

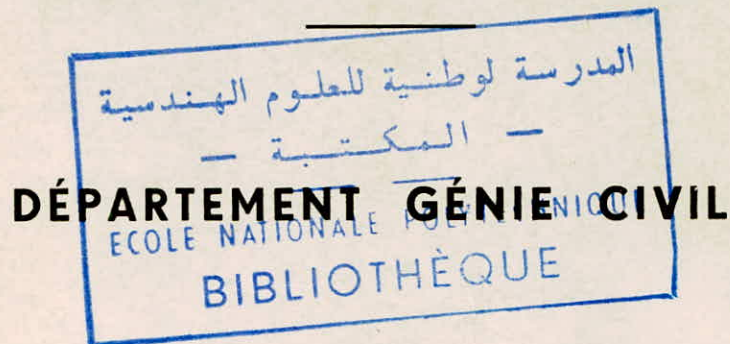
UNIVERSITE D'ALGER



ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

205

THESE DE FIN D'ETUDES



CONTRIBUTION A LA
DETERMINATION DU SEUIL DE WEBER
POUR LES ECOULEMENTS
PASSANT PAR LES ORIFICES CIRCULAIRES

Proposé par :
M. G. LAPRAY

Etudié par :
M. ISMAIL SAMIH

PROMOTION 1973

UNIVERSITE ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المدرسة لوطنية للعلوم الهندسية
DEPARTEMENT GENIE CIVIL
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

PROJET DE FIN ETUDES

CONTRIBUTION A

ETERMINATION

DU TITRE DE WEBER POUR

LES ECOULEMENTS ASSANT

PAR LES CIRIFICES (CIRCULAIRES

PROPOSE PAR ETUDIE PAR

M. M. LAPRAY H. SHAIL T. AMIH

PROMOTION 73

Handwritten signature

Avant Propos

Le présent travail a été effectué au
laboratoire d'hydraulique à l'école nationale
polytechnique d'Alger.

Que Monsieur le Professeur LAPRAY
trouve ici l'expression de ma profonde gratitude pour
le soutien et l'intérêt qu'il a portés à mes
recherches et pour les éminents conseils qu'il m'a
donnés.

A MON PROFESSEUR ET PRESIDENT DE THESE

MONSIEUR LE PROFESSEUR G.LAPRAY:

Q U I

me fait le grand honneur de présider le jury de ma
thèse.

Qu'il me soit permis de lui exprimer ma très
respectueuse gratitude .

Tout au long de ce travail , j'ai pu compter sur
l'appui de ses conseils prodigués avec cordialité
et bien veillance.

Qu'il soit assuré de ma vive reconnaissance et
de ma fidèle amitié.

A MONSIEUR LE PROFESSEUR CHOULGUINE

A MONSIEUR LE PROFESSEUR DAN TAȘCĂ

Ils m'ont témoigné leur confiance et leur
amitié.

Je suis très heureux de leur exprimer ma
reconnaissance.

Qu'ils trouvent ici tous mes remerciements
les plus sincères.

J E D E D I E C E T T E T H E S E :

A C E L L E Q U E J ' A D O R E : L A P A L E S T I N E .

-----○-----

A M O N P E R E .

-----○-----

A M A M E R E

-----○-----

A M O N F R E R E O M A R

-----○-----

A M E S S Œ U R S A I A L E T H A N A N E

-----○-----

A M A N I E C E F A T E N E

-----○-----

A M E S A M I S

-----○-----

F A I B L E T E M O I G N A G E D E M A P R O F O N D É

A F F E C T I O N E T D E M O N A F F E C T U E U X

A T T A C H E M E N T .

T A B L E D E S M A T I E R E S

	<u>Page</u>
<u>CHAPITRE I</u>	
ETUDE THEORIQUE DU JET	1
<u>CHAPITRE II</u>	
ETUDE DE LA TRAJECTOIRE DU JET	7
<u>CHAPITRE III</u>	
ETUDE DU JET PAR LE THEOREME DE LA QUANTITE DE MOUVEMENT.	24
<u>CHAPITRE IV</u>	
ETUDE DU JET DANS LA SECTION CONTRACTEE	34
<u>CHAPITRE V</u>	
ETUDE DE LA RESISTANCE DE L'AIR	51
<u>CHAPITRE VI</u>	
ETUDE DE LA SIMILITUDE DE REECH-FROUDE	65

§§§§§§§§§§§§§§§§

///SYMBOLS ///

- ϕ : Diamètre de l'orifice
A: Aire de l'orifice
 A_c : Aire de la section contractée du jet
 C_c : Coefficient de contraction
 C_v : Coefficient de vitesse
m: Coefficient de débit
H: Charge
 V_t : Vitesse théorique du jet
 V_j : Vitesse du jet calculée par la trajectoire
 V_c : Vitesse du jet dans la section contractée
 V_q : Vitesse du jet calculée par le théorème de la quantité de mouvement
Q: Le débit
g: Accélération de la pesanteur
 \bar{w} : poids spécifique
 ρ : masse volumique
 ν : viscosité cinématique
 σ : tension superficielle
F: force du jet mesurée
P: contre poids
 z_1 : bras de levier du contre poids
 z_2 : bras de levier de la force du jet
R: nombre de Reynolds
 W_e : nombre de Weber

I N T R O D U C T I O N

Le but de mon projet est la détermination expérimentale de l'échelle minimum concernant les grandeurs "charge, débit, diamètre, vitesse, masse volumique" caractérisant l'écoulement passant par les orifices circulaires en mince paroi ; pour laquelle les lois de la similitude de REECH-FROUDE restent applicables.

Et encore la détermination du nombre de WEBER correspondant qui constitue le seuil en dessous duquel les lois de REECH-FROUDE ne sont plus valables en raison de l'effet de la tension superficielle.

Les orifices en mince paroi étant des ouvrages courts , la perte de charge étant négligeable , alors la similitude de REYNOLDS n'a pas de signification dans le domaine de ces ouvrages.

Ceci a une grande importance puisque l'application de la similitude de Reynolds impose une échelle très grande par rapport à celle imposée par la similitude de Weber, ce qui diminue beaucoup les frais de construction des modèles en travaillant avec la similitude de Weber.

La limite de validité que l'on cherche sera atteinte lorsque le phénomène se produisent sur le modèle réduit, aura été sérieusement affecté par la tension superficielle . Le nombre de Weber y correspondant sera appelé "Seuil de Weber" .

Chapitre I

oo--ÉTUDE THÉORIQUE DU JET --oo

I-1: Définitions:

Un orifice est en mince paroi lorsque le jet liquide ne touche que le bord interne de l'orifice, c'est le cas des orifices taillés en biseau Fig(1), ou le cas d'un orifice quelconque dont l'épaisseur de la paroi est inférieure à la moitié de la petite dimension de l'ouverture .

A l'intérieur du réservoir, au voisinage de l'orifice toutes les lignes de courant convergent vers celui-ci. Et dans le plan de la paroi et à l'extérieur, à l'aval de celle-ci, elles deviennent de moins en moins convergentes, et à une distance égale environ au diamètre de l'orifice elles deviennent sensiblement parallèles.

La section du jet diminue donc depuis la section de l'ouverture jusqu'à la section C-C où les lignes de courant deviennent parallèles. La section C-C est appelée section contractée.

