables.

*Comparison between spectra determined in a flow of water and previously observed in dynamically similar air flows.*

Une comparaison précise a ainsi pu être effectuée entre le spectre obtenu ici pour un écoulement d'eau dans une conduite de 44 mm de diamètre, au nombre de Reynolds  $R = 50\,000$ , et ceux qui avaient été relevés antérieurement [Coantic (1966)] au même nombre de Reynolds pour des écoulements d'air dans des conduites de 76,5 et 257,8 mm de diamètre.

Comme le montre la figure 17, l'accord entre les trois séries de mesures est satisfaisant. C'est donc, non seulement l'intensité, mais encore la répartition spectrale de l'énergie de la turbulence qui peuvent être déterminées dans l'eau avec une précision comparable à celle des mesures effectuées dans l'air.

**X. — Conclusion**

Les résultats auxquels cette étude a permis d'aboutir, et ceux auxquels sont parvenus d'autres auteurs à la suite de recherches analogues, permettent d'affirmer que les anémothermomètres à fils ou à films chauds sont utilisables dans l'eau et constituent, moyennant quelques précautions, des instruments de mesures hydrauliques possédant des caractéristiques particulièrement intéressantes.

Le travail présenté ici contribue notamment à la mise au point de méthodes de fabrication et d'utilisation des sondes à fil chaud nu, à l'amélioration des techniques expérimentales d'étalonnage et de mesure concernant les divers types de sondes à film chaud, à la réduction et à la correction des effets de la dérive des caractéristiques, à l'étude de l'influence des variations de la température de l'eau sur la réponse des sondes, à la détermination des lois gouvernant le refroidissement des films isolés de forme conique.

Un contrôle expérimental des méthodes mises au point a été effectué. L'intensité et le spectre des fluctuations turbulentes au sein d'un écoulement d'eau en conduite cylindrique ont en effet été déterminés avec une précision comparable à celle des mesures précédemment faites dans un écoulement d'air dynamiquement semblable.

Ces premiers résultats étant encourageants, les recherches se poursuivent dans le but d'étendre ces méthodes à la détermination des fluctuations normales de la vitesse, et de celles de la température, afin de pouvoir mesurer le niveau des flux turbulents de quantité de mouvement et de chaleur dont les écoulements d'eau sont le siège.

**Références**

BANKOFF (S. G.) et ROSLER (R. S.). — Constant temperature hot-film anemometer as a tool in liquid turbulence measurements. *Rev. Sci. Instr.*, vol. 33, n° 11 (1962), p. 1209, 1212.  
 BIRD (R. B.), STEWART (W. E.), LIGHFOOT (E. N.). — *Transport phenomena*. John Wiley (1960), New York.  
 BOUVARD (M.) et DUMAS (H.). — Application de la méthode de fil chaud à la mesure de la turbulence dans l'eau. *La Houille Blanche*, n° 3, p. 257, 270 et n° 7 (1967), p. 723, 734.

- COANTIC (M.). — Contribution à l'étude de la structure de la turbulence dans une conduite de section circulaire. Thèse Doct. ès Sc. (1966), Marseille.
- DELHAYE (J.M.) et CHEVRIER (C.). — Anémomètre à température constante. Etalonnage des sondes à fils chauds dans les liquides. Note T.T. 290 (1968), Service des Transferts Thermiques C.E.N.G.
- DELLEUR (J.W.), TOEBES (G.H.) et LIU (C.L.). — Hot-wire physics and turbulence measurements in liquids. T.R. n° 13 (1966), School Civ. Eng., Purdue Univ.
- DUMAS (R.). — Contribution à l'étude des spectres de turbulence. Thèse Doct. ès Sc. (1962), Marseille, *P.S.T. Min. Air*, n° 404 (1964).
- FABULA (A.G.). — An experimental study of grid turbulence in dilute high polymer solutions. Thèse (1966), Depart. Aeron. Eng., Pennsylv. State Univ.
- GAVIGLIO (J.). — Sur quelques problèmes de mesures de turbulence effectuées à l'aide de l'anémomètre à fils chauds parcourus par un courant d'intensité constante. Thèse Doct. ès Sc. (1958), Marseille, *P.S.T. Min. Air*, n° 385 (1962).
- GRANT (H.P.). — Hot-wire in liquid flow measurement. Tech. Memo., Bull. n° 89 (1964), Flow Corporation.
- HINZE (J.O.). — *Turbulence*. McGraw Hill (1959), New York.
- LINDGREN (E.R.). — Experimental study on turbulent pipe flows of distilled water. T.R. n° 2 (1965), School Civ. Eng., Oklahoma State Univ.
- LING (S.C.). — Heat transfer characteristics of hot film sensing element used in flow measurement. *Jour. Basic Eng.* (1960), p. 629, 634.
- McQUIVEY (R.S.). — Turbulence in a hydrodynamically rough and smooth open channel flow. Thèse (1967), Civil Eng. Dep., Colorado State Univ.
- PATTERSON (G.K.) et ZAKIN (J.L.). — Hot film anemometry measurements of turbulence in pipe flow: organic solvents. *A.I.Ch.E.J.*, vol. 13, n° 3 (1967), p. 513, 519.
- RESCH (F.). — Etudes sur le fil chaud et le film chaud dans l'eau. Thèse Doct. Ing. (1968), Marseille.
- RICHARDSON (E.V.) et McQUIVEY (R.S.). — Measurement of turbulence in water. *Proc. A.S.C.E.* (1968), p. 411, 430.
- RUNSTADLER (P.W.). — Stable operation of hot film probes in water. A.S.M.E. (1962). Symp. on Meas. in Unsteady Flows, Worcester, Mass.
- SABIN (C.M.). — An analytical and experimental study of the plane, incompressible, turbulent free shear layer with arbitrary velocity ratio and pressure gradient. Rep. M.D. 9 (1963), Thermosc. Div., Stanford University.
- SANDBORN (V.A.). — Experimental evaluation of momentum terms in turbulent pipe flow. N.A.C.A. T.N. 3266, (1955), Washington.
- USKAN (T.) et REYNOLDS (W.C.). — A turbulent boundary layer on a wall moving at the free stream velocity. Rep. M.D. 14 (1963), Thermosciences Div., Stanford Univ.

