

# MESURES DE TURBULENCE PAR LA TRAINÉE D'UNE SPHÈRE ET L'ANÉMOMÉTRIE A FILM CHAUD

par J. PICHON  
SOGREAH, Grenoble

## 1. — Introduction

Parmi tous les moyens susceptibles de mesurer la turbulence d'un écoulement, l'anémométrie à fil et film chauds semble être, actuellement, le mieux adapté. Mais son emploi, en particulier dans les liquides, est coûteux et délicat.

Comme nous allons le voir, la méthode basée sur la mesure de la traînée d'une sphère est de mise en œuvre plus facile. Les renseignements fournis ne concernent cependant que l'intensité de turbulence de l'écoulement. La connaissance de cette caractéristique est bien souvent fondamentale dans une étude.

Nous nous sommes attachés à tester la validité de la méthode de mesure de turbulence par la traînée d'une sphère à l'aide d'un anémomètre à film chaud, dans la veine d'un tunnel hydrodynamique.

## 2. — Principe de la méthode

### 2.1 Nombre de Reynolds critique de la sphère.

Soit une sphère parfaitement lisse, de diamètre  $D$ , placée dans l'écoulement d'un fluide de viscosité  $\nu$  et de vitesse  $V$ .

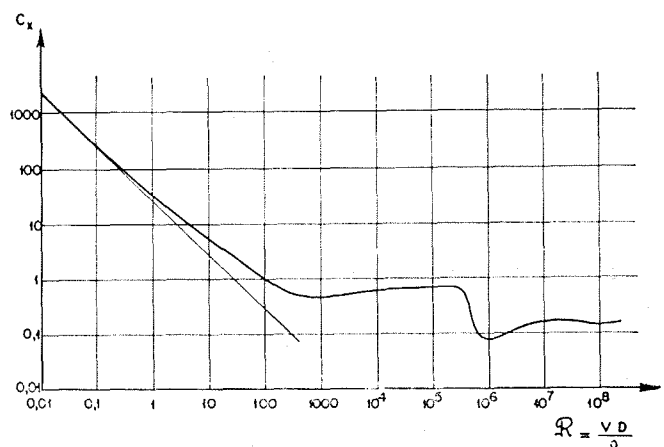
Le nombre de Reynolds relatif à la sphère est égal à :

$$R = \frac{VD}{\nu}$$

Le coefficient de traînée de la sphère :

$$C_T = \frac{\text{Traînée}}{1/2 \rho SV^2}$$

varie en fonction du nombre de Reynolds  $R$  (fig. 1). On remarque sur la courbe de variation une brusque diminution du coefficient de traînée  $C_T$  de la sphère. Cette diminution correspond au recollement de la courbe limite tur-



1/ Variations du coefficient de traînée d'une sphère.

bulente derrière la sphère et se produit pour une certaine valeur du nombre de Reynolds  $R$ , valeur qui est appelée nombre de Reynolds critique  $R_c$  de la sphère.

$R_c$  est fonction du diamètre de la sphère et de la turbulence de l'écoulement.

## 2.2 Turbulence et nombre de Reynolds critique.

Plus l'écoulement est turbulent, plus la couche limite laminaire, soumise à des perturbations intenses, se transforme en couche turbulente et plus petit est le nombre de Reynolds critique  $R_c$ .

Il est donc logique de prétendre mesurer la turbulence d'une soufflerie ou d'un tunnel hydrodynamique par les variations du nombre de Reynolds critique d'une sphère.

Les mesures ont, jusqu'à présent, été effectuées en soufflerie. Il s'agissait de comparer les conditions d'essais en soufflerie, aux conditions réelles dans l'atmosphère.

Le nombre de Reynolds critique d'une sphère dans l'atmosphère (turbulence très faible) a été trouvé variant entre 385 000 et 290 000.

Il s'imposait d'examiner les relations existant entre le nombre de Reynolds  $R_c$  introduit par Prandtl et l'intensité de la turbulence  $T_1$  définie par Dryden :

$$T_1 = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{\overline{U}}$$

$u$  caractérisant les fluctuations de vitesse et  $\overline{U}$  la vitesse moyenne de l'écoulement.

Dryden [1], à l'aide de douze points expérimentaux, traça une courbe unique et établit donc la relation biunivoque entre  $R_c$  et  $T_1$  :

$$R_c = f_1(T_1)$$

C'est sur cette relation que se basent quelques auteurs [6, 7 et 8]. Ils font même apparaître un facteur de turbulence F.T. défini ainsi :

$$F.T. = \frac{\text{Nombre de Reynolds critique dans l'atmosphère}}{\text{Nombre de Reynolds critique dans la veine de mesures}}$$

Ce facteur de turbulence est lié à l'intensité de turbulence de la veine et traduit la relation de Dryden.

Mais, en 1935 et en 1936, Taylor a apporté des éléments nouveaux au problème [3 et 4] en introduisant la notion d'échelle de turbulence  $L$ , liée à la taille des tourbillons (Scale of Turbulence)

$$L = \int_0^{+\infty} R(y) dy$$

$R$  étant le coefficient de corrélation entre deux points distants de  $y$ .