I-2: La vitesse théorique du jet:

Considérons un récipient ayant une paroi verticale évidée d'un orifice taillé en biseau, Fig(2). La surface libre du liquide est maintenue constante à l'aide d'un dispositif approprié.

Examinons la ligne de courant A-B, A étant situé dans la surface libre, et B dans la section contractée.

Le niveau du liquide étant constant, le régime de l'écoulement étant permanent, donc on peut appliquer le théorème de BERNOULLI.

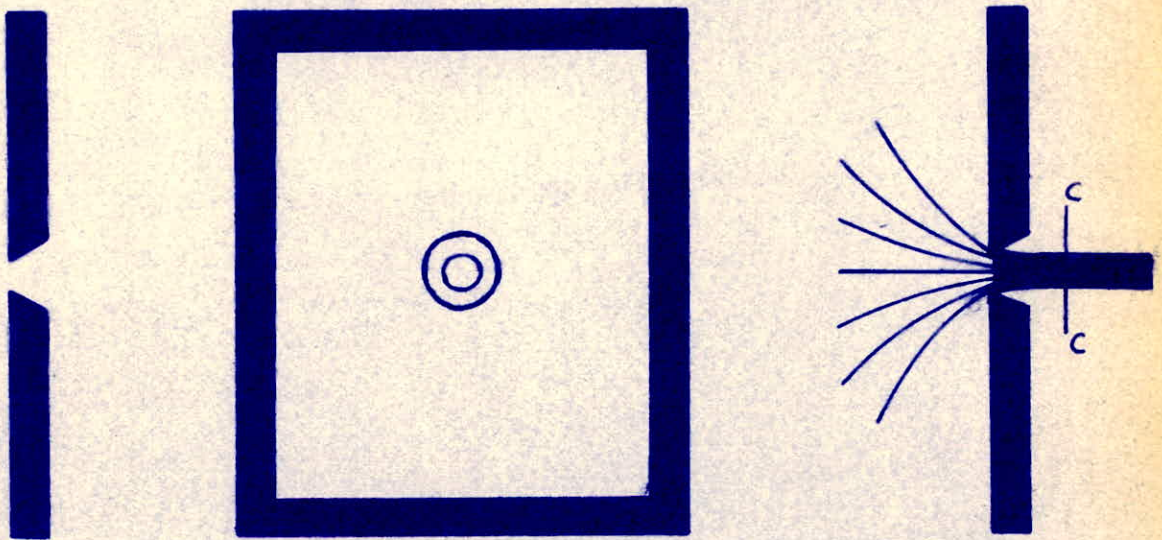


Fig 1

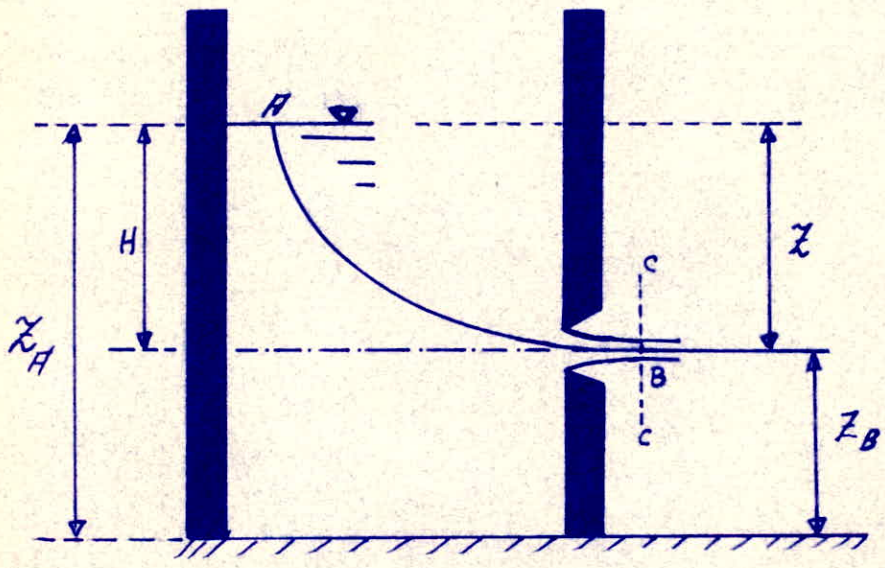


Fig 2

(4)

En prenant le plan inférieur comme niveau de référence, on peut écrire:

$$Z_A + \frac{p_A}{\bar{w}} + \frac{v_A^2}{2g} = Z_B + \frac{p_B}{\bar{w}} + \frac{v_B^2}{2g} + \text{P.d.C}$$

- La pression $p_A = p_B =$ la pression atmosphérique.
- La vitesse $v_A = 0$
- La perte de charge p.d.c étant négligeable; puisque l'expérience montre que les frottements sont négligeables, et encore du fait de l'état presque statique du liquide dans le récipient.

On tire de l'équation ci-dessus:

$$Z_A = Z_B + \frac{v_B^2}{2g}$$

d'où

$$v_B = \sqrt{2g(Z_A - Z_B)} = \sqrt{2gz}$$

z étant la profondeur du point B au dessous de la surface libre du liquide dans le récipient.

La vitesse définie par l'équation ci-dessus augmente avec la racine carrée de z, mais la hauteur de l'orifice étant faible, les cotes Z des lignes de courant passant par la section contractée sont peu différentes, et l'on peut admettre qu'elles sont toutes égales à H, H étant la profondeur du centre de gravité de l'orifice qui est aussi très approximativement le centre de gravité de la section contractée, et l'on a alors pour l'ensemble des lignes de courant:

$$v_t = \sqrt{2gH}$$

qui est la vitesse théorique du jet passant par l'orifice.

I-3: Coefficient de vitesse

La valeur trouvée de V_t doit être en réalité rectifiée par un facteur C_v dit coefficient de vitesse qui permet d'écrire que la vitesse moyenne du jet :

$$V = \sqrt{2gH} \cdot C_v$$

La nécessité de l'emploi du facteur C_v est imputable l'inégale répartition des vitesses dans la section contractée, et aux pertes de charge, qui bien que très petites, ne sont pourtant pas tout à fait négligeables.

C'est pourquoi le coefficient de vitesse C_v doit être considéré comme rapporté à la vitesse moyenne.

I-4: Coefficient de contraction

Le débit passant par l'orifice est en vertu de la continuité

$$Q = A_c V$$

Le rapport entre A_c et A est le coefficient de contraction C_c

$$C_c = \frac{A_c}{A}$$

Donc le débit $Q = A_c \cdot V = A_c \cdot C_v \cdot \sqrt{2gH}$

$$\text{Ou } Q = C_v \cdot C_c \cdot A \sqrt{2gH}$$

I-5: Coefficient de débit

D'après I-4 ; le produit $C_c C_v$ est appelé coefficient de débit m :

$$m = C_c C_v$$

$$\text{et } Q = mA \sqrt{2gH}$$

;;;;;;;;;;;;;

Vitesses Théoriques							
$H \backslash \phi$	5 mm	4	3	2.5	2	1.5	1
24 cm	2,16 m/s	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16	2,16
20	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98	1,98
15	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72	1,72
10	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40	1,40
7	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17	1,17
5	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99	0,99
3	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77	0,77
2	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63	0,63
1	0,44	0,44	0,40	0,40	0,40	0,40	0,40

Chapitre II

--ooAnalyse de la trajectoire du jet oo--

II-1 : Le mouvement d'un projectile

Soit un point matériel soumis à des forces données. Le cas le plus simple se présente la force résultante appliquée est de direction et de grandeur constantes. Le mouvement est simplement curviligne puisque la vitesse initiale du point matériel a une direction différente de celle de la résultante des forces.