## Abstract

### A study of hot wire and hot film anemometers in water

by F. Resch \* and M. Coantic \*

The research carried out on this subject has helped in the development of methods of measuring mean water flow velocities and turbulent fluctuations by means of hot wire and film anemometers to within a similar degree of accuracy to that attainable in air.

For this type of measurement, it is necessary to know the cooling relationship for the sensitive element, which is a relationship between dimensionless Nusselt, Reynolds, Prandtl and Grashof numbers. Various difficulties arise in the use of this type of probe in water, which can only be successfully overcome by special manufacturing methods, appropriate geometrical design features and by designing for low heating coefficients. Fluid temperature variations are liable to cause considerable error.

The experimental rig comprised a tubular water tunnel for calibration and check measurements in turbulent flow of known characteristics, pressure measuring instrumentation, a constant-temperature anemometer and various items of auxiliary equipment.

Fairly satisfactory results were obtained with bare hot wire pick-ups with low regular drift thanks to a specially developed manufacturing method. Various types of industrially produced hot-film anemometer with quartz insulation were also studied and calibrated and drift correction methods suggested.

The relationship between the cooling of a conical film, flow velocity and water temperature was investigated. In the range of values covered, the Nusselt number seemed to solely depend on the Péclet number, and approximately on velocity. The relationship appears to be of the form  $\mathcal{N} = D + C Pe^n = D + C' V^n$ , with the exponent  $n$  working out at 0.265.

Turbulence strength and spectrum measurements were carried out to check the method in fully developed flow discharging from the cylindrical water tunnel with Reynold numbers varying between 15 000 and 150 000. The results agreed well with those of previous measurements in dynamically similar air flows.

Summing up it seems that, with careful use, a hot wire or hot film anemometer can produce comparably accurate measurement results in water as in air.

\* Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence de la Faculté des Sciences de Marseille, Laboratoire associé du C.N.R.S.

# LA HOUILLE BLANCHE

## A L'ÉTRANGER

Bureaux d'abonnement et de vente

### AUSTRALIE

#### Sydney N.S.W.

GRAHAME BOOK COMPANY : 39-49, Martin Place.

### BRÉSIL et AMÉRIQUE DU SUD

#### Rio de Janeiro

« S.O.G.E.C.O. », José Luis Garcia Renalès : Avenida Rio Branco, 9, Sala 218.

### CANADA

#### Montréal 8.PQ

LIBRAIRIE LEMEAC (Messageries France-Canada) : 371, Ouest Avenue Laurier.

### ESPAGNE

#### Madrid

J. DIAS DE SANTOS : Lagasca n° 38.

#### Madrid

LIBRERIA VILLEGAS : Preciados, 46.

### GRANDE-BRETAGNE

#### London W.C.2.

W.M. DAWSON & SONS LIMITED : Cannon House, Macklin Street.

#### London W.1.

I.R. MAXWELL Co. : 4-5, Fitzroy Square.

### HOLLANDE

#### Amsterdam C.

MEULENHOF & CIE (Librairie) : Beulingstraat, 2-4.

#### La Haye

MARTINUS NIJHOFF : 9, Lange Voorhout.

### HONGRIE

#### Budapest 62

KULTURA P.O.B. 149.

### INDES

#### Calcutta 16

FRANCE-ARTS, 33-34 Park Mansions, Park Street.

### ITALIE

#### Bologna

TECHNA : Via San Felice, 28, Casella Postale 503.

### JAPON

#### Tokyo

MARUZEN Co. : 6, Tori-Nichome, Nihonbashi, P.O. Box 605.

### MEXIQUE

#### Mexico D.F.

LIBRERIA VILLEGAS MEXICANA : Santa Ma., La Redonda, n° 209-9.

#### Mexico D.F.

MANUEL BONILLA (Librairie) : Tiber 38-201.

### NOUVELLE-ZÉLANDE

#### Auckland-Wellington C.2.

R. HILL & SONS : Matlock House, 32, Quay Street.

### PORTUGAL

#### Lisboa

LIVRARIA BERTRAND : 73, Rua Garret.

### SUÈDE

#### Stockholm

A.B. HENRIK LINDSTAHL'S BOKHANDEL : Odengatan, 22.

### SUISSE

#### Lausanne

S.P.E.S., S.A. Librairie et Editions techniques, 1, rue de la Paix.

### TCHÉCOSLOVAQUIE

#### Praha 2

ARTIA : V° Smeckach, 30.

#### Praha 1

ORBIS (Import-Export) : Narodin, 37.

### TURQUIE

#### Istanbul

LIBRAIRIE HACHETTE : 469, Istiklal Caddesi, Beyoglu.

### U.S.A.

#### New York

MOORE-COTTRELL SUBSCRIPTION AGENCIES INC. : North Cohocton.

### VENEZUELA

#### Caracas

LIBRERIA VILLEGAS VENEZOLANA, Avenida Urdaneta, Esquina Ibarra, Edificio Riera.