Pour Taylor, un écoulement de turbulence homogène et isotrope est donc caractérisé par les deux constantes :

$$T_1 = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{\overline{U}} \quad \text{et} \quad T_2 = L$$

Dans le cas de la sphère employée comme détecteur de turbulence, ces notions entraînent des conséquences

qu'on ne semble pas avoir toujours aperçues nettement : en admettant que le nombre de Reynolds critique soit uniquement déterminé par la turbulence, il sera lié aux constantes caractéristiques par une relation de la forme :

$$R_c = \varphi(T_1, T_2)$$

Taylor propose la relation suivante :

$$T = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{\overline{U}} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/5} = T_1 T_2^{-1/5} D^{1/5}$$

La relation primitivement proposée par Dryden doit être remplacée par la relation :

$$R_c = f(T)$$

Sur la figure 2 sont représentés les résultats obtenus par Dryden. On remarque, dans le cas de la deuxième relation, un meilleur groupement des points expérimentaux.

Guienne [9] a fait de nombreux essais en soufflerie. Ne possédant point de moyens pour mesurer les caractéristiques de la turbulence de son écoulement, il a reporté ses résultats sur le graphique de Dryden (fig. 2) de la manière suivante :

Soit deux sphères de diamètres  $D_0$  et  $D$  placées successivement dans un même courant d'air :

$\sqrt{\overline{u^2}}/\overline{U}$  et  $L$  restent constants. On a :

$$T_0 = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{\overline{U}} \left(\frac{D_0}{L}\right)^{1/5}$$

$$T = \frac{\sqrt{\overline{u^2}}}{\overline{U}} \left(\frac{D}{L}\right)^{1/5}$$

Soit :

$$T = T_0 \left(\frac{D}{D_0}\right)^{1/5}$$

Si on admet qu'il existe une relation entre  $R_c$  et  $T$ , par exemple celle exprimée par la courbe établie par Dryden [5], la mesure du nombre de Reynolds critique  $R_c$  d'une sphère donne une valeur de  $T_0$  par lecture sur la courbe, et la relation :

$$T = T_0 \left(\frac{D}{D_0}\right)^{1/5}$$

permet de calculer  $T$  pour d'autres sphères de diamètre quelconque  $D$ .

Si la courbe de Dryden était valable pour la soufflerie utilisée par Guienne, les points obtenus par ce dernier se placeraient sur cette courbe. Nous constatons qu'ils s'en écartent notablement. Les expériences de Guienne ne semblent pas être d'accord avec ce que permettrait de prévoir la théorie de Taylor.

Quant à Enrici [8], il utilise la première relation établie par Dryden :

$$R_c = f_1(T_1)$$

et ne la vérifie pas. Nous ne pouvons donc pas nous baser sur ses conclusions.

A la suite de tous ces résultats, il convient donc de tester la méthode par un moyen de mesure sûr.

Nous avons pensé à l'anémométrie à film chaud.

### 3. — Installation.

#### 3.1 Le tunnel hydrodynamique et la veine d'essais.

Les essais ont été effectués dans la veine d'essais du tunnel hydrodynamique de 2 m<sup>3</sup>/s de la SOGREA. Tous les éléments du tunnel ont fait l'objet d'études et de mises au point particulières destinées à assurer un écoulement de haute qualité dans la veine d'essais.

La veine d'essais permet de réaliser des essais avec écoulements en charge ou avec surface libre. Elle est cylindrique, à section rectangulaire. Ses dimensions principales sont les suivantes :

- largeur : 600 mm
- hauteur : 700 mm
- longueur : 3 000 mm

L'installation permet de réaliser des vitesses de 7,40 m/s pour une veine à surface libre de 600 × 450 mm.

La veine comporte de grandes surfaces transparentes pour l'observation, l'éclairage, la photographie. Elle est également adaptée pour recevoir les instruments de mesures et les supports de maquettes.

Un soin très particulier a été apporté à son usinage pour obtenir une géométrie et une continuité des parois excellentes (réalisation en acier inoxydable usiné et poli, hublots en altuglas).

De même les éléments de raccordement au tunnel ont été étudiés et mis au point de façon à obtenir une uniformité de l'écoulement et une qualité de surface libre excellentes.