Considérons la trajectoire du jet, c'est le cas d'un projectile tiré à partir d'un point d'ordonnée $y=Z$. Fig (3). Un point mobile P est défini par ses coordonnées qui sont fonction du temps:

$$x=f(t)$$

$$y=f(t)$$

En négligeant la résistance de l'air sur le point mobile et en supposant que seule la force de pesanteur intervienne, on pourrait les équations du mouvement suivent l'axe des x et l'axe des y :

$$\frac{\text{Poids}}{g} \cdot \ddot{x} = 0$$

$$\frac{\text{Poids}}{g} \cdot \ddot{y} = \text{Poids}$$

d'où $\ddot{x}=0$

$$\ddot{y}=g$$

par intégration on aura : $\dot{x}=c_1$
 $\dot{y}=gt + c_2$

d'après les conditions aux limites ; à l'instant $t=0$ on a

$$\dot{x} = \dot{x}_0 \quad \text{et} \quad \dot{y} = \dot{y}_0 = 0$$

donc on trouve $C_1 = \dot{x}_0$ et $C_2 = 0$

finalement $\dot{x} = \dot{x}_0$ |
 $\dot{y} = gt$ |

On voit que le point matériel, regardé d'une grande hauteur, semblerait se déplacer avec une vitesse horizontale uniforme \dot{x}_0 , tandis que regardé d'une distance en arrière de l'origine; il semblerait se déplacer comme un point matériel projeté verticalement vers le bas avec une vitesse initiale $\dot{y}_0 = 0$.

Une seconde intégrale nous donne:

$$\begin{cases} x = \dot{x}_0 t + D_1 \\ y = \frac{1}{2} g t^2 + D_2 \end{cases}$$

ici encore, à l'instant initial $t=0$: on a $x=0$ et $y=0$

et par suite $D_1 = D_2 = 0$

$$\text{finalement } \begin{cases} x = \dot{x}_0 t \\ y = \frac{1}{2} g t^2 \end{cases}$$

Ce sont les équations déplacement-temps pour un point mobile du jet, qui définissent complètement le mouvement.

Pour avoir l'équation de la trajectoire ça suffit d'éliminer t entre les deux équations :

$$y = \frac{1}{2} g \frac{x^2}{\dot{x}^2}$$

C'est l'équation d'une parabole.

\dot{x}_0 est appelée la vitesse d'après la trajectoire et sera remplacée par V_j .

Pour déterminer la vitesse V_j ; on doit connaître la valeur de t , et la valeur de x .

t sera déterminé par l'expression $y = \frac{1}{2} g t^2$.

et x qui représente la portée horizontale du jet sera mesurée sur notre appareil et sera remplacée par L . Fig(4).

En d'autres termes $V_j = \frac{L}{t}$.

III-2: APPAREILLAGE

Il s'agit d'un modèle qui nous permettra de faire l'étude des orifices circulaires en mince paroi sous une charge variante de 0,24m à 0,01m.

La maquette est fabriquée en plexiglas, et constituée des éléments suivants:

- 1: Un bassin
- 2: Un vase de Lamariotte amélioré par H.LAPRAY
- 3: Une balance
- 4: Un dispositif de fixation de la maquette

1: Le bassin: Fig (5)

Il a une forme cubique muni d'un dispositif de fixation des orifices.

On mesure la charge H dans le bassin moyennant une échelle graduée mise dans une chambre tranquillisante qui a pour effet de diminuer l'influence des fluctuations qui se produisent lorsque l'on augmente la charge, ce qui gêne la lecture.

A l'extérieur du bassin il y a encore une échelle graduée sur laquelle glisse un vernier à l'aide duquel on peut mesurer la position du point d'impact du jet.

2: Le vase de Lamariotte . Fig (6)

C'est une éprouvette de diamètre $\phi=14\text{cm}$. Il a pour fonction l'alimentation continue donnant ainsi un régime permanent et encore de nous permettre de déterminer le volume d'eau écoulé pendant un certain temps, à l'aide d'une échelle mise dans une chambre tranquillisante, où 1 cm correspond à $155 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3$.

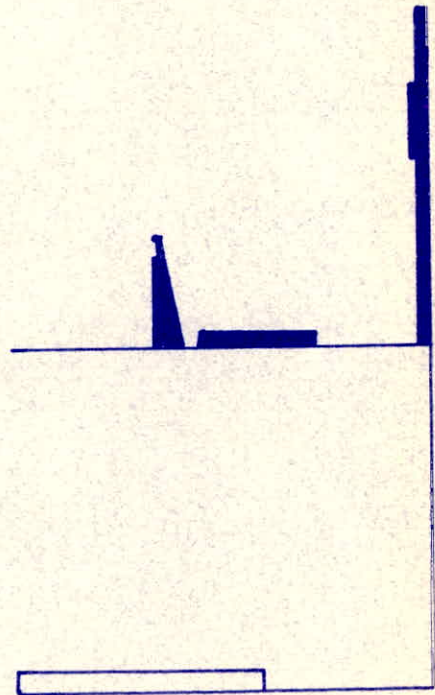
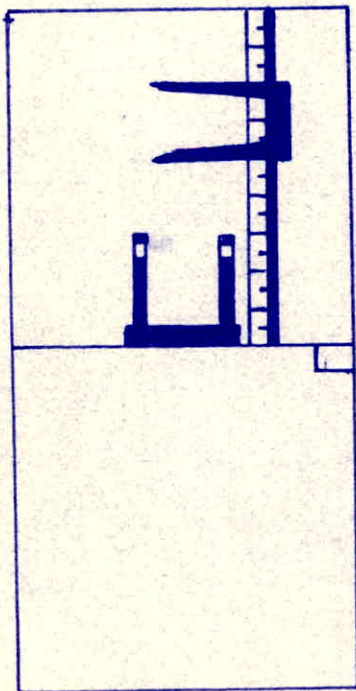
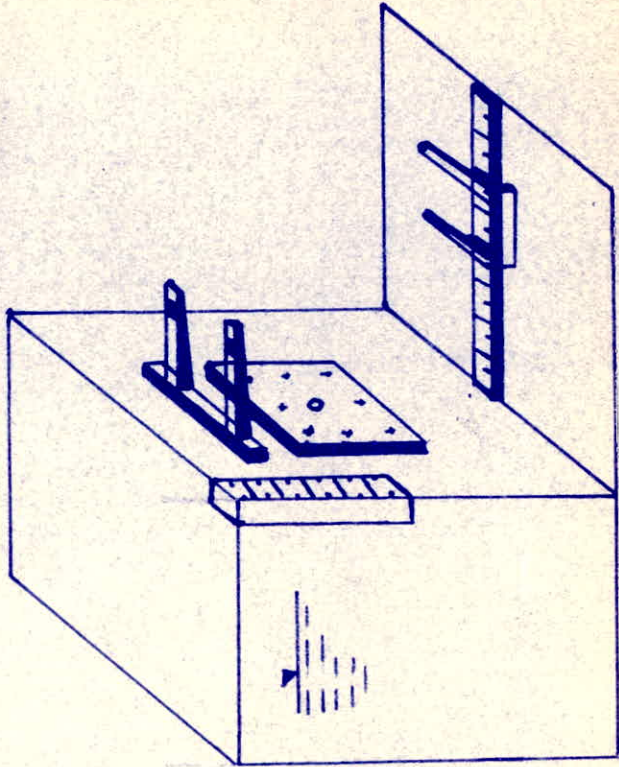
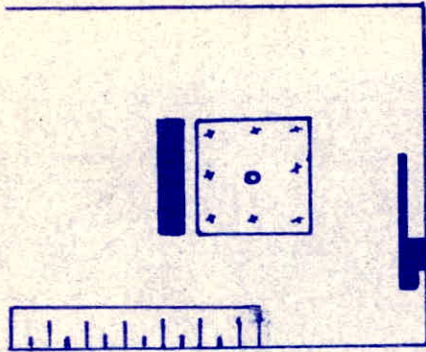


