

CEA 1978 - FAVRE A. , DUMAS R. , VEROLLET E.

COUCHE LIMITE SUR PAROI PLANE POREUSE AVEC ASPIRATION (1961)

Sommaire. - Ces recherches, effectuées en soufflerie, concernent la couche limite turbulente d'une plaque plane avec aspiration.

La paroi poreuse s'étend sur 1 m de longueur, à partir d'une distance de 1 m en aval du bord d'attaque. Le nombre de Reynolds d'épaisseur de couche limite en l'absence d'aspiration est de l'ordre de 16.300.

Le taux d'aspiration, défini comme le rapport à la vitesse générale de la vitesse normale à la paroi, est réglable de 0 à 2 pour cent. Le gradient de pression est contrôlable.

On a déterminé en diverses positions et pour divers taux d'aspiration avec des sondes de prise de pression totale, les profils de vitesse moyenne avec des anémomètres à fils chauds, analyseur spectral et corrélateur, intensités des différentes composantes des fluctuations turbulentes de vitesse, les spectres d'énergie, les corrélations. On déduit de ces mesures: le tracé des lignes de courant, les valeurs des tensions de frottement visqueux et turbulent, du frottement local à la paroi, et du terme de production de

.../.

CEA 1978 - FAVRE A. , DUMAS R. , VEROLLET E.

BOUNDARY LAYER ON A FLAT PLATE WITH SUCTION (1961).

Summary. - This research done in wind tunnel concerns the turbulent boundary layer of a porous flat plate with suction. The porous wall is 1 m long and begins 1 m downstream of the leading edge. The Reynolds number based on the boundary layer thickness is of the order of 16.300.

The suction rate defined as the ratio of the velocity perpendicular to the wall to the external flow velocity ranges from 0 to 2 per cent. The pressure gradient can be controlled.

The mean velocity profiles have been determined for various positions and suction rates by means of total pressure probes together with the intensities of the turbulent velocity fluctuations components, energy spectra and correlations by means of hot wire anemometers, spectral analyser and correlator.

The stream lines, the values of the viscous and turbulent shear stresses, of the local wall friction, of the turbulent energy production term, with

l'énergie turbulente, ainsi que des indications sur la dissipation de cette énergie. Pour ces calculs, l'équation intégrée de conservations de la masse dans la couche limite a été établie.

L'influence de l'aspiration sur la couche limite est importante : elle modifie profondément la forme des profils de vitesse moyenne, augmentant les tensions de frottement visqueux à la paroi, les diminuant ailleurs ; elle diminue les intensités de turbulence longitudinale et transversale ainsi que les tensions de frottement turbulent et la production d'énergie turbulente. Ces effets sont très marqués dans la zone interne de la couche limite.

Par contre, l'étude des spectres d'énergie indique que l'échelle de la turbulence est peu modifiée, l'épaisseur de la couche limite ne diminuant que faiblement sous l'influence de l'aspiration.

Les effets de l'aspiration peuvent être appréciés en comparant le double du taux d'aspiration au coefficient de frottement à la paroi (supposée étanche) ; notables dès que ce rapport dépasse l'unité, ils deviennent très importants lorsqu'il atteint la dizaine.

information on the dissipation of the energy have been derived from these measurements.

For these data the integral of equation of continuity in boundary layer have been drawn.

The suction effects on the boundary layer are important. The suction thoroughly alters the mean velocity profiles by increasing the viscous shear stresses near the wall and decreasing them far from the wall, it diminishes the longitudinal and transversal turbulence intensities, the turbulent shear stresses, and the production of energy of turbulence. These effects are much stressed in the inner part of the boundary layer.

On the other hand the energy spectra show that the turbulence scale is little modified, the boundary layer thickness being not much diminished by the suction.

The suction effects can be appreciated by comparing twice the suction rate to the wall friction coefficient (assumed airtight), quite noticeable as soon as the rate is about unity, they become very important when it reaches ten.

**PREMIER MINISTRE
COMMISSARIAT A
L'ÉNERGIE ATOMIQUE**

**COUCHE LIMITE SUR PAROI PLANE POREUSE
AVEC ASPIRATION**

par

A. FAVRE, R. DUMAS, E. VEROLLET

*Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence
Faculté des Sciences de Marseille*

Rapport CEA n° 1978

**CENTRE D'ÉTUDES
NUCLÉAIRES DE SACLAY**

**Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence
Faculté des Sciences de Marseille**

COUCHE LIMITE SUR PAROI PLANE POREUSE AVEC ASPIRATION

par

A. FAVRE, R. DUMAS, E. VEROLLET

Contrat n° 2977

- 1961 -

SYMBOLES

- Axes** : $0 X_1 X_2 X_3$ trièdre direct orienté, $0 X_1$ dans la direction de la vitesse générale, $0 X_3$ normal à la paroi.
- z** : distance au bord d'attaque de la plaque.
- Z** : distance à la limite amont de l'aspiration.
- y** : distance à la paroi.
- x** : distance au plan de symétrie.
- V_y** : vitesse locale moyenne (direction $0 X_1$)
- V_{3y}** : vitesse locale moyenne (direction $0 X_3$)
- V** : vitesse générale hors de la couche limite.
- v_0** : vitesse d'aspiration à la paroi.
- δ** : épaisseur de la couche limite.
- δ^*** : épaisseur de déplacement de la couche limite.
- θ** : épaisseur de quantité de mouvement.
- δ^{**}** : épaisseur d'énergie.
- H et H^*** : paramètres de forme $H = \delta^* / \theta$ $H^* = \delta^{**} / \theta$
- A** : taux d'aspiration $A = -v_0 / V$
- v_1** : fluctuation de vitesse dans la direction $0 X_1$
- v_3** : fluctuation de vitesse dans la direction $0 X_3$

- ρ : masse spécifique de l'air.
- p : pression.
- n : fréquence.
- $K = \frac{2\pi n}{V}$: nombre d'onde.
- $F(K)$: densité spectrale d'énergie.
- τ_A : tension de frottement avec aspiration.
- C_f : coefficient de frottement local à la paroi sans aspiration.
- $(C_f)_A$: coefficient de frottement local à la paroi avec aspiration du taux A.
- D : coefficient de dissipation sans aspiration.
- D_A : coefficient de dissipation avec aspiration au taux A.
- R_δ : nombre de Reynolds d'épaisseur de la couche limite $R_\delta = \frac{V\delta}{\nu}$
- R_A : nombre de Reynolds d'aspiration $R_A = \frac{v_o \delta}{\nu}$

COUCHE LIMITE SUR PAROI PLANE POREUSE AVEC ASPIRATION

1 - INTRODUCTION ¹⁾

Une contribution à l'étude de la structure d'une couche limite sur plaque plane poreuse a été entreprise, dans le cas d'une aspiration de l'air à travers cette paroi, en mouvement turbulent incompressible.

La transition se produit dans la zone du bord d'attaque, et le nombre de Reynolds d'épaisseur de la couche limite est $R_{\delta} = 16\ 300$ au début de la paroi poreuse ($V = 11\text{ m/s}$; $\delta = 22,5\text{ mm}$).

On a déterminé en diverses positions et pour divers taux d'aspiration les profils de vitesses moyennes, les intensités, les

1) Recherches effectuées à l'Institut de Mécanique Statistique de la Turbulence, de la Faculté des Sciences de Marseille, pour le Commissariat à l'Energie Atomique, avec l'aide du Ministère de l'Air et du C. N. R. S., et la participation de MM. DORNE et ASTIER.

spectres, et les corrélations des fluctuations turbulentes de vitesse.

Ces résultats permettent de calculer les lignes de courant, les épaisseurs de déplacement, de quantité de mouvement et d'énergie, les tensions de frottement visqueux et turbulent, le taux de production de l'énergie de la turbulence.

2 - DISPOSITIF EXPERIMENTAL

2. 1. Soufflerie aérodynamique.

La soufflerie S. 2, à circuit ouvert, comprend successivement : un ventilateur centrifuge, un divergent, un filtre électrostatique, une chambre de tranquillisation avec 5 filtres antiturbulents, un convergent de rapport de contraction 9, une veine d'expériences de section carrée 0,56 x 0,56 m, de 2,50 m de longueur et un diffuseur aval.

Grâce à un variateur à courroie la vitesse est réglable de 2 à 16 m/s, avec des écarts de l'ordre de 1/1 000. La répartition des vitesses dans la section d'entrée de la veine d'expériences est constante à $\pm 0,5$ p. 100 près, et l'intensité de turbulence est de 0,0012. Le filtre électrostatique est assez efficace pour éliminer pratiquement les poussières susceptibles de perturber les fils

chauds des anémomètres et de colmater la paroi poreuse de la plaque.

2. 2. Maquette à paroi poreuse et dispositif d'aspiration.

Une plaque plane, à bord d'attaque profilé de largeur 0,56 m et de longueur 1,946 m, est disposée dans la veine d'expériences (figure 1). La paroi est poreuse à partir de 1,026 m du bord d'attaque sur une longueur de 0,92 m et sur une largeur de 0,24 m, limitée par deux plaques de garde. Les pores de cette paroi ont des dimensions variant de quelques microns à 100 microns, la solidité est de l'ordre de 50 p. 100. Cette plaque poreuse métallique a certains défauts : la forme n'est pas exactement plane, elle présente des ondulations longitudinales atteignant $\pm 0,25$ mm, notamment dans la région amont ($Z \sim 50$ mm) (figure 5) ; et la perméabilité mesurée sur une surface de 50 cm^2 varie de $\pm 2,5$ p. 100 longitudinalement et de ± 12 p. 100 transversalement.

Cette plaque poreuse constitue la partie inférieure d'un caisson métallique étanche, dans lequel la dépression est établie grâce à une pompe à vide à anneau liquide. Il est profilé (figure 1) pour réduire la perte de charge, afin que l'incidence effective de la plaque au bord d'attaque soit inférieure à la valeur critique qui provoquerait le décollement. A l'intérieur du caisson, des appuis en dents de scie, espacés de 4 cm, soutiennent la plaque poreuse lors de l'aspiration.

La dépression est mesurée dans le caisson ; et le débit d'air aspiré est déterminé grâce à un ajutage de venturi disposé sur la canalisation aval et taré d'après des sondages de vitesses dans cette canalisation ; des vérifications sont effectuées avec un gyromètre.

Dans le cas de faibles débits, la mesure est faite à partir de la dépression dans le caisson et de la loi de perméabilité de la plaque poreuse.

Le taux moyen d'aspiration, ou coefficient de débit

$A = -v_o / V_y$ est le rapport de la vitesse moyenne $-v_o$ d'aspiration à la paroi ainsi déterminée, à la vitesse moyenne générale V hors de la couche limite.

2. 3. Appareils de mesures.

Les vitesses moyennes sont mesurées avec des tubes de pression totale de 0,6 mm d'épaisseur et des micromanomètres au 1/50 mm d'eau ; ou bien au voisinage de la plaque avec des anémomètres à fils chauds de 3 microns de diamètre, jusqu'à 0,05 mm de la paroi. Les pressions statiques sont déterminées à l'aide de tubes de 1,2 mm de diamètre.

Les fluctuations turbulentes de vitesses sont mesurées avec des anémomètres à fils chauds droits, et à fils chauds croisés en X [5] . L'appareillage est constitué par deux chaînes symétriques

d'amplificateurs type KOVASZNAY à courant de chauffage constant.

Le tarage des fils chauds, en fonction de la vitesse moyenne et de leur incidence, fait en utilisant un pont à courant continu de haute précision, est assez stable grâce à l'élimination des poussières par le filtre électrostatique.

Avec deux fils chauds croisés disposés dans le plan vertical perpendiculaire à la plaque, on peut mesurer les fluctuations v_1 des vitesses parallèles à la direction générale de l'écoulement, et v_3 verticales, ainsi que leurs écarts types, les tensions turbulentes $\overline{v_1 v_3}$, et le coefficient de corrélation

$$\frac{\overline{v_1 v_3}}{\sqrt{\overline{v_1^2}} \sqrt{\overline{v_3^2}}}$$

Un analyseur spectral [4] permet de déterminer le spectre d'énergie des différentes composantes, de fréquences comprises entre 1 et 5 000 Hz.

3 - RESULTATS D'EXPERIENCES

3.1. Gradient de pression.

En l'absence d'aspiration ($A = 0$) le gradient rapporté

à l'énergie cinétique est pratiquement nul, jusqu'à la distance $Z = 40$ mm en aval du début de la paroi poreuse. De 50 à 95 mm, il croît jusqu'à 0,24 par mètre, et en aval il est de 0,07 par mètre. Avec aspiration, au taux $A = 0,015$, il est au maximum de 0,02 par mètre, lorsque $Z > 50$ mm.

3.2. Vitesses moyennes.

Des mesures de la composante V_y dans la direction générale de l'écoulement de la vitesse moyenne dans le temps, ont été faites : aux diverses distances y de la paroi (pour $x = 12,75$ mm), aux distances Z du début de l'aspiration, et pour les taux d'aspiration A suivants :

Z mm	- 12	10	25	30	50	70,5	85	100	150,5	215	300	458
A	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
"	0,0166	0,0047	0,0007		0,0007			0,0007		0,0007	0,0007	0,0007
"		0,0163	0,0025		0,0047			0,0026		0,0049	0,0025	0,0031
"			0,0047		0,0164			0,0046		0,0202	0,0045	0,0047
"			0,0099					0,0099			0,0097	0,0165
"			0,0157					0,0165			0,0153	

3.2.1. A titre d'exemple, la figure 2 indique les profils de vitesse V_v/V longitudinale, pour $Z = 300$ mm. L'effet de l'aspiration est sensible, même pour le taux minimum utilisé $A = 0,0007$, important pour le maximum $A = 0,0153$. Les vitesses orthogonales

V_{3y} paraissent évoluer peu en fonction de y lorsque le taux d'aspiration est élevé.