#### 3.2 Etude de l'écoulement dans la veine d'essais.

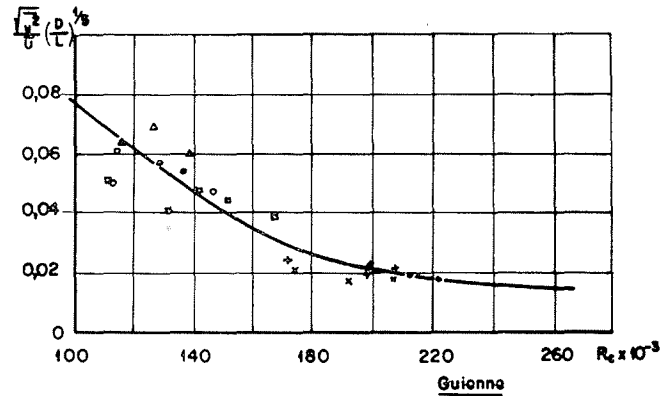
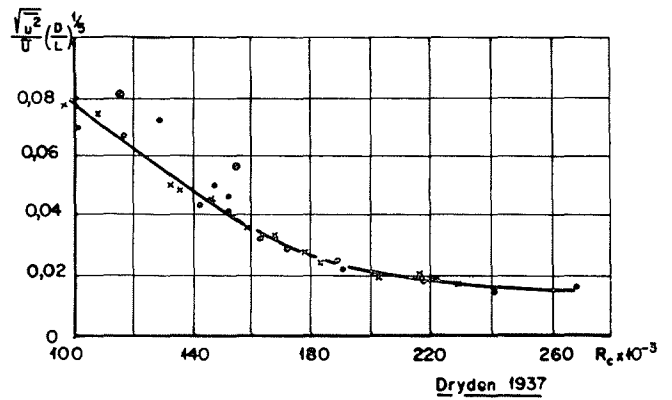
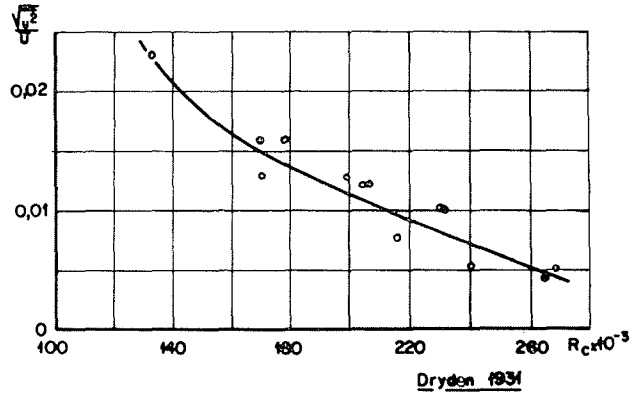
Nous avons déterminé, à l'aide d'un anémomètre à film chaud (Thermo-Systems) les profils de vitesses et les intensités de turbulence dans une section de la veine d'essais.

Les mesures ont été faites à l'aide d'une sonde conique, le coefficient de surchauffe étant de 4 %.

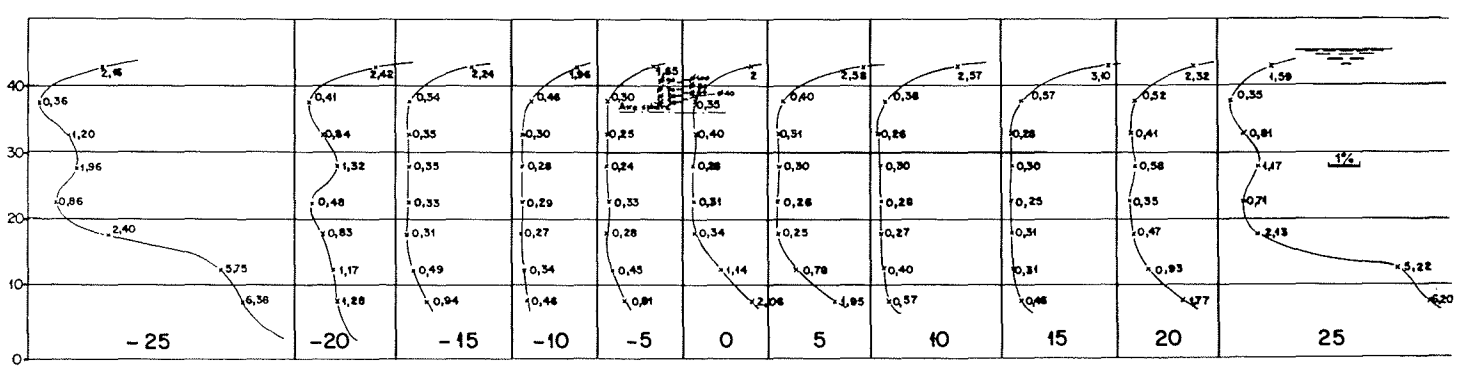
##### a) Vitesses.

Nous avons relevé les vitesses dans une section verticale de la veine suivant 11 verticales espacées de 5 cm, les points de mesure sur ces verticales étant eux-mêmes espacés de 5 cm.

Nous avons pu nous rapprocher à 2,5 cm de la surface libre et à 7,5 cm du fond. Le support cylindrique classique de la sonde a été inclus dans un support profilé plus robuste et plus rigide.



2/ Turbulence et nombre de Reynolds critique.



3/ Intensités de turbulence (%).

En général, la répartition des vitesses dans la veine semble être très bonne.

**b) Intensités de turbulence.**

Les intensités de turbulence ont été mesurées aux mêmes points que les vitesses.