Fig 5

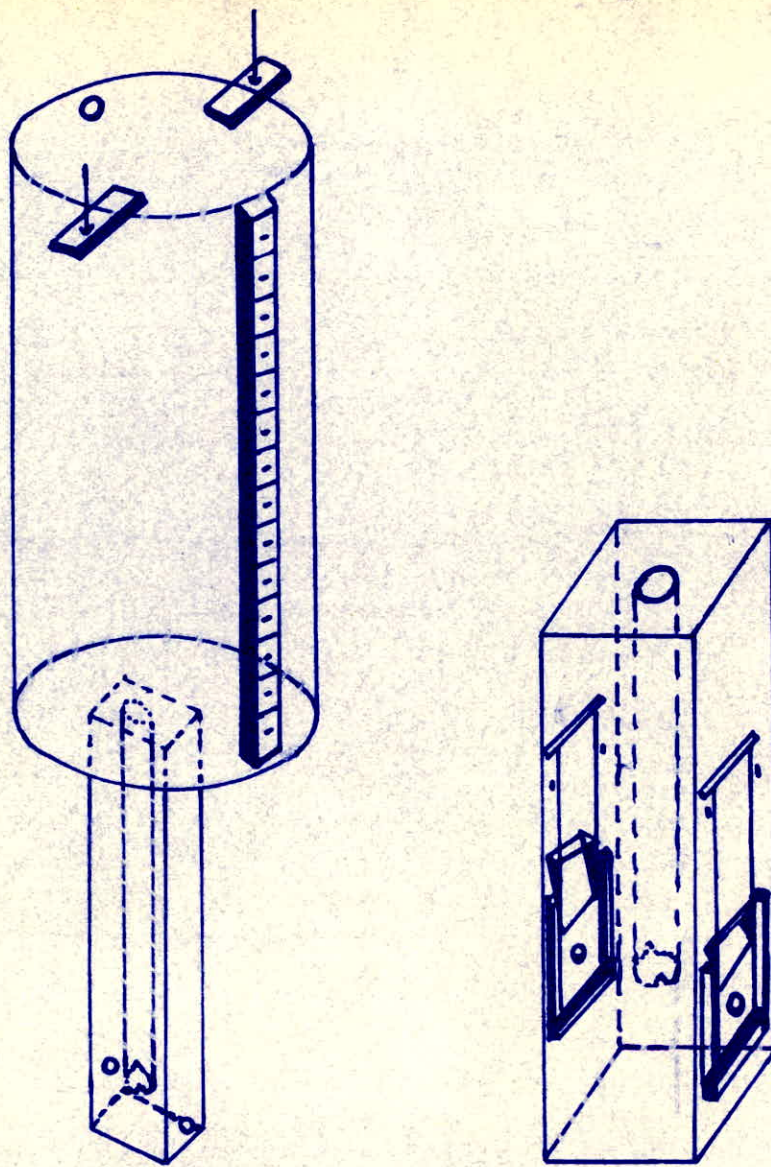


Fig 6

Le vase de Lamariotte est muni d'un tube ayant un trou d'admission d'air, un trou de refoulement d'eau et 2 vannes.

Fonctionnement Fig 7,8,9

Le but de ce vase est comme on a déjà dit est d'assurer une alimentation continue d'eau dans le bassin de telle sorte que la charge reste constante et l'écoulement à travers les orifices soit permanent et uniforme.

Dans l'état initial où il n'y a pas d'écoulement; la pression à la surface du liquide dans le bassin et au niveau de l'échancrure est égale à la pression atmosphérique p_a . Quant à la surface du liquide dans le vase règne la pression

$$p_a - \bar{w}H.$$

Lorsque la charge H diminue, la pression au niveau du liquide dans le bassin devient encore p_a , mais au niveau de l'échancrure elle devient $p_a - \bar{w} \cdot \Delta H$.

Donc pour rétablir l'équilibre de nouveau; l'air entre dans le vase moyennant le trou d'admission correspondant, et par suite l'air augmentera la pression sur la surface d'eau dans le vase, ce qui refoule l'eau du vase par le trou correspondant pour remplacer la quantité d'eau qui vient d'être écoulée et éjectée par l'orifice.

L'écoulement d'eau du vase dans le bassin crée des fluctuations importantes jusqu'à 6 cm de part et d'autre, ce qui perturbe la lecture de la charge. Pour éviter cet inconvénient on a réalisé le tube amortisseur des fluctuations dans lequel on monte l'échelle graduée.

3: La balance Fig (10)

La balance est un moyen de détermination de la force du jet. Elle constituée des éléments suivants:

- a/ Un axe d'appui.
- b/ Une plaque qui sera attaquée par le jet.
- c/ Un bras pour mettre les poids qui équilibrent la force du jet.

La balance est conçue de telle manière qu'elle soit affectée seulement par la force horizontale du jet, les autres forces verticales ne jouent pas car le moment de ces forces est nul, de même pour le liquide qui s'écoule sur la paroi après l'avoir frappée.

Le principe de cette balance a beaucoup d'intérêt puisqu'il nous assure une exactitude très intéressante.

4: Pour le dispositif de fixation du modèle voir Fig (11).

III-3: Calcul de la vitesse V_j

On applique la formule: $\frac{L}{t} = V_j$

L se détermine par lecture simple sur l'échelle placée devant le bassin.

Quant au temps t, on le détermine d'après l'équation de la trajectoire suivant l'axe des y :

$$y = Z = \frac{1}{2}gt^2$$

avec y=Z est la hauteur du centre de gravité de l'orifice qui est égale à 10,5 cm.

$$\text{donc le temps } t = \sqrt{\frac{-2Z}{g}}$$

$$\text{ou } t = \sqrt{\frac{2 \cdot 10,5}{9,8}} = 0,146 \text{ sec}$$

Connaissant L et t, on en déduit V_j .