On vérifie qu'en écoulement laminaire avec aspiration, et pour les distances $Z/\delta \geq 4$, les vitesses V_y concordent avec les valeurs asymptotiques données par la théorie de SCHLICHTING [3, 1, 2] qui admet que la vitesse v_0 d'aspiration constante s'exerce depuis le bord d'attaque, et que l'écoulement est invariant en Z au long de la plaque :

$$(1) \quad \frac{V_y}{V} = 1 - \exp\left(-\frac{v_0 y}{V}\right) \quad \text{avec } v_0 = V_{3y} = C^{te}$$

On constate que, pour l'écoulement turbulent examiné, dans lequel l'aspiration est appliquée à partir de 1,026 m en aval du bord d'attaque et, pour des taux d'aspiration élevés $A \geq 0,005$, les profils de vitesses obtenus pour $Z/\delta \geq 4$, présentent des points d'inflexion.

En première approximation on peut représenter semi-empiriquement ces profils, de la paroi à $y/\delta = 0,10$ pour $A \geq 0,005$ en remplaçant dans la formule (1) la vitesse V hors de la couche limite par la vitesse V_i au premier point d'inflexion y_i .

Les profils concordent à peu près (figure 2) de $y/\delta = 0,013$ à $y_i/\delta \sim 0,1$. Les différences constatées sont de l'ordre et dans le sens des corrections à apporter aux mesures par sondes de pression, déterminées par ailleurs avec les sondes

à fils chauds. Les pentes des profils à la paroi concordent également, comme le montre la comparaison du coefficient $(C_f)_A$ de frottement local à la paroi calculé d'après la formule :

$$(2) \quad (C_f)_A = 2 A V_i / V$$

et mesuré par dérivation des quantités de mouvement.

A	V_i / V	$(C_f)_A$ calculé (2)	$(C_f)_A$ mesuré
0,0153	0,86	$260 \cdot 10^{-4}$	$256 \cdot 10^{-4}$
0,0097	0,84	$160 \cdot 10^{-4}$	$154 \cdot 10^{-4}$
0,0045	0,81	$73 \cdot 10^{-4}$	$67 \cdot 10^{-4}$

Les profils examinés évoluent nettement en fonction de la distance Z, même pour le taux d'aspiration maximum. Par exemple, à la position $Z/\delta = 12,5$ $y/\delta = 0,12$ et pour des taux d'aspiration de 0,0025 0,0050 et 0,0160, le rapport des deux principaux termes d'accélération

$$V_y \cdot \frac{\partial V_y}{\partial Z} \quad V_{3y} \cdot \frac{\partial V_y}{\partial y}$$

a respectivement les valeurs 0,6 0,3 0,1.

L'hypothèse d'un écoulement invariant en Z ne paraît donc pas ici applicable.

3.2.2. Dans d'autres expériences [6], n'utilisant pas l'aspiration, ont été décelées des perturbations en envergure, peu évolutives en y et en Z, de la vitesse moyenne V_y (± 3 p. 100), ainsi que de δ , δ^{**} , θ (± 7 à 9 p. 100), de H (± 5 p. 100), des tensions de Reynolds (± 15 p. 100). La moyenne opérée selon l'envergure a permis cependant d'établir des bilans de quantités de mouvement et d'énergie, à ± 15 p. 100 près.

Dans les présentes expériences, des perturbations en envergure analogues de la vitesse V_y (± 3 p. 100) ont également été constatées. Elles subsistent en position et en ordre de grandeur, lorsque l'aspiration est opérée, même jusqu'à $A = 0,016$.

3.2.3. La figure 3 présente l'effet relatif produit sur les vitesses par l'aspiration. $(V_y)_A$ est la vitesse en un point situé à distances y de la plaque et Z du début de la paroi poreuse, lorsque l'aspiration s'exerce au taux A. V_y correspond au cas où l'aspiration est nulle. Les courbes ont été tracées en fixant la distance y/δ , et le taux d'aspiration A, à 0,02 0,05 0,10 0,20 et 0,001 0,0025 0,005 0,016. L'épaisseur moyenne de la couche limite est $\delta = 24$ mm.

Cet effet est visible en amont jusqu'à une distance $Z/\delta \sim -1$. Il croît avec l'aspiration A , et avec la longueur Z sur laquelle celle-ci s'exerce ; il décroît lorsque la distance y à la paroi augmente.

Pour des distances $Z/\delta > 3$ et jusqu'à 20, l'effet est presque linéaire en fonction de Z .

Mais en admettant que V n'est pas notablement modifiée cet effet doit être limité à $(V - V_y) / V_y$ soit 1,29 0,646 0,488 0,333 pour $y/\delta = 0,02$ 0,05 0,10 0,20 respectivement.

Les courbes correspondant à la formule (1) dans laquelle V est remplacée par la valeur empirique V_i de la vitesse au point d'inflexion concordent à peu près avec les courbes expérimentales lorsque $A \geq 0,005$, $Z/\delta > 4$, $y/\delta \leq 0,10$.

3.3. Lignes de courant.

Les lignes de courant, correspondant aux vitesses locales moyennes sont présentées sur la figure 4, pour les taux d'aspiration $A : 0,0000$ 0,0025 0,0050 et 0,0160. Elles ont été corrigées des déformations de la plaque poreuse (cf. 3.4.1.)

A l'exception du voisinage du début de l'aspiration et de la paroi poreuse, c'est-à-dire à condition que $Z/\delta > 1$ et

$y/\delta > 0,05$ ces lignes sont approximativement rectilignes. Leur pente est de l'ordre du taux d'aspiration A , lorsqu'il dépasse $0,002$ ²⁾

La distance à laquelle la modification relative de vitesse est de 1 p. 100 est voisine de l'épaisseur δ de la couche limite à la distance $Z/\delta \sim 20$ pour $A = 0,0050$ et $Z/\delta \sim 16$ pour $A = 0,0160$.

3. 4. Epaisseurs et paramètres de formes.

3. 4. 1. Sur la figure 5 sont portées les valeurs mesurées des épaisseurs de déplacement δ^* , de quantité de mouvement θ et d'énergie δ^{**} , en fonction de la distance Z et du taux d'aspiration A .

En raison des déformations de la plaque poreuse, indiquées sur la figure, qui atteignent $\pm 0,25$ mm, apparaissent des défor-

2) La ligne de courant correspondant à la frontière de la couche limite amont rencontre la paroi à la distance $(\delta - \delta^*) / A$. Le rayon de courbure à la paroi des lignes de courant, donné par les formules (1) (2) V_i remplaçant V , est $\frac{\nu}{V_i} \sim 1,4 \mu$

mations correspondantes des courbes d'épaisseurs δ , δ^*
 θ , δ^{**}

Il a été vérifié, en l'absence d'aspiration, que les déformations des courbes δ disparaissent lorsque le profil de la plaque est corrigé par une garniture. Un lissage des courbes a donc été effectué pour application à la paroi plane, en vue de réduire l'effet de ces défauts de la plaque poreuse.

La courbe des épaisseurs θ de quantités de mouvement, en l'absence d'aspiration, a été tracée en utilisant pour $100 \leq Z \leq 300$ mm la pente correspondant aux mesures par fils chauds croisés du coefficient de frottement à la paroi (cf. 3.6.) compte tenu du frottement visqueux et du gradient de pression. La valeur mesurée de $C_f \sim 34 \times 10^{-4}$ pour $Z = 25$ mm est voisine de celle donnée par la formule de LUDWIEG et TILLMAN ³⁾ à savoir $36,5 \times 10^{-4}$, mais pour $100 \leq Z \leq 300$ mm, elle est de 27×10^{-4} la formule indiquant alors 35×10^{-4} , cette différence est vraisemblablement due à un effet tridimensionnel dans le tunnel ouvert formé par la plaque poreuse et les plaques de garde.

$$3) \quad \frac{\tau_0}{\rho V^2} = \frac{0,123}{\left(\frac{V \theta}{\nu}\right)^{0,268}} \cdot 10^{-0,678} H$$

3.4.2. L'aspiration diminue les épaisseurs de déplacement, de quantité de mouvement et d'énergie.

En particulier $\frac{\partial \theta}{\partial Z}$ et $\frac{\partial \delta^{**}}{\partial Z}$ sont nuls pour $A \sim 0,002$ qui correspond à $A/C_f \sim 1$. Pour des aspirations plus fortes la couche limite se résorbe, dans les conditions de ces expériences. Le paramètre de forme $H = \frac{\delta^*}{\theta}$ est à peu près constant en fonction de Z , soit 1,38 en moyenne en l'absence d'aspiration. Celle-ci diminue les valeurs de H , jusqu'au voisinage de 1,1 lorsque $Z/\delta \sim 20$ $A/C_f \sim \delta$. Le paramètre de forme $H^* = \frac{\delta^{**}}{\theta}$ est aussi à peu près constant en fonction de Z , soit 1,78 en moyenne, en l'absence d'aspiration. Celle-ci semble augmenter légèrement les valeurs de H^* jusqu'à 1,93.

3.5. Equation intégrée de conservation de la masse dans la couche limite avec aspiration.

L'équation statistique de la masse, si le mouvement moyen est plan :

$$(3) \quad \frac{\partial V_{1y}}{\partial Z} + \frac{\partial V_{3y}}{\partial y} = 0 \quad \text{à la paroi} \quad V_{10} = 0 \quad V_{30} = v_o \quad \left(\frac{\partial V_3}{\partial y} \right)_o = 0$$

en intégrant en y :

$$(4) \quad V_{3y} = v_o - \int_0^y \frac{\partial V_{1y}}{\partial Z} dy$$

mais :

$$\int_0^y \frac{\partial v_{1y}}{\partial Z} dy = \frac{d}{dz} \left[v_y - v \int_0^y \left(1 - \frac{v_{1y}}{V} \right) dy \right] - v_{1y} \frac{dy}{dZ}$$

Si l'on intègre jusqu'à la distance δ l'équation (4) devient :

$$(5) \quad \frac{V_{3\delta}}{V} = \frac{v_0}{V} + \frac{\delta - \delta^*}{\rho V^2} \cdot \frac{dp}{dZ} + \frac{d\delta^*}{dZ}$$

On connaît donc la pente des lignes de courant à la distance δ , formule (6), la pente moyenne ainsi que la pente à la paroi soit $\frac{\pi}{2}$ et le rayon de courbure (cf. 3.4.1.)

3.6. Coefficient de frottement et de dissipation.

Les équations statistiques de quantité de mouvement et d'énergie intégrées, permettent de calculer [7] les coefficients de frottement local à la paroi $(C_f)_A$:

$$(6) \quad (C_f)_A = \frac{(\tau_0)_A}{\frac{1}{2} \rho V^2} = 2 \frac{d\theta}{dZ} - (H+2) \frac{\theta}{\frac{1}{2} \rho V^2} \frac{dp}{dZ} - 2 \frac{v_0}{V}$$

et de dissipation D_A de l'énergie cinétique du mouvement moyen :

$$(7) \quad D_A = 2 \int_0^{\delta} \frac{(\tau_0)_A}{\rho V^2} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{V y}{V} \right) dy = \frac{d\delta}{dz} - \frac{3\delta}{\rho V^2} \frac{dp}{dz} - \frac{v_0}{V}$$

Les effets de gradients de pression n'interviennent dans le cas présent qu'à titre de correction. Mais les résultats de mesures ne comportent pas de corrections d'éventuels effets tridimensionnels dus à la limitation des plaques de garde.

La droite $(C_f)_A = 2 A$ représente le cas de l'écoulement laminaire asymptotique [3] correspondant à la quantité de mouvement déviée orthogonalement par l'aspiration.

Le coefficient $(C_f)_A$ peut aussi être déterminé par la mesure de la vitesse V_i et l'utilisation de la formule (2) dans le cas des taux A élevés.

La figure 6 indique les valeurs obtenues de $\frac{V_{3\delta}}{V}$, pente des lignes de courant correspondant à l'équation (5). Cette pente demeure, lorsque le taux d'aspiration augmente, positive pour $A = 0$; elle s'annule pour $A \sim 0,002$ et devient négative pour les taux d'aspiration élevés, dans le cas de ces expériences.

La figure 6 indique aussi en fonction de A et de A/C_f les valeurs de $(C_f)_A/C_f$ d'après l'équation (6) effet relatif de l'aspiration sur le coefficient de frottement, ainsi que leur comparaison avec les résultats de WUEST [8], obtenus avec un dispositif et des paramètres H différents.

Le coefficient de frottement augmente avec le taux d'aspiration. Supérieur à $2 A$ pour les faibles taux d'aspiration, il égale $2 A$ pour $A/C_f \sim 1$ et devient inférieur à $2 A$ pour les taux d'aspiration élevés, pour le cas de ces expériences dans lequel le début de l'aspiration se fait dans une couche limite déjà développée.

La même figure 6 indique, en fonction de A , et de A/D , les valeurs obtenues de D_A/D effet relatif de l'aspiration sur le coefficient de dissipation, ainsi que leur comparaison avec les résultats de WUEST [8], obtenus avec un dispositif et un paramètre de forme différent ($H = 1,25$) et avec un gradient de pression négatif.

Le coefficient de dissipation augmente avec le taux d'aspiration. Supérieur à A pour les faibles taux, il égale A pour $A/D \sim 1,5$ et devient inférieur pour les taux d'aspiration plus élevés.