Rappelons que :

$$I = \frac{\sqrt{u^2}}{\bar{U}} = \frac{\sqrt{e^2}}{E} = \frac{\sqrt{e^2}}{(dE/dU) \bar{U}}$$

avec :

- $e$  : fluctuation de tension correspondant à  $u$ ;
- $\sqrt{e^2}$  : écart-type des fluctuations de tension mesuré par un voltmètre efficace;
- $dE/dU$  : pente de la courbe d'étalonnage au point considéré.

L'examen de la figure 3 montre que les intensités de

turbulence restent exceptionnellement faibles (0,3 %) dans la majeure partie de l'écoulement. La turbulence du tunnel est très faible, ce qui prouve sa qualité.

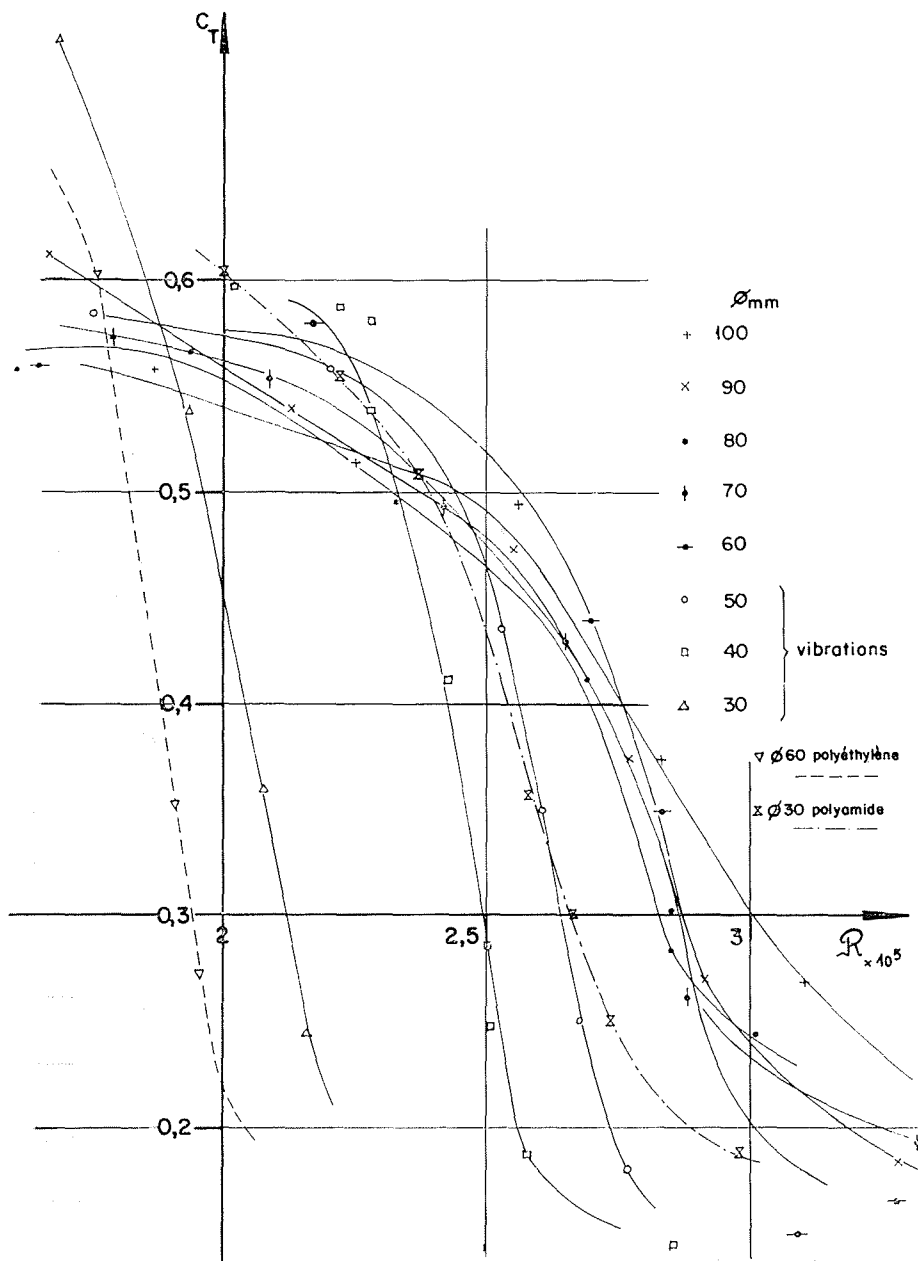
**3.3 La balance à six composantes.**

La veine d'essais est équipée d'une balance à six composantes, mettant en jeu six jauges extensométriques à trames pelliculaires, collées, encadrées de découpleurs à double cardan pour limiter les interactions.