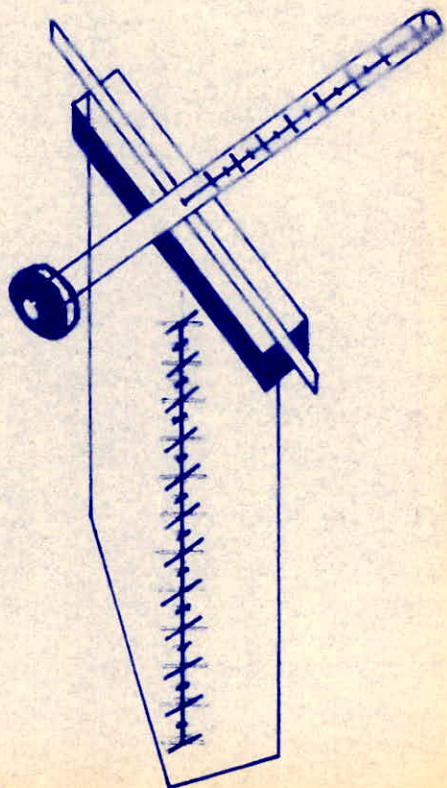
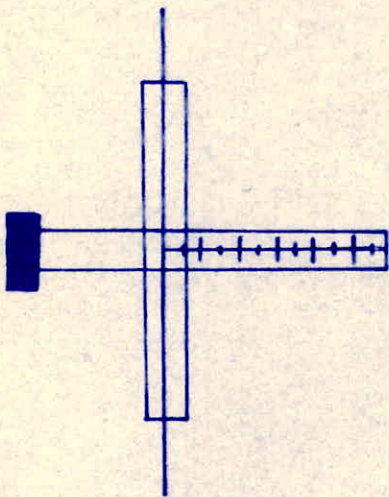
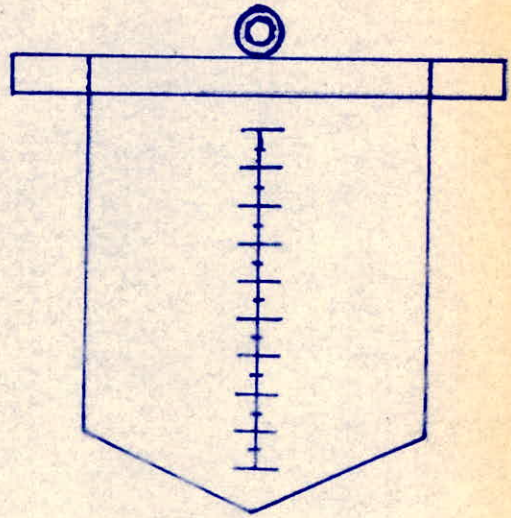
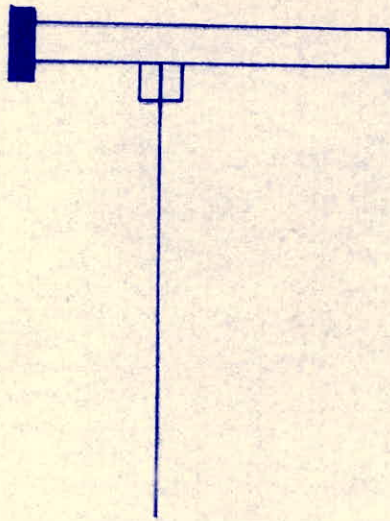


Fig 10

III-4: Calcul du débit

Le débit est le volume écoulé par une seconde.

Dans le vase de Lamariotte le volume écoulé à l'aide de l'échelle graduée placée pour ce but, et le temps correspondant se mesure par chronométrage.

$$\text{Donc le débit } Q = \frac{V}{t} \text{ m}^3/\text{sec}$$

III-5: Calcul du coefficient C_{vj}

On a déjà indiqué que $C_v = \frac{V}{V_t}$

$$\text{Dans notre cas } C_{vj} = \frac{V_j}{V_t}$$

III-6: Calcul du coefficient C_{cj}

L'étude de ce coefficient sera accomplie dans le 4ème chapitre.

III-7: Calcul du coefficient de débit m_j

$$\text{Dans le cas présent } m_j = C_{vj} \cdot C_{cj}$$

III-8: Calcul du nombre de Reynolds R_e

$$\text{Ce nombre est donné par } R_e = \frac{V \cdot D}{\nu}$$

Or on considère que la vitesse V_t est la vitesse de référence

$$\text{alors } R_e = \frac{V_t \cdot D}{\nu} \quad \text{avec } \nu = 10^{-6} \text{ m}^2/\text{sec}$$

III-9: Calcul du nombre de Weber W_e

Ce nombre exprime la relation entre les forces dues à l'inertie et les forces dues à la tension superficielle.

Il est très important pour l'étude des jets et des gouttes, et on le détermine par la relation:

(16)

$$W_c = \frac{\rho V^2 D}{\sigma}$$

avec $\rho = 102 \text{ Kg sec}^2/\text{m}^2$

$$\sigma = (76 - 0,18\theta) 10^{-4} \text{ Kg/m}$$

$$= 4,73 \cdot 10^{-3} \text{ Kg/m} \quad \text{pour } \theta = 20^\circ$$

On remplace dans cette formule V par V_t .

Voir les tableaux correspondants à l'étude de la trajectoire.

Chapitre III

--ooEtude du jet par le théorème de la quantité de mouvement oo--

III-1: La force du jet F . Fig12

Le jet exerce sur la balance placée près de l'orifice une force F.

Cette force est appliquée à une distance égale à Z_2 de l'axe d'appui. On équilibre cette force par un contre-poids placé sur le bras de la balance, à une distance égale à Z_1 de l'axe d'appui.

Pour que la balance soit en équilibre il faut que la somme des moments des forces appliquées soit égale à zero.

$$\text{c-à-d} \quad P \cdot Z_1 = F \cdot Z_2$$

$$\text{d'où} \quad F = \frac{P \cdot Z_1}{Z_2}$$

Z_1 et Z_2 étant déterminés directement par les échelles respectives de la balance.

III-2: Calcul de V_q

D'après le théorème de la quantité de mouvement on peut écrire que la composante suivant une direction quelconque de la résultante des forces extérieures sur une portion de fluide en écoulement permanent et uniforme, est égale à la différence entre les composantes suivant la même direction de la quantité de mouvement sortant et la quantité de mouvement entrant dans le domaine considéré pendant l'unité de temps.

En d'autre termes:

$$F_x = \rho Q (V_{x2} - V_{x1})$$

En utilisant nos symboles et en remarquant que $V_{x1}=0$
 on peut écrire:

$$F = \rho Q V_q$$

$$\text{d'où } V_q = \frac{F}{\rho Q}$$

F se calcule par la balance

et Q est le même débit calculé dans le chapitre précédent.

III-3: Calcul des autres caractéristiques: $C_{vq}, C_{cq}, m_q, R_e', W_e$

On calcule ces caractéristiques de la même manière que dans
 le chapitre précédent.

Voir les tableaux correspondants à l'étude du théorème de
 la quantité de mouvement.

Théorème de la quantité de mouvement - Coefficient de débit.

ϕ H	5 mm	4	3	2,5	2	1,5	1
24 cm	0,771	0,745	0,818	0,752	0,748	0,925	0,822
20	0,702	0,774	0,742	0,743	0,742	0,940	0,902
15	0,747	0,802	0,788	0,798	0,672	0,930	0,960
10	0,771	0,767	0,785	0,945	0,813	0,922	0,970
7	0,752	0,865	0,763	0,882	0,770	0,940	0,965
5	0,874	0,739	0,738	0,945	0,700	0,882	-
3	0,801	0,939	0,835	0,941	0,882	-	-
2	0,801	0,941	0,789	0,970	-	-	-
1	-	-	-	-	-	-	-
0,5	-	-	-	-	-	-	-

CHAPITRE IV

---o Etude du jet dans la section contractée---o---

IV-1: Rappel:

J'avais déjà indiqué qu'à l'intérieur du bassin; et au voisinage de l'orifice, toutes les lignes de courant convergent vers celui-ci. Quant à l'extérieur de la paroi et à l'aval de celle-ci elles deviennent de moins en moins convergentes et à une distance égale environ au diamètre de l'orifice ; elles deviennent sensiblement parallèles.