3. 7. Tensions de Reynolds. Intensités de turbulence.

Les tensions turbulentes tangentielles et normales ont été mesurées, grâce aux anémomètres à fils chauds.

A titre d'exemple, les figures 7 a et 7 b donnent, en fonction de y/δ , pour $Z = 300$ mm, et à divers taux d'aspiration,

les intensités de turbulence longitudinale $I_{1A} = \frac{\sqrt{v_1^2}}{V_y}$
 et transversales $I_{3A} = \frac{\sqrt{v_3^2}}{V_y}$

La figure 8 présente les tensions de frottement

$$\tau = \mu \frac{\partial V_y}{\partial y} - \rho \overline{v_1 v_3} \quad \text{et les tensions turbulentes} \quad - \rho \overline{v_1 v_3}$$

en fonction de y/δ pour diverses positions Z et taux d'aspiration A.

Les tensions turbulentes diminuent fortement lorsque le taux de l'aspiration A et la longueur Z sur laquelle elle s'applique augmentent, et ceci dans toute l'épaisseur de la couche limite. Leur maximum diminue et s'éloigne de la paroi.

Par exemple pour $Z = 300 \text{ mm}$ et $A = 0,0153$ la tension de Reynolds devient très faible à $y/\delta \sim 0,05$ et le maximum est à $y/\delta \sim 0,25$.

Mis à part le voisinage de la paroi $y/\delta < 0,03$ où les tensions de viscosité sont élevées, et atteignent à la paroi la valeur correspondant à $(C_f)_A$, les tensions totales de frottement τ sont presque égales aux tensions turbulentes.

A titre d'exemple, la figure 9 donne, dans le cas où $Z = 210 \text{ mm}$, le frottement par unité de volume $\frac{\partial \tau}{\partial y}$, donc le transfert orthogonal à la paroi de la quantité de mouvement, opéré par le frottement τ .

Pour le taux d'aspiration 0,0185 et $Z/\delta \sim 9$ ce terme change de signe, de y/δ égale 0,003 à $y/\delta = 0,24$ et provoque une accélération de la particule.

Notons que les coefficients de corrélation $\frac{\overline{v_1 v_3}}{\sqrt{\overline{v_1^2} \overline{v_3^2}}}$ sont assez peu modifiés par l'effet de l'aspiration, sauf pour $y/\delta < 0,2$ et $A > 0,025$.

Les figures 10 et 11 correspondent respectivement aux variations relatives des intensités de turbulence $-(I_{1A} - I_1)/I_1$ et $-(I_{3A} - I_3)/I_3$ et des tensions turbulentes

$$-\left[\frac{\overline{v_1 v_3}}{\overline{v_1 v_3}} - (\overline{v_1 v_3})_A \right] / \overline{v_1 v_3}$$

en fonction de l'aspiration. Cet effet croît avec l'aspiration A, et avec la longueur Z sur laquelle elle s'exerce, et décroît lorsque la distance à la paroi augmente.

3.8. Production de turbulence. Spectres.

3.8.1. La production, par unité de volume, de l'énergie cinétique d'agitation turbulente, au détriment de l'énergie cinétique du mouvement moyen, soit :

$-\rho \overline{v_1 v_3} \cdot \frac{\partial v_y}{\partial y}$ est indiquée sur la figure 12, en fonction de y/δ , de Z et du taux d'aspiration.

L'aspiration a pour effet de réduire considérablement la production d'énergie turbulente.

A titre d'exemple, pour $Z = 210$ mm, cette production est évaluée à 42 p. 100 de celle constatée en l'absence d'aspiration dans le cas $A = 0,0030$ et à 14 p. 100 lorsque $A = 0,0185$.

3. 8. 2. Des spectres d'énergie $F(K)$ des fluctuations longitudinales v_1 sont indiqués sur la figure 13, dans le cas où $Z = 210$ mm en l'absence d'aspiration et pour un taux d'aspiration $A = 0,0185$. Le nombre d'ondes est $K = 2 \pi n/V$, n étant la fréquence.

Pour les grands nombres d'ondes K , les valeurs de $F(K)$ sont diminuées par l'effet de l'aspiration, ce qui a donc pour résultat de diminuer la dissipation en chaleur par la viscosité de l'énergie cinétique de la turbulence.

Pour les faibles nombres d'ondes, correspondant aux tourbillons de dimensions comparables à l'épaisseur δ de la couche limite, et qui portent 50 p. 100 environ de l'énergie turbulente, les fonctions $F(K)$ ont des valeurs voisines. Ceci tend à indiquer que l'aspiration à $A = 0,0185$ et $Z = 9 \delta$ ne modifie presque pas l'échelle de la turbulence.

La fonction $F(K)$ en l'absence de l'aspiration comporte une zone ($25 < K \cdot 10^3 < 1\ 000$) de faible pente qui correspond à une production de turbulence élevée. Avec l'aspiration $A = 0,0185$ la courbure est plus régulière, correspondant à une production moindre.

Mais la diminution de production de la turbulence, sous l'effet de l'aspiration, l'emporte sur celle de la dissipation, car en définitive les intensités de turbulence sont fortement réduites.

4 - CONCLUSIONS.

L'aspiration uniforme à travers la paroi, appliquée en aval du bord d'attaque, dans les conditions de ces expériences, modifie profondément la couche limite.

4. 1. Les vitesses moyennes locales longitudinales subissent des effets relatifs qui croissent avec le taux de l'aspiration, diminuent lorsque croît la distance à la paroi, et augmentent linéairement avec la longueur sur laquelle l'aspiration est exercée ($Z/\delta > 3$).

Les vitesses moyennes locales orthogonales à la paroi paraissent évoluer peu en fonction de la distance à celle-ci.

A l'exception du voisinage du début de l'aspiration, et de la paroi poreuse, les lignes de courant sont approximativement rectilignes, leur pente est de l'ordre du taux d'aspiration.

L'épaisseur de la couche dans laquelle s'exerce l'effet de l'aspiration est voisine de celle de la couche limite, à la

distance $Z/\delta \sim 20$ pour un taux de 0,0050.

Lorsque le taux d'aspiration est supérieur à 0,005, une représentation semi-empirique des vitesses longitudinales peut être utilisée, jusqu'à $y/\delta = 0,1$ et à l'exception du voisinage du début de l'aspiration.

Les profils des vitesses évoluent en général au long de l'écoulement ; le premier terme de l'accélération ne peut alors être négligé.

Des perturbations en envergure des vitesses de l'ordre de ± 3 p. 100 se manifestent, et subsistent même lorsque l'aspiration est intense.

4. 2. Les épaisseurs de quantités de mouvement et d'énergie sont presque constantes lorsque le taux d'aspiration est égal au coefficient de frottement à la paroi en l'absence d'aspiration. Pour des taux plus élevés, la couche limite se résorbe.

Le paramètre de forme H est diminué par l'effet de l'aspiration : jusqu'à 1,1 lorsque $Z/\delta \sim 20$ $A/C_f \sim 6$.

4. 3. La pente des lignes de courant à la frontière de la couche limite décroît lorsque croît le taux d'aspiration ; s'annule pour

$A = 0,002$ et devient négative pour les taux d'aspiration plus élevés.

Le coefficient de frottement turbulent et visqueux, local à la paroi, augmente avec le taux d'aspiration, atteint $2A$ lorsque $A/C_f \sim 1$ et devient inférieur à $2A$ pour les taux d'aspiration plus élevés.

De même, le coefficient de dissipation en turbulence et en chaleur, de l'énergie cinétique du mouvement moyen augmente avec A atteint la valeur A pour $A/D \sim 1,5$ et devient inférieur à A pour les taux d'aspiration plus élevés.

4.4. Les intensités de turbulence et de tensions turbulentes tangentielles sont fortement diminuées par l'aspiration, dans toute l'épaisseur de la couche limite.

Dans le cas des fortes aspirations, le maximum des tensions turbulentes tangentielles diminue et s'éloigne de la paroi. Le frottement visqueux et turbulent par unité de volume $\frac{\partial \tau}{\partial y}$ change de signe, et provoque une accélération de la particule, par exemple de $y/\delta = 0,003$ à $0,24$ pour le taux d'aspiration $0,0185$ et $Z/\delta \sim 9$.

Le coefficient de corrélation entre les fluctuations de vitesses est peu modifié par l'aspiration.

4.5. La production d'énergie cinétique de la turbulence, au détriment de celle du mouvement moyen, est considérablement réduite par l'effet de l'aspiration. A la distance $Z/\delta \sim 9$ cette réduction est évaluée à 58 p. 100 pour $A = 0,0030$ et 86 p. 100 lorsque $A = 0,0185$.

La dissipation en chaleur de l'énergie cinétique de la turbulence, est diminuée par l'aspiration, mais dans une moindre proportion que la production, car l'intensité de turbulence est diminuée.

L'échelle de la turbulence n'est presque pas modifiée par l'effet de l'aspiration, de même que l'épaisseur de la couche limite turbulente étudiée.

Marseille, le 12 juillet 1960

(Communication faite au Xème Congrès International de Mécanique appliquée, Stresa, septembre 1960)

Manuscrit reçu le 25 mai 1961

BIBLIOGRAPHIE.

- [1] - KAY J. M.
Boundary layer flow along a flat plate with uniform suction.
ARC. Rep. Memo. 2626, 1948, London.
- [2] - MIKLEY H. S., ROSS R. C., SQUYERS A. L. and STEWART W. E.
Heat, mass and momentum transfer for flow over a flat plate
with blowing or suction.
M. I. T., NACA T. N. 3208, 1954, July, Washington.
- [3] - SCHLICHTING H.
Boundary layer theory.
Pergamon Press, 1955, London.
- [4] - DUMAS R. et MIRANNE L.
Réalisation d'un analyseur harmonique double.
O. N. E. R. A., 9. 2., 1955, Paris, non publié.
- [5] - GAVIGLIO J.
Sur quelques problèmes de mesures de turbulence, effectués
à l'aide de l'anémomètre à fils chauds parcourus par un
courant d'intensité constante.
Thèse de Doctorat, O. N. E. R. A., Sept. 1958, Paris.

- [6] - FAVRE A. et GAVIGLIC J.
Turbulence et perturbations dans la couche limite d'une
plaque plane.
Boundary layer Research Meeting. AGARD, April 1960,
London.
- [7] - PECHAU W.
Calculation of the turbulent boundary layer with continuously
distributed suction.
Boundary layer Research Meeting, AGARD, April 1960,
London.
- [8] - WUEST W.
Experimental investigation on Boundary layer suction by
series of slits and holes.
Boundary layer Research Meeting. AGARD, April 1960,
London.