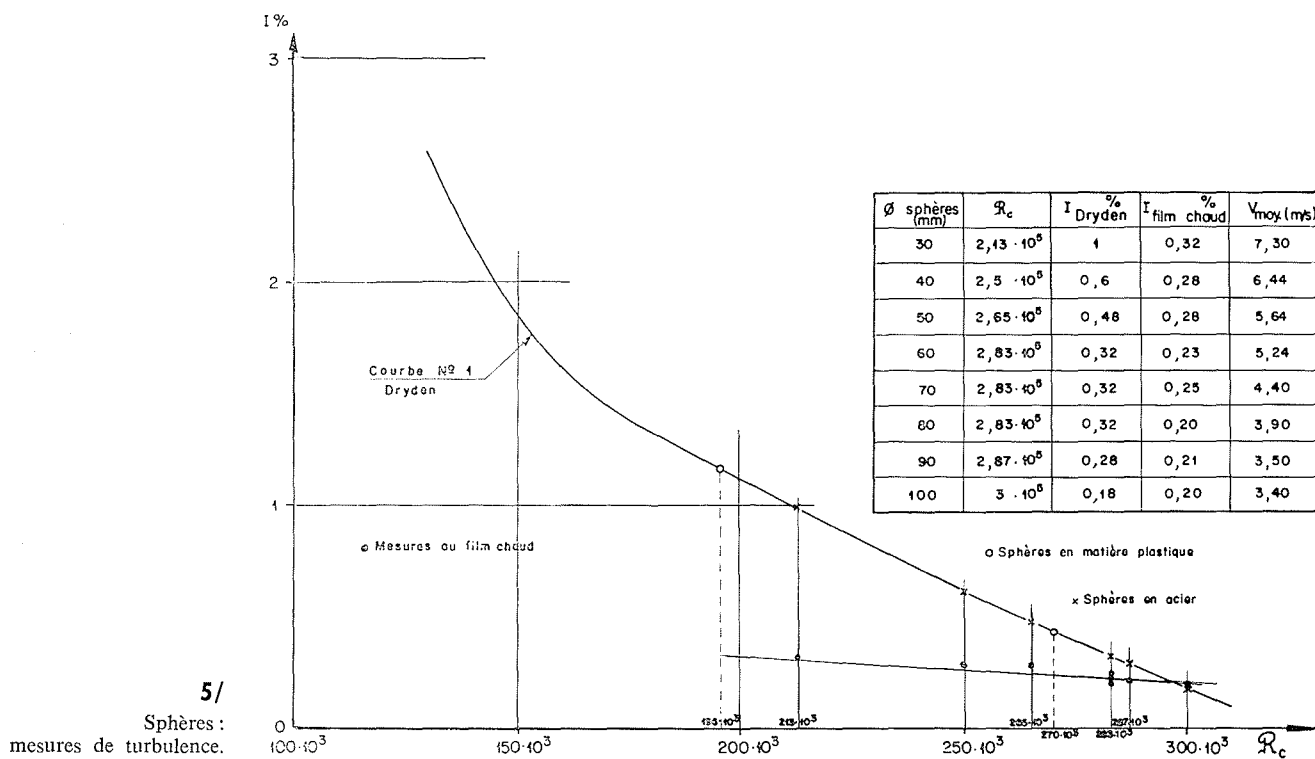
Les signaux de la balance sont transmis à un équipement de mesure enregistrant ces signaux. L'enregistrement est disponible sous deux formes :

- bande imprimée donnant les résultats bruts;
- bande perforée permettant d'introduire ces données dans un ordinateur.

En fait, dans notre étude, nous n'avons mesuré que la force globale de traînée.



**4/**  
Variations  
du coefficient de traînée.



4. — Essais réalisés

4.1 Mesure de la turbulence à l'aide d'une série de sphères.

a) Mesure de la turbulence d'une veine d'essais.

Nous avons considéré une série de huit sphères de diamètres allant de 30 à 100 mm, par pas de 10 mm. Ces sphères ne sont autres que des billes d'acier de roulements. Leur état de surface est donc de haute qualité.

Un support profilé et un dard ont permis de placer les sphères dans la veine d'essais du tunnel hydrodynamique, le centre des sphères se trouvant à 90 mm au-dessous de la surface libre. Le support a été fixé au plateau de la balance dynamométrique à six composantes de l'installation.

Il nous a donc été possible de mesurer la traînée des sphères dans l'écoulement du tunnel, pour différentes vitesses, de calculer les coefficients de traînée correspondants et de tracer l'évolution de ces coefficients de traînée en fonction du nombre de Reynolds.

$$R = \frac{VD}{\nu} \quad (\text{fig. 4})$$

Nous avons donc pu déterminer le nombre de Reynolds critique R<sub>c</sub> correspondant à chaque sphère, ce nombre étant, rappelons-le, le nombre de Reynolds pour lequel le coefficient de traînée est égal à 0,3. Le nombre de Reynolds critique relatif à chaque sphère correspond à une vitesse d'écoulement spécifique (ν étant déterminé en fonction de la température).

L'examen de la figure 4 nous montre l'évolution du nombre de Reynolds critique R<sub>c</sub> en fonction du diamètre des sphères d'acier. On remarque un certain groupement autour de la valeur R<sub>c</sub> = 2,85 · 10<sup>5</sup>, puis brusquement, une dérive pour les sphères de diamètres 50, 40 et 30 mm. Cette dérive

correspond à l'apparition de vibrations nettement visibles de l'ensemble sphère-support.