La section du jet diminue donc depuis la section de l'ouverture jusqu'à la section où les lignes de courant deviennent parallèles . Ce décroissement de la section est appelé contraction.

IV-2: Photographie du jet

Pour le but d'avoir la section de contraction on a procédé à photographier le jet pour les différents diamètres et pour des différentes charges. Ceci en prenant des photos à une distance de 20 cm et en photographiant au même temps une règle placée au-dessus du jet.

Pour la précision des mesures ; la lecture a été faite par un microscope.

Ayant la section du jet et le débit, on a pu calculé la vitesse dans la section contractée pour chaque cas de charge et pour chaque cas d'ouverture.

Sachant que les charges pour lesquelles on a photographié le jet sont différentes de celles avec lesquelles on a fait l'étude; donc pour déterminer la vitesse dans la section contractée on a tracé la serie de courbes $H=f(V_o)$,

A l'aide de ces courbes on a pu trouvé la valeur de la vitesse dans la section contractée pour chaque cas des charges avec lesquelles on fait l'étude, et avec cas d'ouverture.

Voir les graphes $H=f(V_c)$.

Voir les tableaux correspondants à l'étude de la section contractée.

TV-3: Calcul du coefficient C_c

Par définition ce coefficient est le rapport entre la section contractée et la section de l'orifice.

Connaissant la vitesse V_c et le débit Q ; on pourrait écrire :

$$Q = A_c \cdot V_c \quad \text{d'où} \quad A_c = Q/V_c$$

$$\text{Or } C_c = A_c/A \quad \text{donc } \underline{C_c = Q/A \cdot V_c}$$

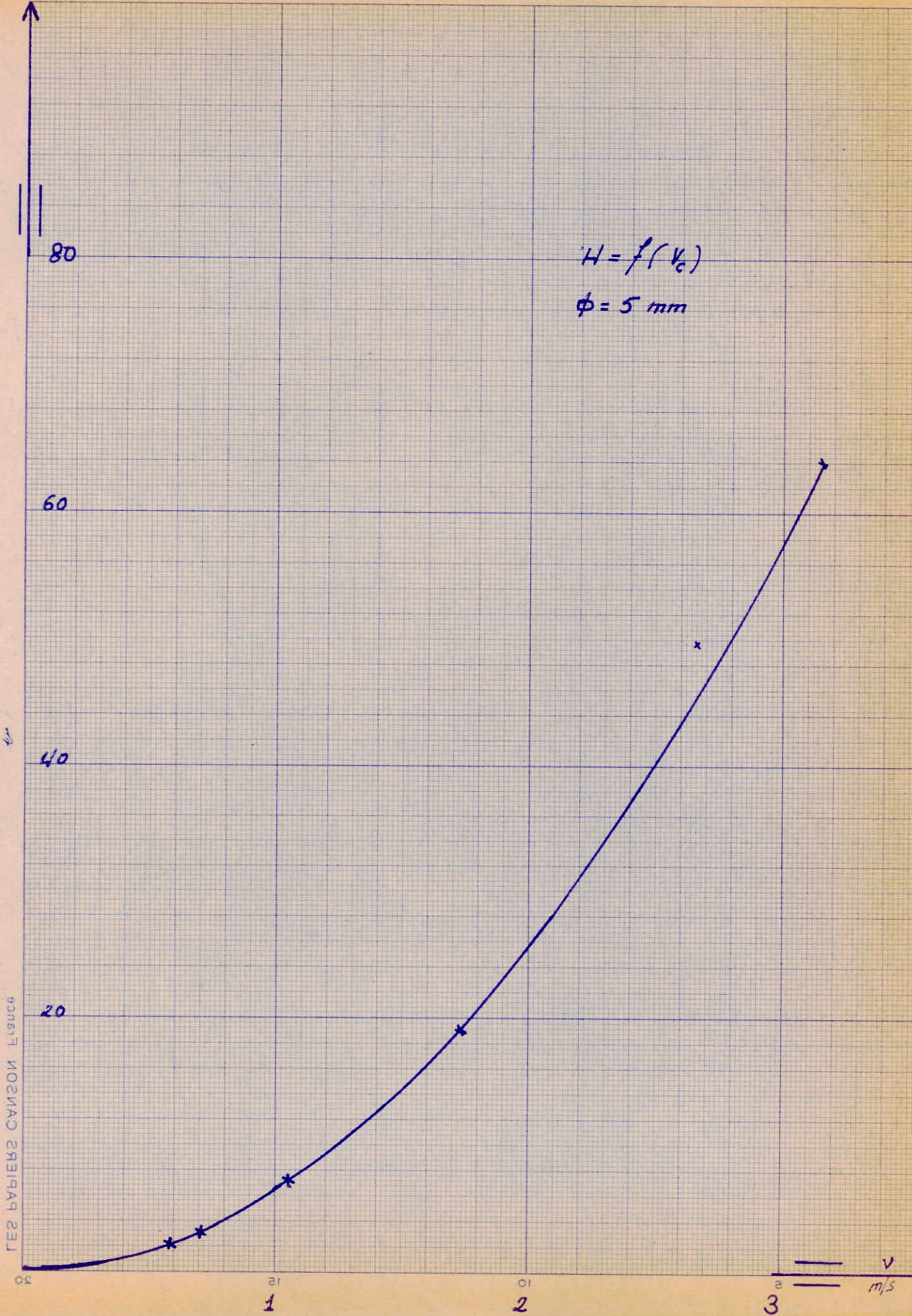
Voir le tableau donnant le coefficient C_c en fonction du diamètre et en fonction de la charge.