Fig.1. _ VEÏNE D'EXPERIENCE _ DISPOSITIF EXPERIMENTAL _

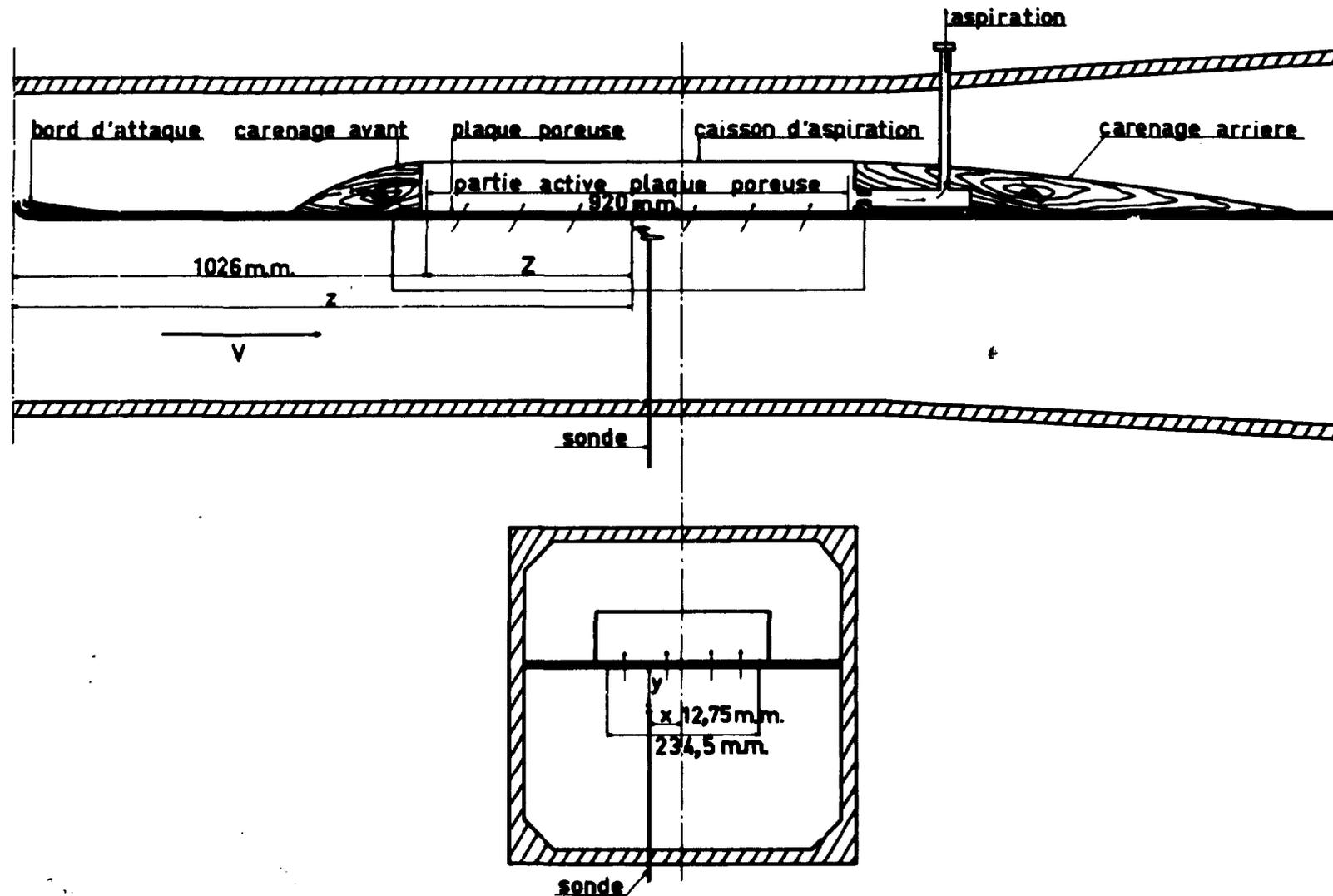


Fig.: 2 - PROFILS DES VITESSES MOYENNES

Z = 300 mm. V = 11 m/s. $\delta = 24,9$ mm. $Re_{\delta} = 18900$

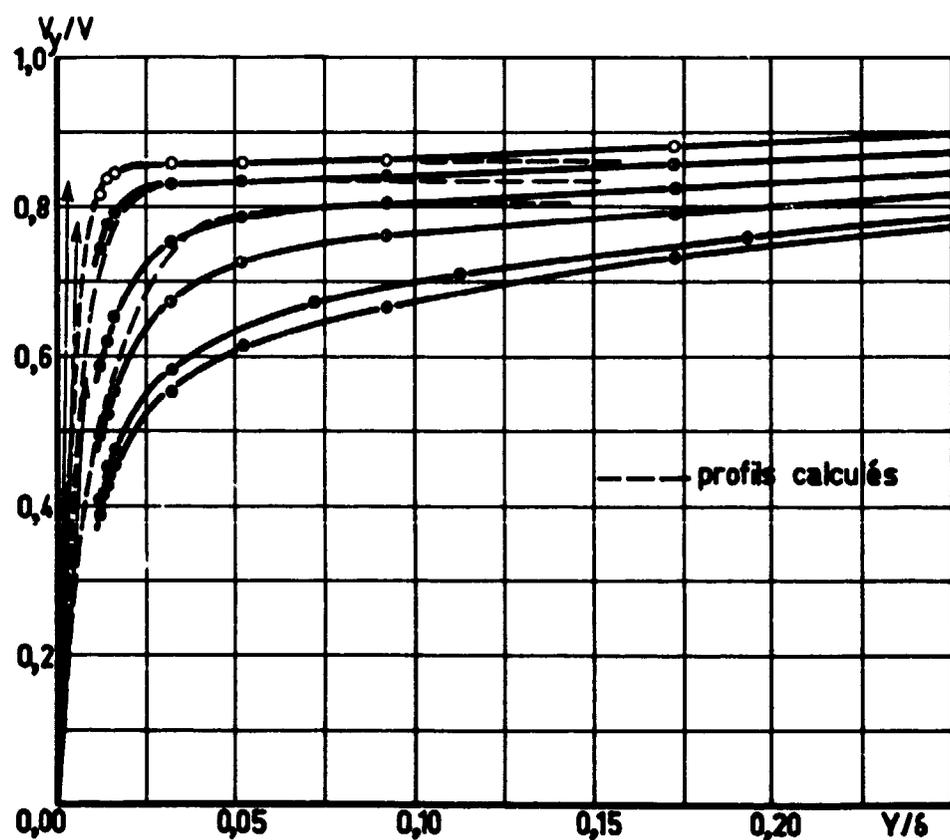
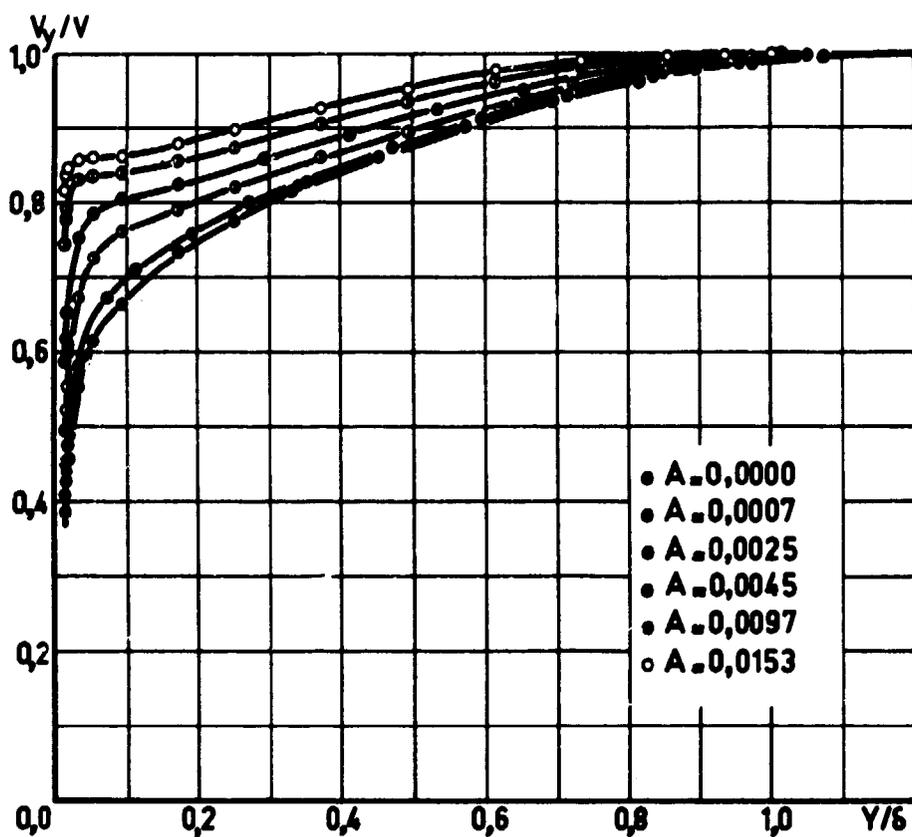


Fig.3. _ EFFET DE L'ASPIRATION SUR LES VITESSES _

----- valeurs calculées

- A = 0,0010
- A = 0,0025
- A = 0,0050
- A = 0,0160

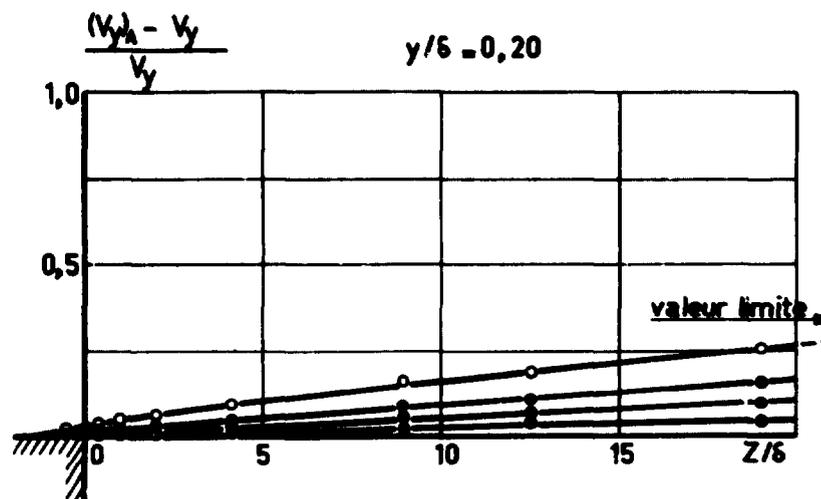
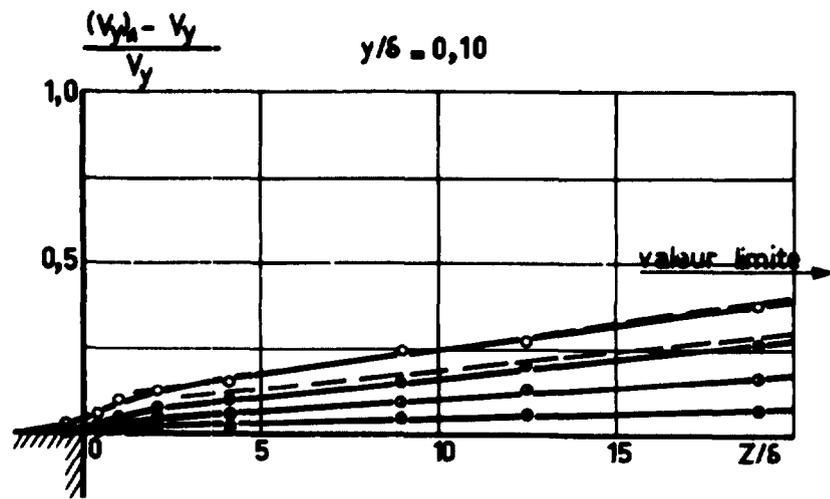
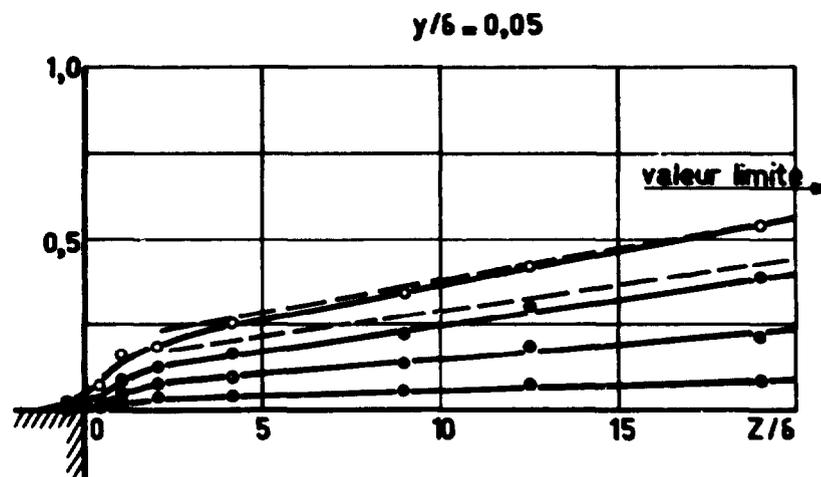
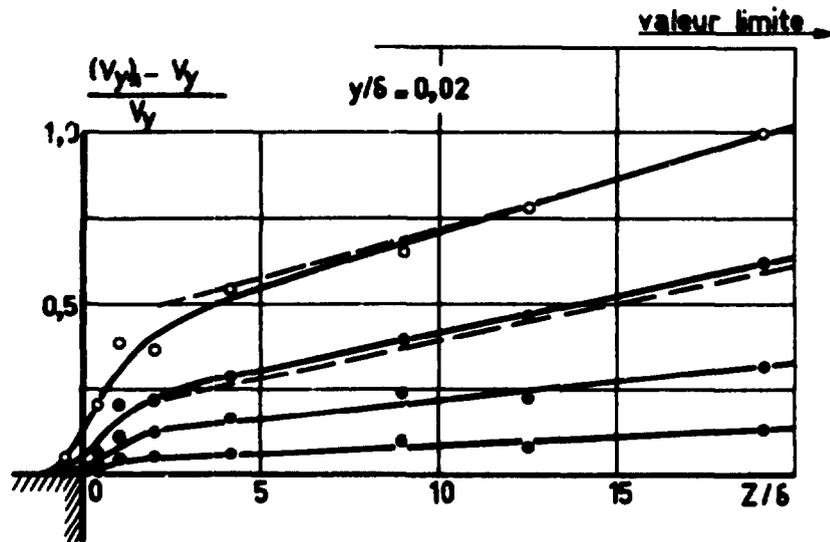
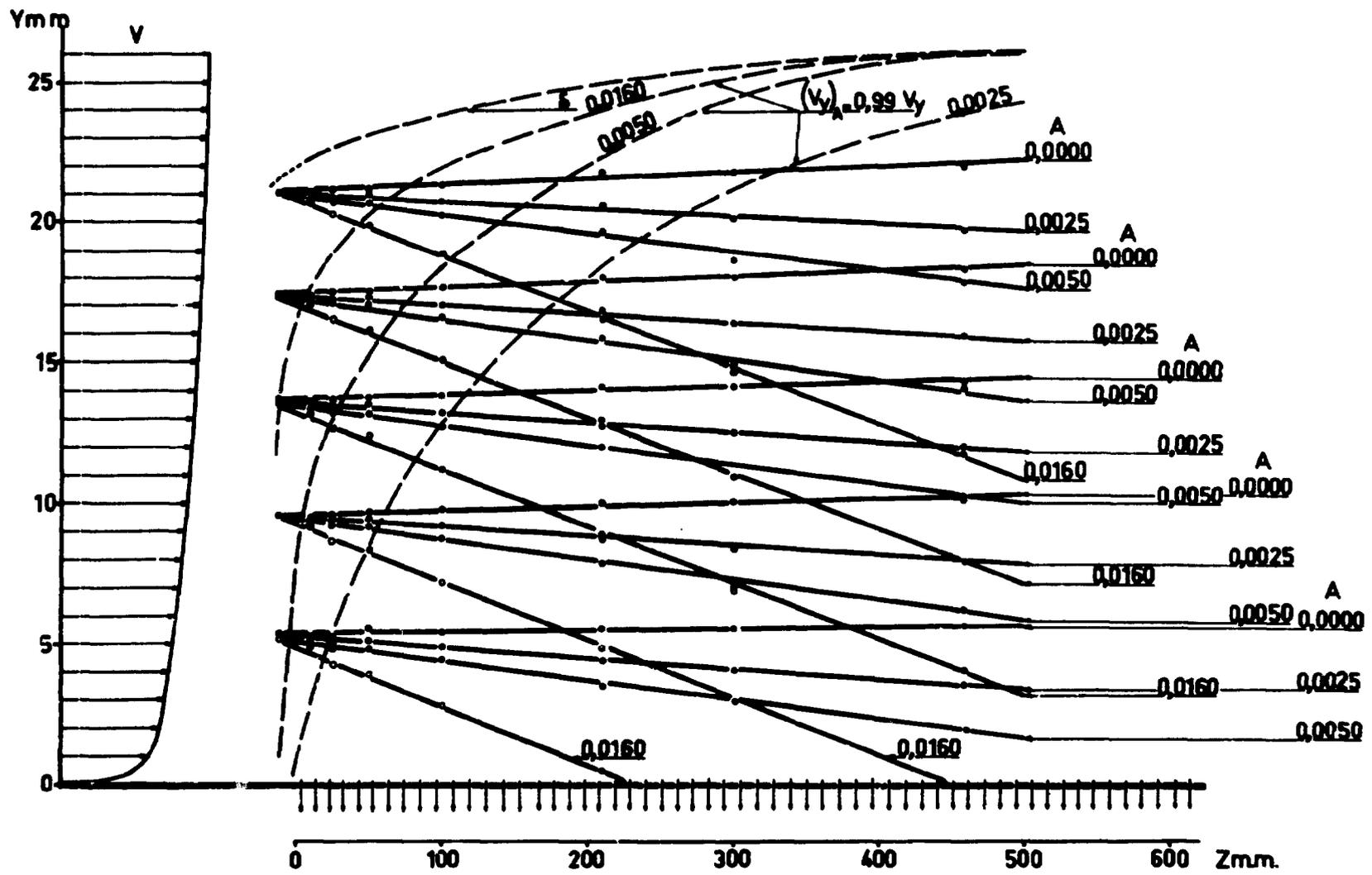