Sur la figure 5, nous avons reproduit la courbe établie par Dryden [1] liant le nombre de Reynolds critique R<sub>c</sub> à l'intensité de la turbulence :

$$T_1 = \frac{\sqrt{u'^2}}{U} \quad (\text{paragraphe 2})$$

$$R_c = f_1(T_1)$$

Cette courbe nous permet de déduire les intensités de turbulence correspondant aux nombres de Reynolds précédemment trouvés. Chaque sphère permet donc de mesurer l'intensité de turbulence de l'écoulement. Les résultats tirés de cette courbe de Dryden sont présentés dans le tableau 1, et sur la figure 5.

Ø sphères (mm)	V <sub>moy</sub> (m/s)	R <sub>c</sub>	I <sub>DRYDEN</sub> (%)
30	7,30	2,13 · 10 <sup>5</sup>	1
40	6,44	2,50 · 10 <sup>5</sup>	0,6
50	5,64	2,65 · 10 <sup>5</sup>	0,48
60	5,24	2,83 · 10 <sup>5</sup>	0,32
70	4,40	2,83 · 10 <sup>5</sup>	0,32
80	3,90	2,83 · 10 <sup>5</sup>	0,32
90	3,50	2,87 · 10 <sup>5</sup>	0,28
100	3,40	3,00 · 10 <sup>5</sup>	0,18

Essais réalisés avec des sphères en matière plastique.

Nous avons refait les mêmes essais avec deux sphères de matière plastique :

- une sphère de diamètre  $\varnothing$  60 mm en polyéthylène;
- une sphère de diamètre  $\varnothing$  30 mm en polyamide.

Les conditions expérimentales ont été rigoureusement semblables à celles des sphères d'acier de diamètres correspondants.

Nous trouvons les résultats suivants :

$\varnothing$ (mm)	$V_{\text{moy}}$ (m/s)	$R_c$	$I_{\text{DRYDEN}}$ (%)
30	7,30	$1,96 \cdot 10^5$	1,16
60	5,24	$2,70 \cdot 10^5$	0,42

Si on compare ces résultats avec ceux obtenus pour les sphères d'acier de diamètres correspondants, on remarque que  $R_c$  plastique <  $R_c$  acier.

b) Mesure de la turbulence à l'aval d'un profil.

Afin de créer, dans la veine d'essais, un niveau de turbulence plus élevé, nous avons placé, à l'amont de la sphère, à une distance de 1 m, et dans l'axe de l'écoulement, un profil vertical. La turbulence créée n'est certainement pas homogène et isotrope, ce qui laisse prévoir, *a priori*, des résultats approchés par la méthode des sphères.

Nous avons utilisé quatre sphères de diamètres respectifs 40, 60, 70 et 80 mm.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 3.

$\varnothing_{\text{sphères}}$ (mm)	$V_{\text{moy}}$ (m/s)	$R_c$	$I_{\text{DRYDEN}}$ (%)
40	5,42	$2,05 \cdot 10^5$	1,08
60	3,65	$1,97 \cdot 10^5$	1,16
70	3,08	$1,95 \cdot 10^5$	1,18
80	2,73	$1,96 \cdot 10^5$	1,16

c) Remarques sur les mesures de turbulence par la méthode des sphères.

A la suite de ces essais, nous faisons les constatations suivantes :

— Nous avons décelé, dans certains cas, des vibrations non négligeables de l'ensemble sphère-support (paragraphe 4.1.a). Ces vibrations sont probablement dues au fait que l'écoulement ne possède pas la symétrie de révolution autour du diamètre de la sphère parallèle à la vitesse. Elles peuvent être assimilées à une turbulence factice

et provoquer ainsi un recollement prématuré de la couche limite turbulente. Le nombre de Reynolds critique  $R_c$  serait alors plus faible que dans le cas d'un ensemble parfaitement rigide et, en se reportant sur la courbe de Dryden, on obtiendrait une intensité de turbulence plus forte que l'intensité de turbulence réelle de l'écoulement.

— Interaction support-sphère : elle est loin d'être négligeable. Plusieurs auteurs l'ont fait remarquer et montrent qu'une modification du carénage du support change le coefficient de traînée, donc le nombre de Reynolds critique, et fausse ainsi les mesures.

— Sens de variation de la vitesse de l'écoulement : les mesures sont faites par paliers successifs, en maintenant la vitesse constante assez longtemps pour pouvoir effectuer la mesure. On peut faire varier la vitesse de l'écoulement par valeurs croissantes ou décroissantes. Nous n'avons pas noté de différence entre les deux méthodes.

— Détermination du nombre de Reynolds critique : la précision avec laquelle on obtient le nombre de Reynolds critique  $R_c$  est assez relative. Cette précision dépend de la détermination du coefficient de traînée et du tracé des courbes liant nombre de Reynolds et coefficient de traînée. La pente de ces courbes est variable et il est parfois difficile de déterminer avec précision le nombre de Reynolds correspondant à  $C_x = 0,3$ .