TV-4: caractéristiques

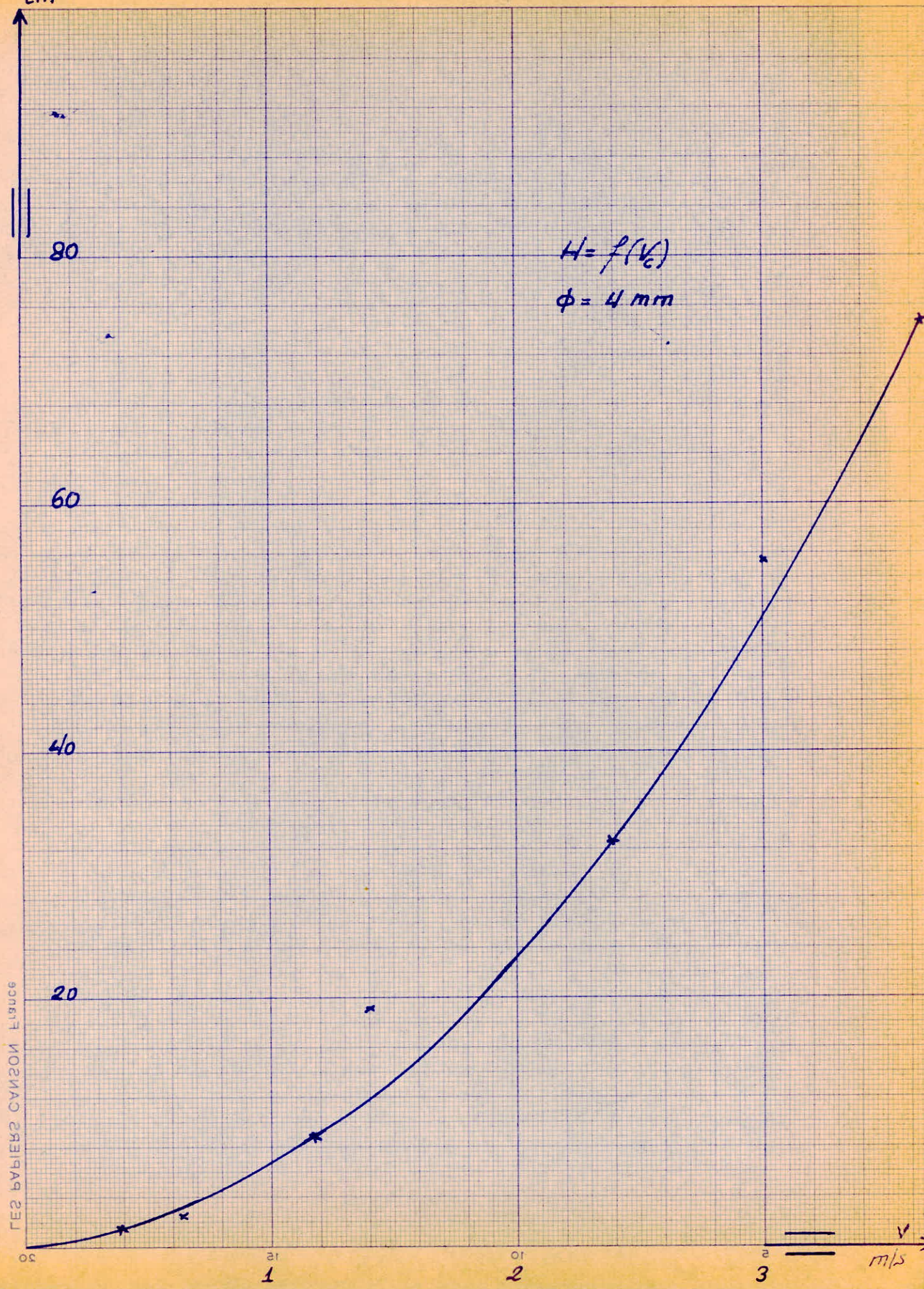
Les autres paramètres se calculent exactement comme dans les cas précédents.