Fig.4. LIGNES DE COURANT.



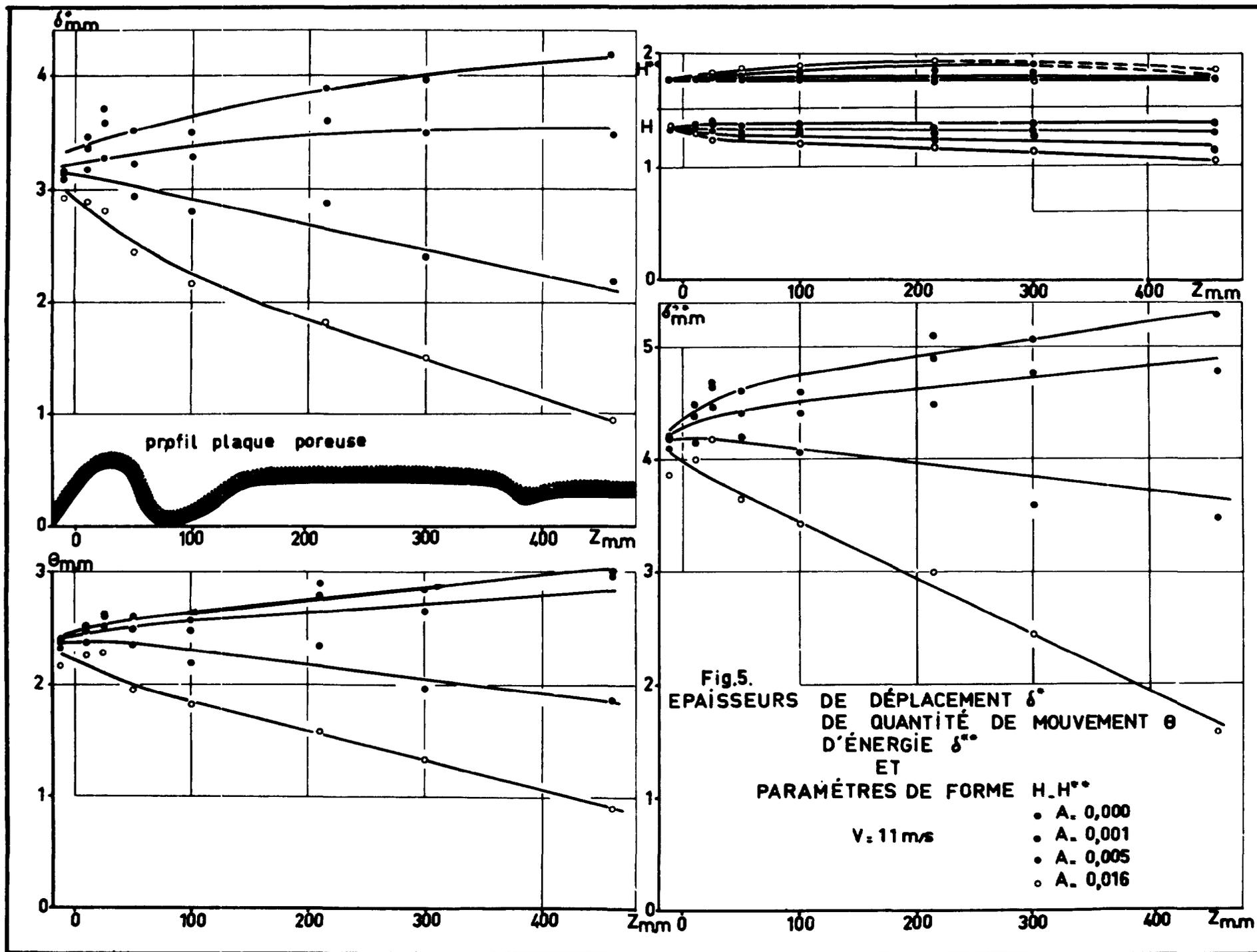
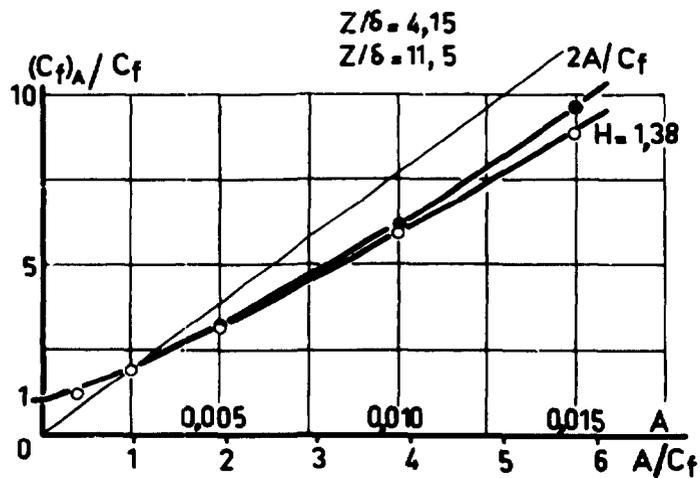
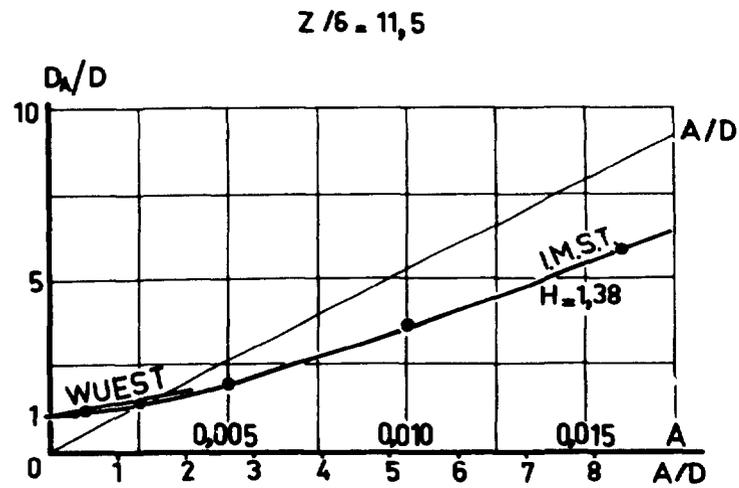


FIG. 6.

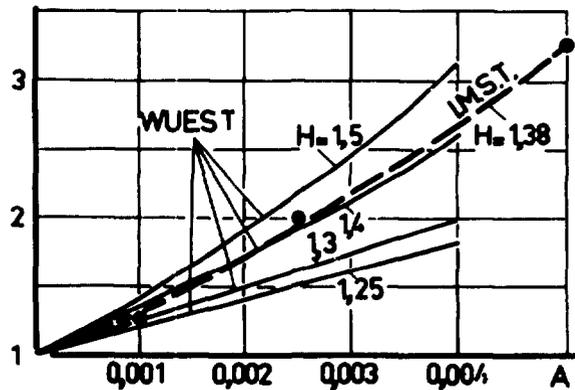
COEFFICIENTS DE FROTTEMENT A LA PAROI



COEFFICIENT DE DISSIPATION



$(C_f)_A / C_f$



PENTE DES LIGNES DE COURANT A $Y = \delta$

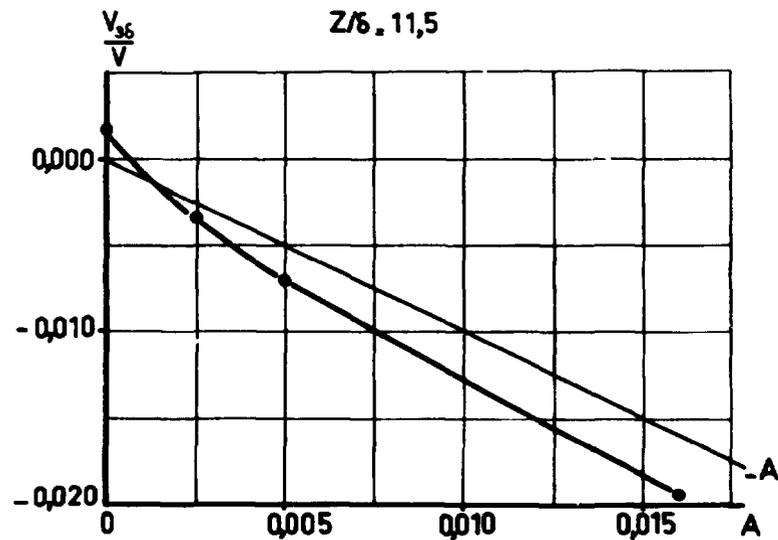


Fig.7a INTENSITÉS DE TURBULENCE LONGITUDINALE.