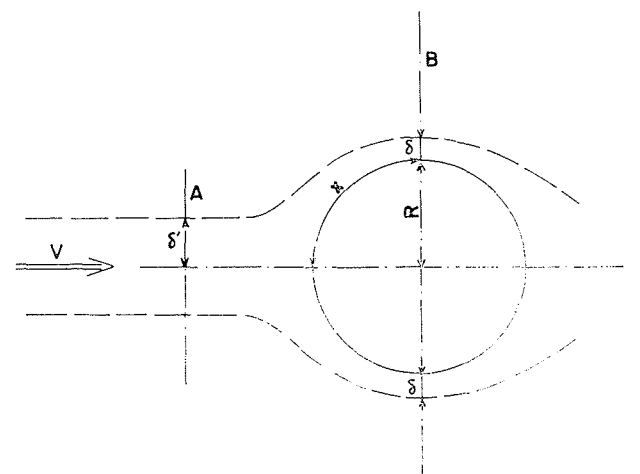
4.2 Mesure de la turbulence à l'aide d'un anémomètre à film chaud.

Nous avons utilisé, pour les mesures de turbulence, une sonde conique qui, lorsqu'il ne s'agit pas de faire des mesures directionnelles précises, est la mieux adaptée à des mesures dans l'eau.

En effet, sa forme profilée évite une contamination intense. D'autre part, l'élément sensible étant quasiment ponctuel ( $\sim 0,25$  mm), l'écoulement est peu perturbé et la zone de mesure est très réduite.

Le coefficient de surchauffe adopté est 4 %.

Le problème est de connaître la zone d'écoulement, en amont de la sphère, concernée par les mesures de turbulence effectuées par cette sphère. Si cette zone est étendue, la sphère intégrera l'intensité de turbulence. Or, les mesures d'intensité de turbulence prouvent que le rapport  $\sqrt{u^2}/U$  varie rapidement lorsqu'on se rapproche de la surface libre (paragraphe 3.2. b).



Nous avons donc fait un calcul grossier destiné à dimensionner la zone d'écoulement concernée par les mesures avec les sphères (fig. 6).

Soit  $\delta$  l'épaisseur de la couche limite turbulente au maître-couple de la sphère.

La grandeur  $\delta'$  sera déterminée approximativement par la relation suivante :

$$\pi \delta'^2 \approx 2 \pi R \delta$$

Soit :

$$\delta' \approx \sqrt{2 R \delta}$$

D'autre part, les équations de la couche limite donnent :

$$\delta = 0,37 x R_x^{-1/5}$$

On suppose que dans la section d'écoulement B considérée, la vitesse moyenne  $V_x$  est égale à  $V$ .

Donc :

$$R_x = \frac{Vx}{\nu}$$

On aura donc :

$$\delta' \approx \sqrt{2 R \left[ 0,37 x \left( \frac{Vx}{\nu} \right)^{-1/5} \right]}$$

Nous ferons le calcul pour les deux sphères extrêmes de diamètres respectifs 100 mm et 30 mm, ce qui nous donnera deux valeurs extrêmes de  $\delta'$ .

*Sphère de diamètre 100 mm :*

$$R = 0,05 \text{ m}$$

$$x = \frac{2 \pi R}{4} = 7,85 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$V = 3,40 \text{ m/s}$$

$$\nu = 1,14 \cdot 10^{-6} \text{ maST}$$

$$\delta \approx 2,4 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\delta' \approx 1,54 \cdot 10^{-2} \text{ m} \approx 1,5 \text{ cm}$$

*Sphère de diamètre 30 mm :*

$$R = 0,015 \text{ m}$$

$$x = \frac{2 \pi R}{4} = 2,36 \cdot 10^{-2} \text{ m}$$

$$V = 7,30 \text{ m/s}$$

$$\nu = 1,05 \cdot 10^{-6} \text{ maST}$$

$$\delta \approx 0,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$\delta' \approx 4,86 \cdot 10^{-3} \text{ m} \approx 0,5 \text{ cm}$$

Ceci nous permet de constater que la zone de l'écoulement intéressée par la mesure avec les sphères est un tube de courant de section circulaire de rayon variant entre 0,5 et 1,5 cm.

Si on se reporte aux mesures systématiques d'intensités de turbulence effectuées dans toute une section de la veine, on constate que, dans toute la section du tube de courant considéré, l'intensité de turbulence reste quasiment constante (paragraphe 3.2. b).

Nous avons donc placé l'élément sensible de la sonde à film chaud au point de l'écoulement correspondant au centre des sphères.

Les résultats obtenus sont donnés dans le tableau 4.