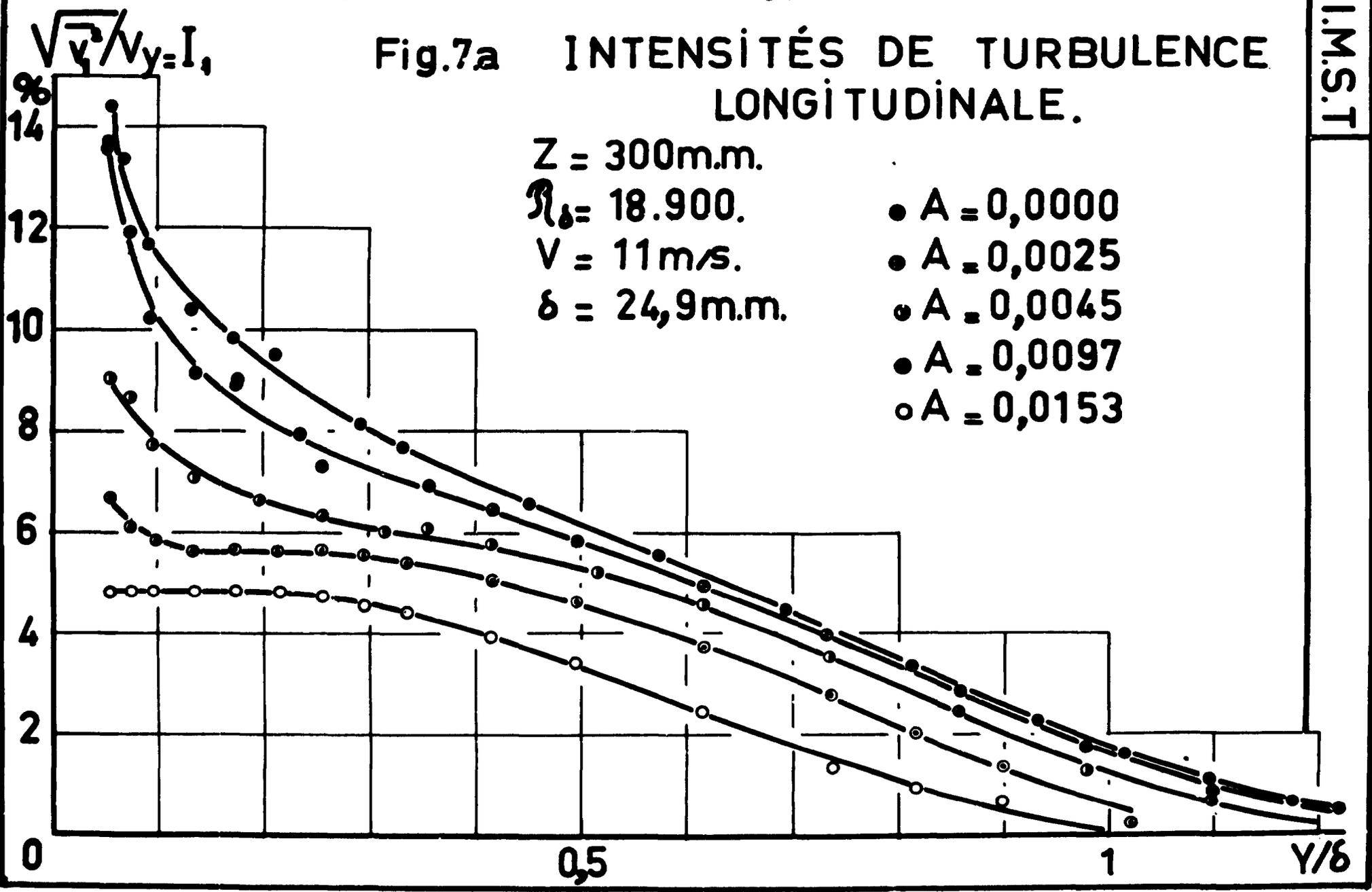
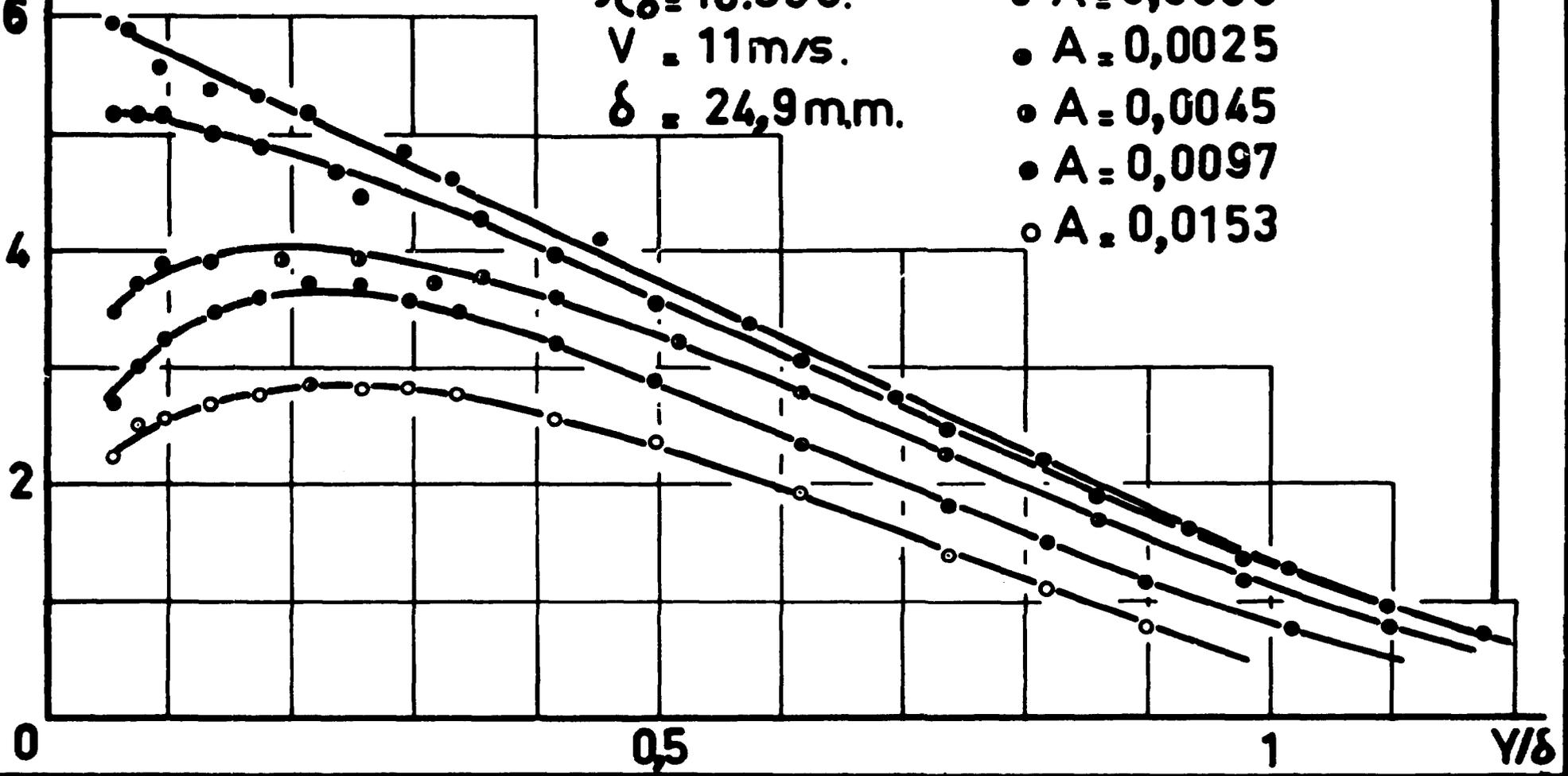


Fig.7b. INTENSITÉS DE TURBULENCE TRANSVERSALE.

$\frac{\sqrt{v_x^2}}{v_y} = I_x$
%

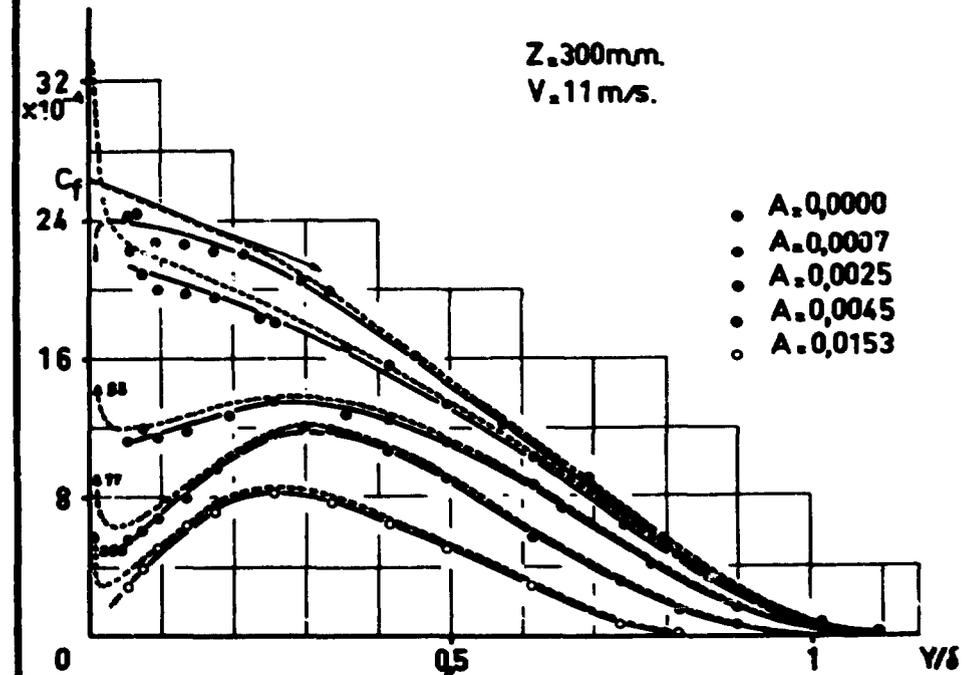
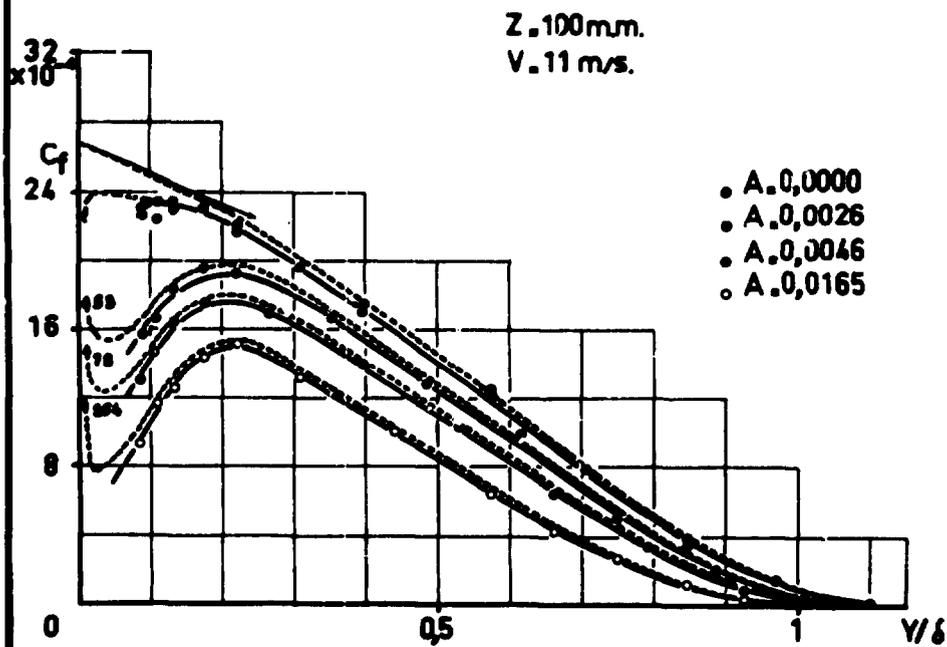
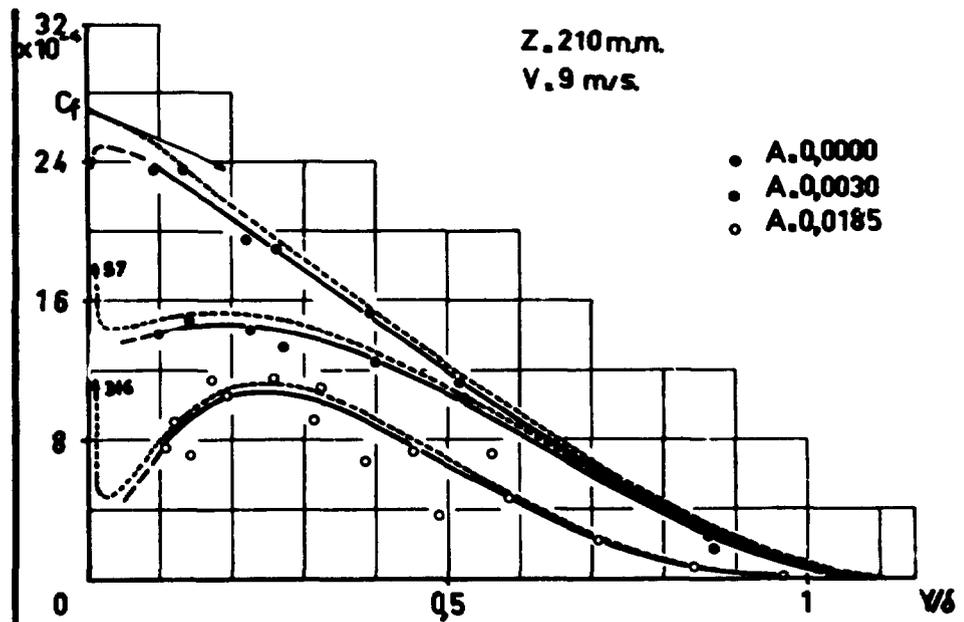
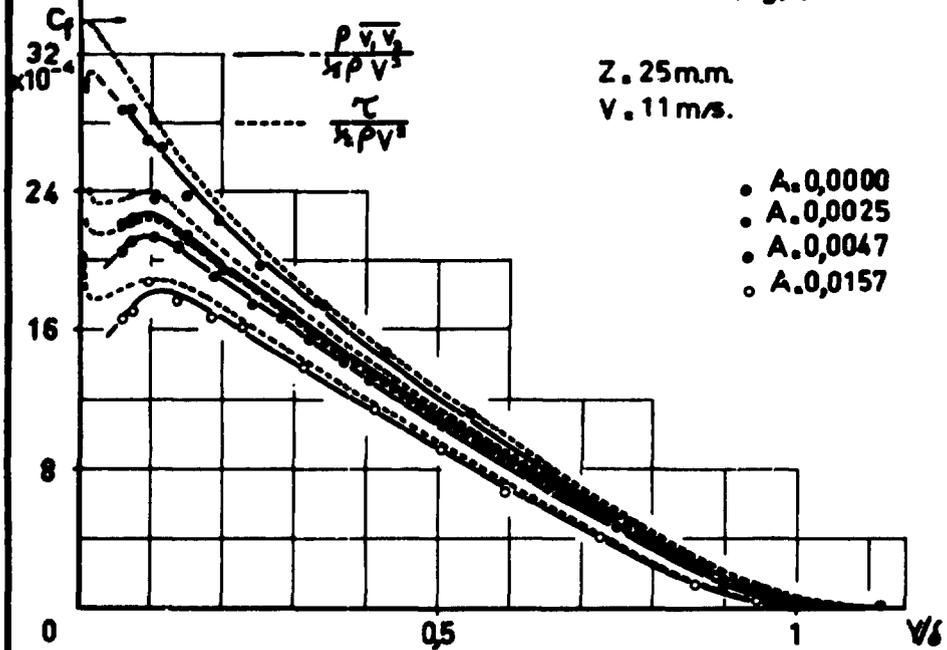
Z = 300m.m.
 $R_{\delta} = 18.900.$
V = 11m/s.
 $\delta = 24,9m.m.$

- A = 0,0000
- A = 0,0025
- A = 0,0045
- A = 0,0097
- A = 0,0153



Ludwig et Tillman

Fig.8. TENSIONS DE REYNOLDS.



IMST

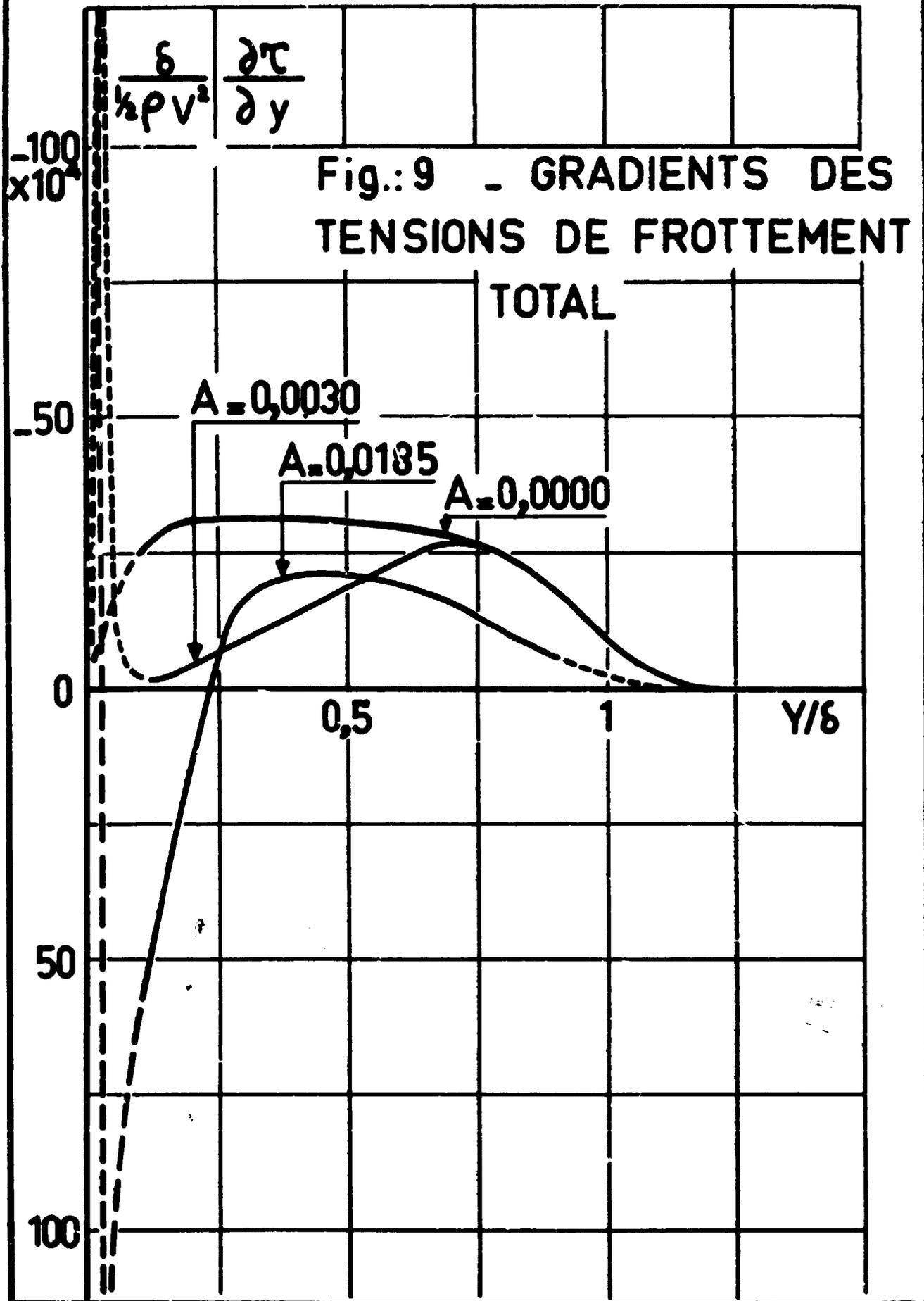


Fig.: 9 - GRADIENTS DES TENSIONS DE FROTTEMENT

Fig.: 10 -

EFFET DE L'ASPIRATION SUR LES INTENSITES DE TURBULENCE :

FLUCTUATIONS LONGITUDINALES v_1

FLUCTUATIONS TRANSVERSALES v_3

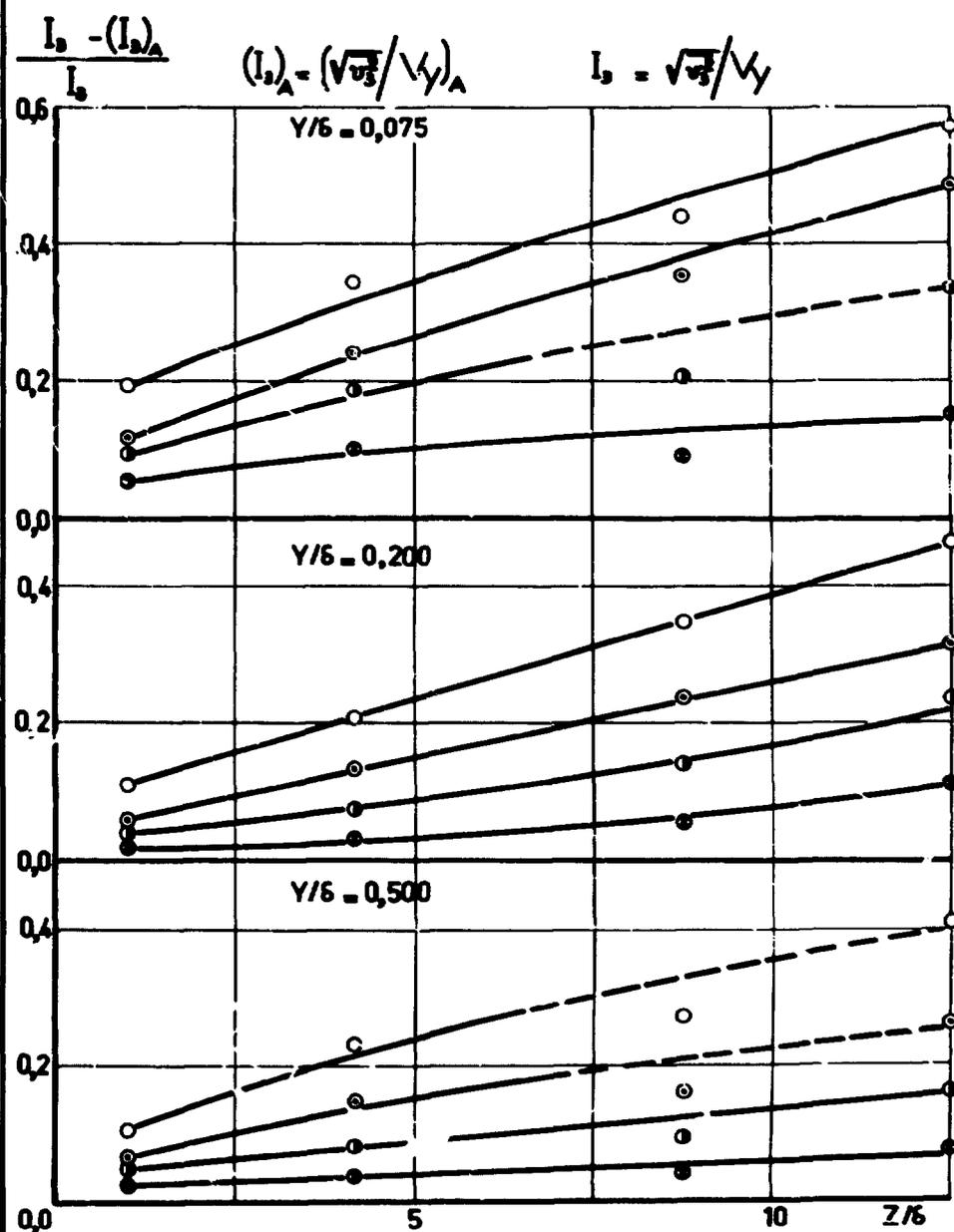
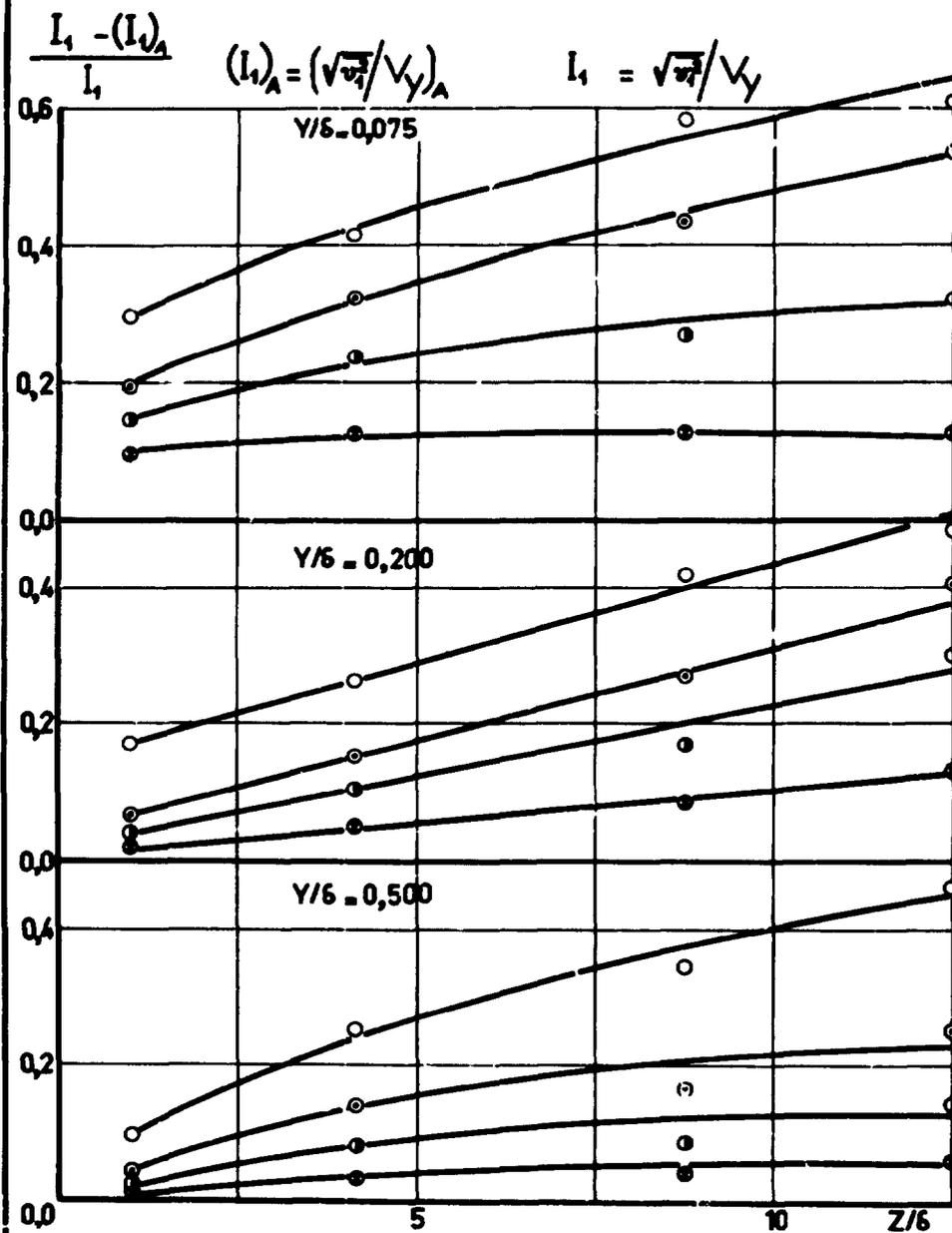
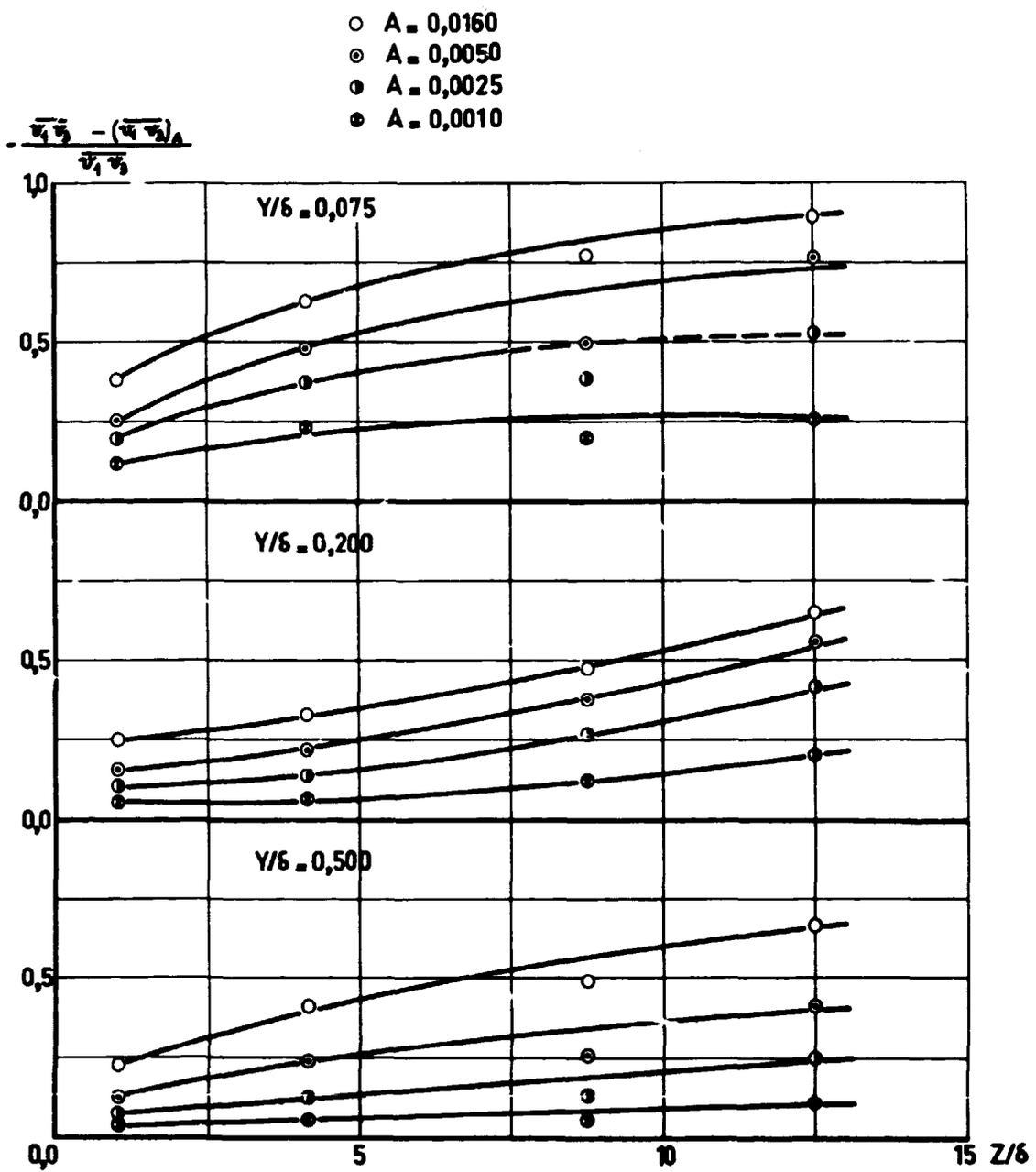