**Tableau 4**

VEINE SANS SINGULARITÉ		AVEC PROFIL VERTICAL	
$V_{moy}$ (m/s)	I film chaud (%)	$V_{moy}$ (m/s)	I film chaud (%)
7,30	0,32		
6,44	0,28		
5,64	0,28		
5,24	0,23	5,42	3,50
4,40	0,25	3,65	3,16
3,90	0,20	3,08	3,54
3,50	0,21	2,73	3,70
3,40	0,20		

**4.3 Comparaison des deux méthodes (sphères et film chaud).**

Au cours de cette étude, les résultats obtenus à l'aide de l'anémomètre à film chaud sont pris comme référence. Nous ne mettrons pas en doute leur validité, ce moyen de mesure ayant déjà fait ses preuves.

La première constatation que l'on fait, au vu des résultats de mesures au film chaud dans la veine, sans singularité dans l'écoulement, est que, quelle que soit la vitesse de l'écoulement, la turbulence au point considéré reste constante (0,25 — 0,30 %). Nous retrouvons d'ailleurs cette valeur lors des mesures systématiques (paragraphe 3.2. b, fig. 3).

Il semble logique d'admettre que, dans une veine donnée, l'énergie d'agitation croît avec l'énergie du mouvement moyen. Les recherches de Dryden montrent que, dans le tunnel du Bureau des Standards, ces deux énergies sont reliées par une relation beaucoup plus étroite, dont la simplicité ne laisse pas de surprendre un peu le théoricien : le rapport  $\sqrt{u^2}/\bar{U}$  reste constant quand  $\bar{U}$  varie.

Ce résultat fut confirmé par Wattendorf et Kuethé opérant dans le tunnel du California Institute of Technology. Nous l'avions nous-mêmes remarqué lors d'essais antérieurs.

Ainsi puisque l'intensité de turbulence reste constante, quelle que soit la vitesse moyenne de l'écoulement, les nombres de Reynolds critiques relatifs aux différentes sphères devraient être égaux.

*Cas de la veine sans singularité dans l'écoulement.*

Les nombres de Reynolds critiques des sphères de diamètres 100 à 60 mm sont sensiblement égaux et les résultats obtenus sont en très bonne concordance avec les mesures au film chaud.

Pour les sphères de diamètres 50, 40 et 30 mm, l'écart se creuse entre résultats-sphères et résultats-film chaud. Les vibrations de l'ensemble sphère-support, décelées au cours des essais, peuvent être la cause de cette divergence.

On remarque un plus grand écart encore avec les sphères de plastique : les vibrations, observées à l'œil nu, semblent être plus importantes que pour les sphères d'acier.

*Cas du profil vertical placé dans l'écoulement en amont de la veine d'essais.*

Dans ce cas, les résultats obtenus par la méthode des sphères et ceux obtenus par l'anémométrie à film chaud

sont très différents (tableaux 3 et 4). Ceci peut être causé par la non-isotropie de la turbulence. On peut également prétendre que la loi de Dryden n'est pas vérifiée.

Cette dernière série d'essais ne semble pas déterminante.

### 5. — Conclusions

Cette étude était destinée à tester la fiabilité de la méthode des sphères pour mesurer la turbulence de l'écoulement dans la veine d'essais d'un tunnel hydrodynamique. Les résultats obtenus ne sont pas en faveur de cette méthode.

L'écoulement autour d'une sphère est très instable. Il est perturbé aisément par un obstacle placé en amont, par le système de suspension de la sphère, ce qui peut modifier considérablement, et de manière imprévisible, la traînée de sphère.

Si la méthode semble simple à première vue, en réalité sa technique se révèle très délicate à l'usage.

Certains auteurs préfèrent mesurer la turbulence par la traînée d'un cylindre, le support de ce dernier étant intégré dans le cylindre lui-même.

### 6. — Bibliographie

- [1] DRYDEN (H. L.) and KUETHE (A. M.). — Effect of turbulence in wind tunnel measurements, *N.A.C.A.*, Tech. Rep. n° 342.
- [2] DRYDEN (H. L.). — Turbulence, Companion of Reynolds number. *Journal of Aeronautical Science*, Vol. I. (April 1934).
- [3] TAYLOR (G. I.). — Statistical theory of turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 151 (1935).
- [4] TAYLOR (G. I.). — Statistical theory of turbulence. *Proceedings of the Royal Society of London*, Vol. 156 (1936).
- [5] DRYDEN (H. L.), SCHUBAUER (G. B.), MOCK (W. C.) and SKRAMSTAD (H. K.). — Measurements of intensity and scale of wind tunnel turbulence. *Tech. Rep.*, n° 581 (1937).
- [6] POPE (A.) and HARPER (J. J.). — Low-speed wind tunnel testing. *Ed. John Wiley.*
- [7] DAILY (J. W.) and HARLEMAN (D.). — Fluid dynamics. *Ed. Addison Wesley.*
- [8] ENRICI (A.). — Mesure de la turbulence des tunnels hydrodynamiques. Note technique, *SOGREAH*, n° 1543.
- [9] GUIENNE (P.). — Qualification de la turbulence en soufflerie par le nombre de Reynolds critique d'une sphère ou d'un cylindre. *Groupement français pour le développement des Recherches Aéronautiques (G.R.A.)*, Rapport technique, n° 3 (1940).