Fig.: 11 -

EFFET DE L'ASPIRATION SUR LES
TENSIONS TURBULENTES



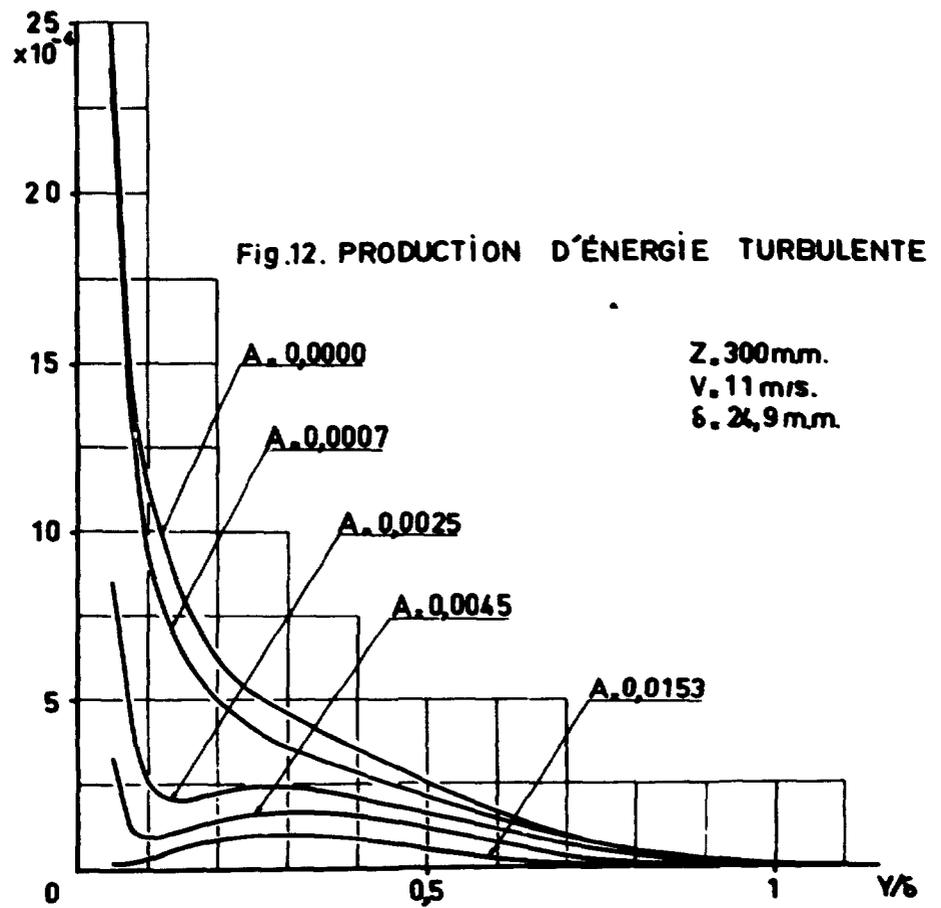
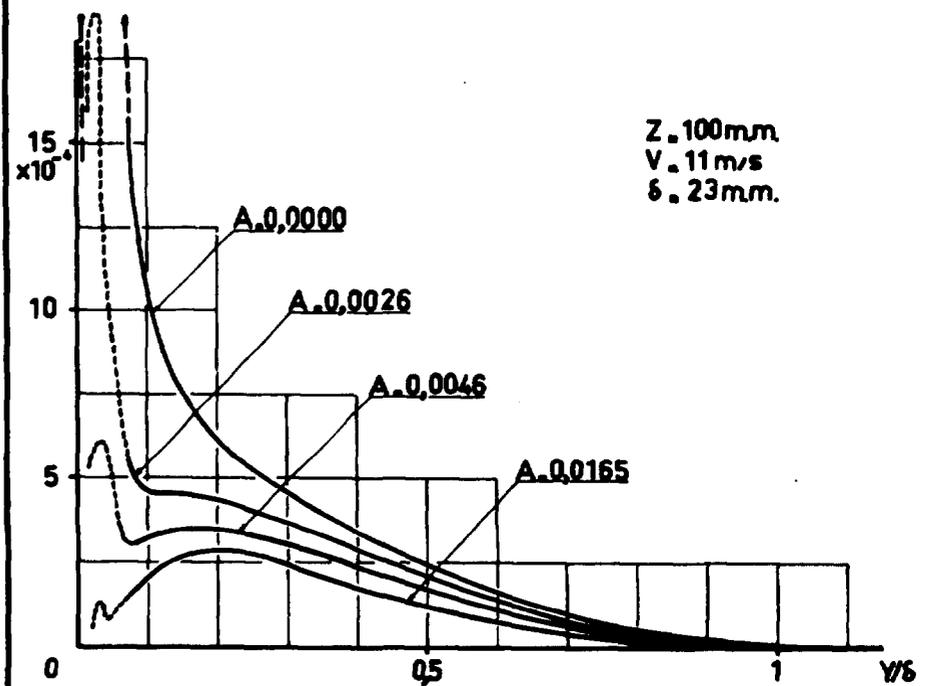
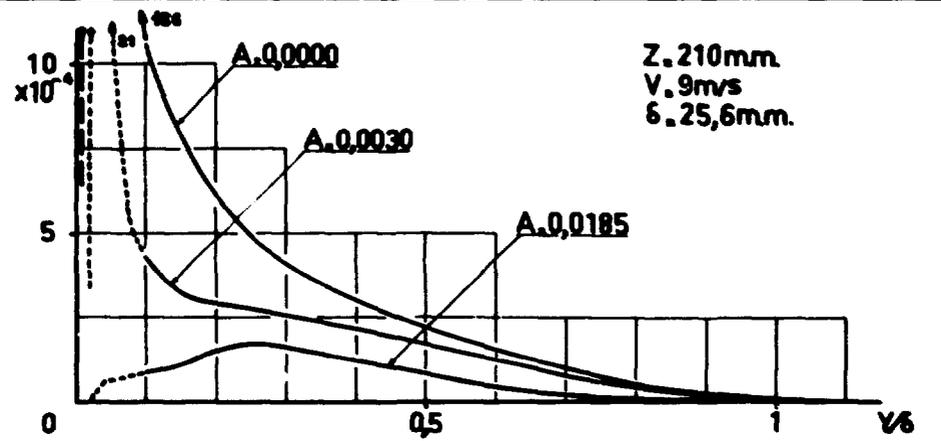
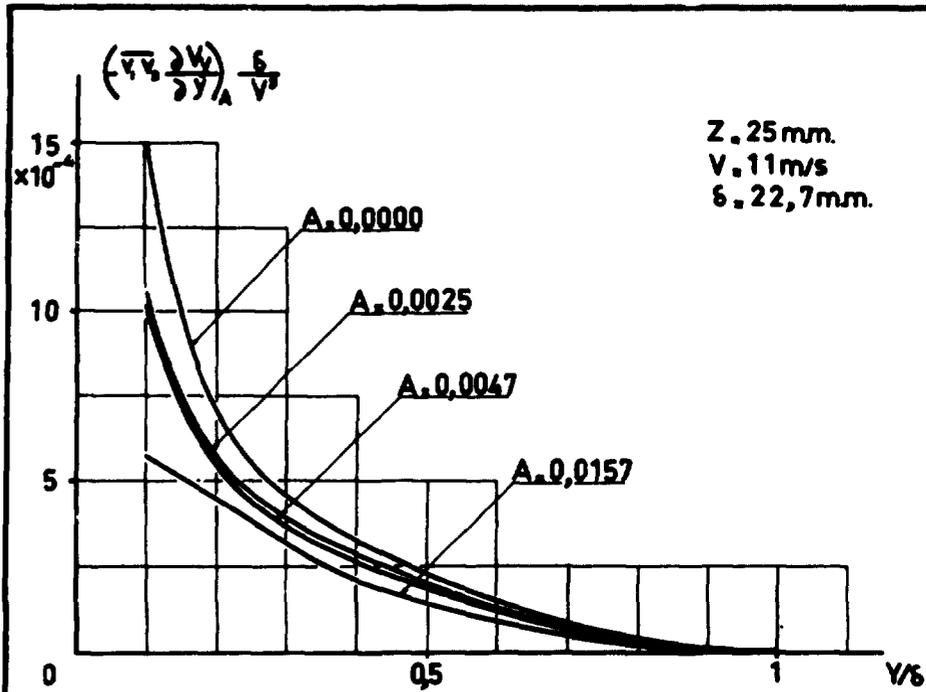
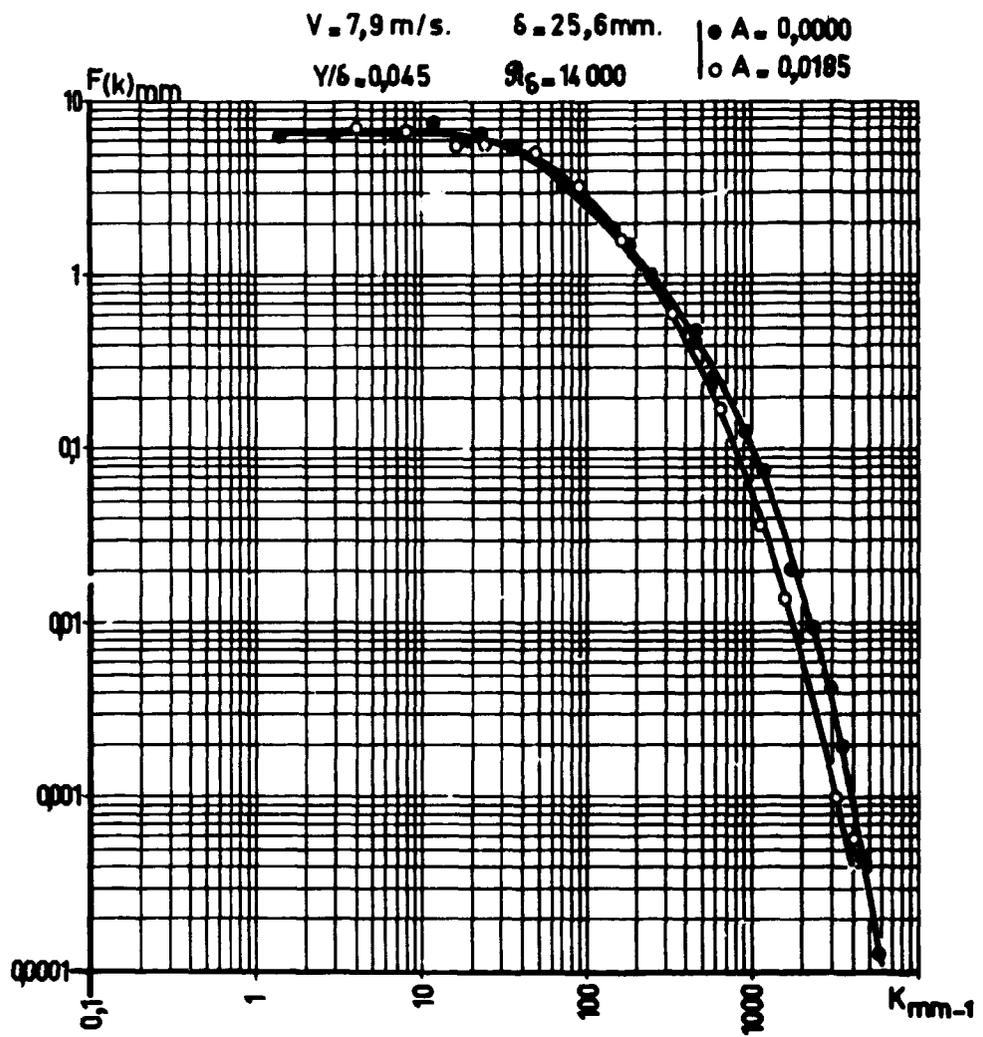


Fig.13 _

SPECTRES DE TURBULENCE



FIN