§§§§§§§§§§§§§§§§

H cm



H cm



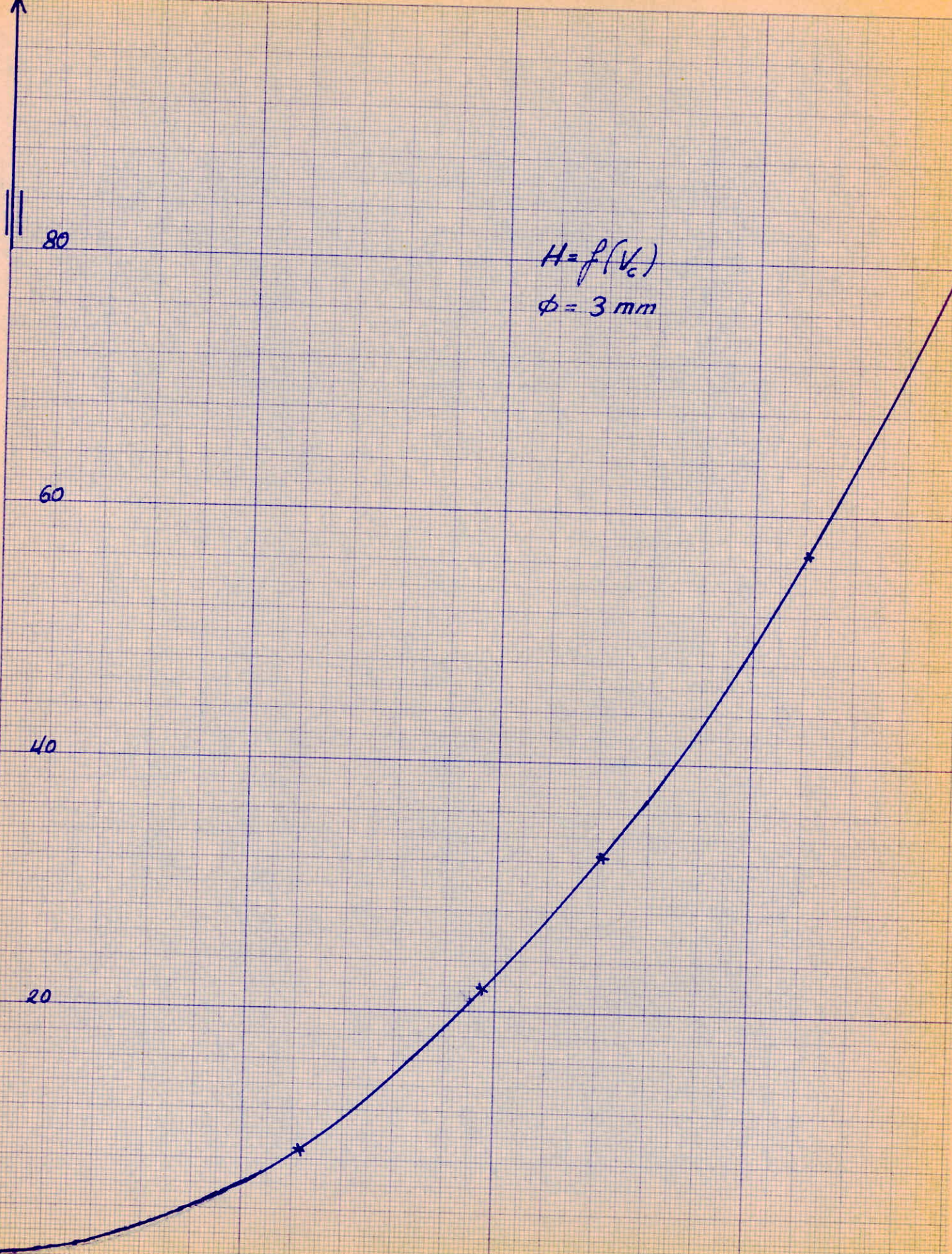
$H = f(v_c)$
 $\phi = 4 \text{ mm}$

ГЭС БАЙЕРС СВИЗОН ЛИБУСЕ

v m/s



H
cm



$H = f(v_c)$
 $\phi = 3 \text{ mm}$

ГЭС БАЙБЕРС СУНЗОИ Figure 6

0.2

1

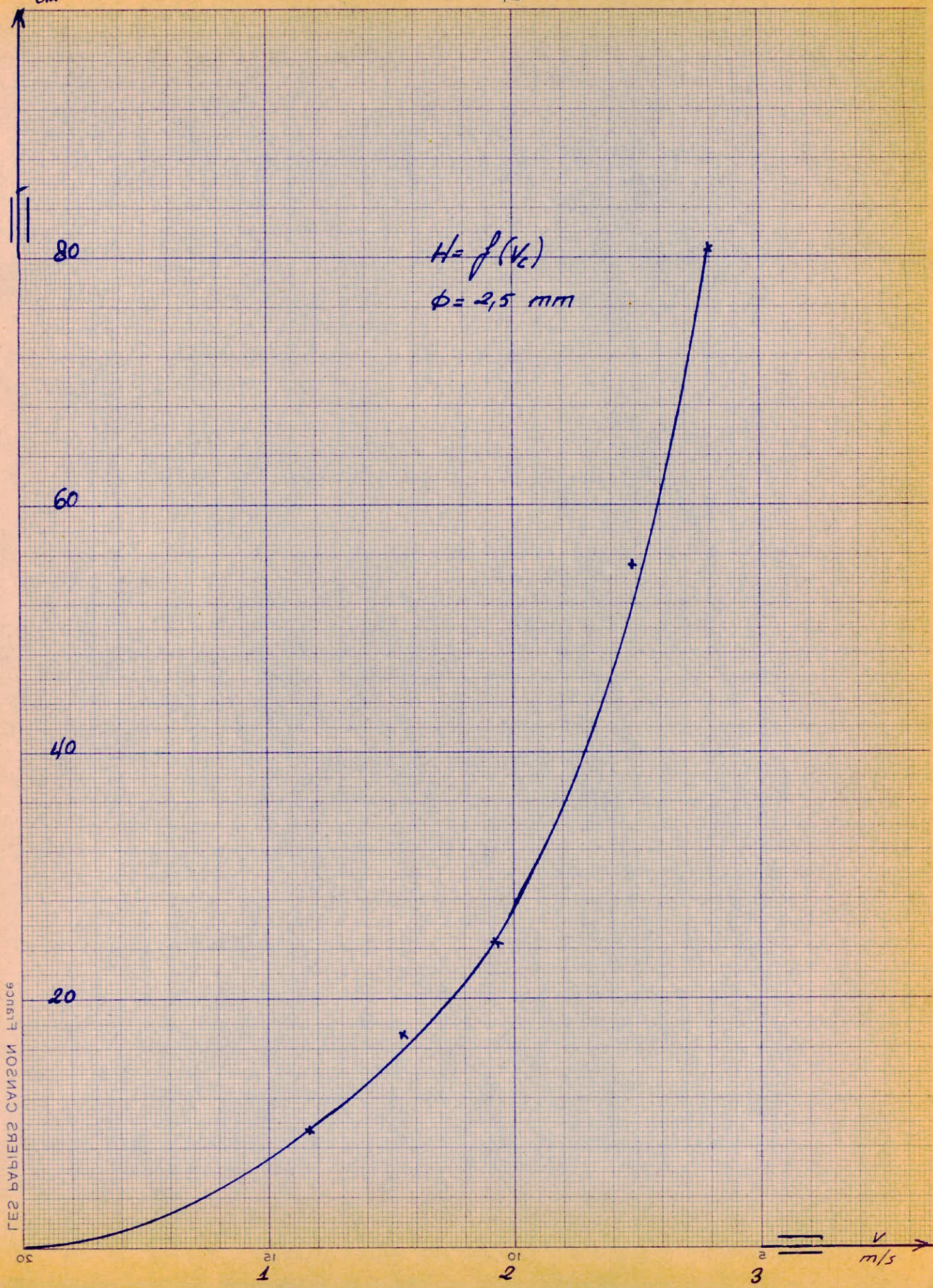
2

2

v
m/s

H

cm

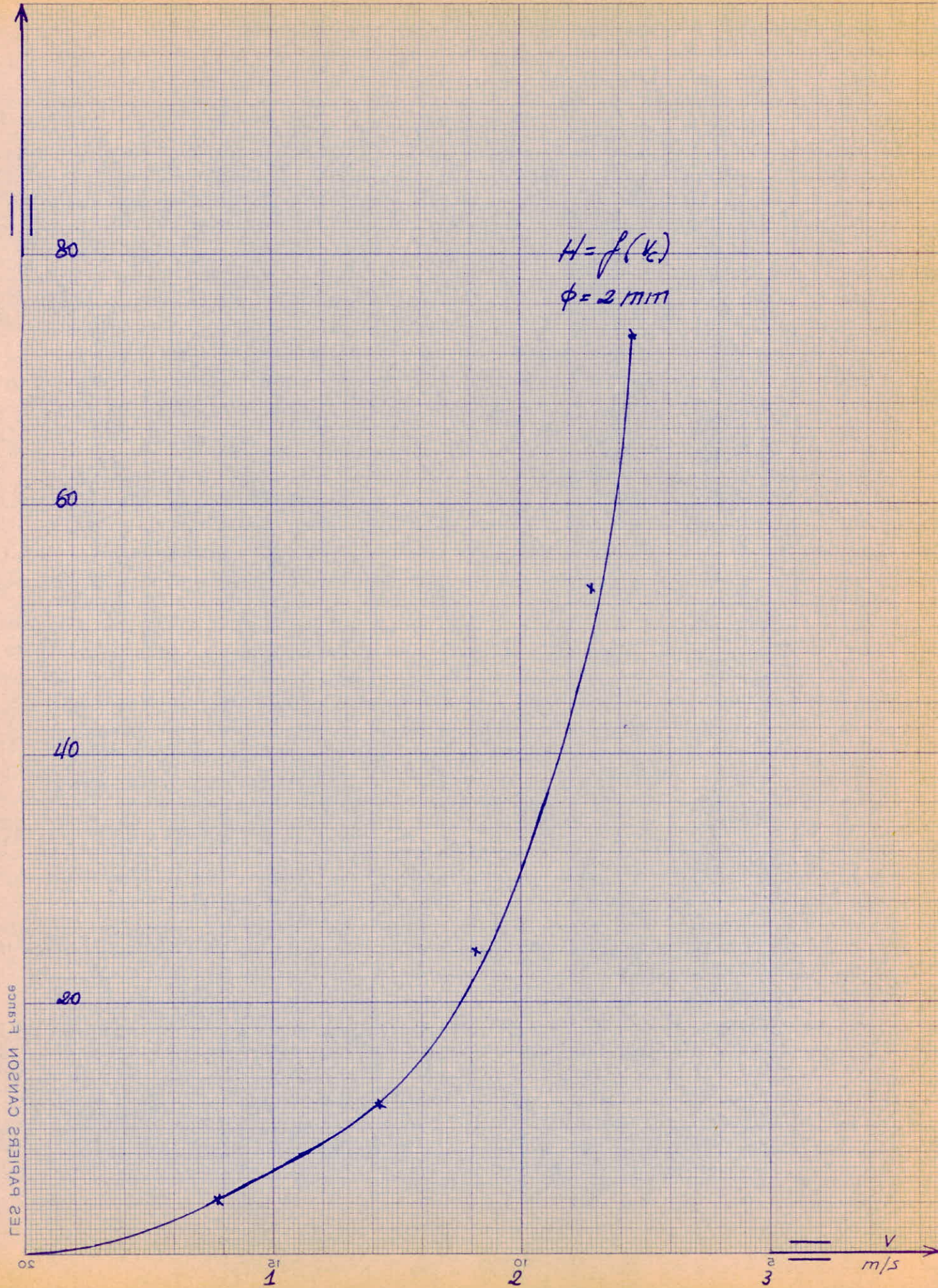


ГЭС БАБИЕРС СИНГОН ЛИБУС

v m/s

H
cm

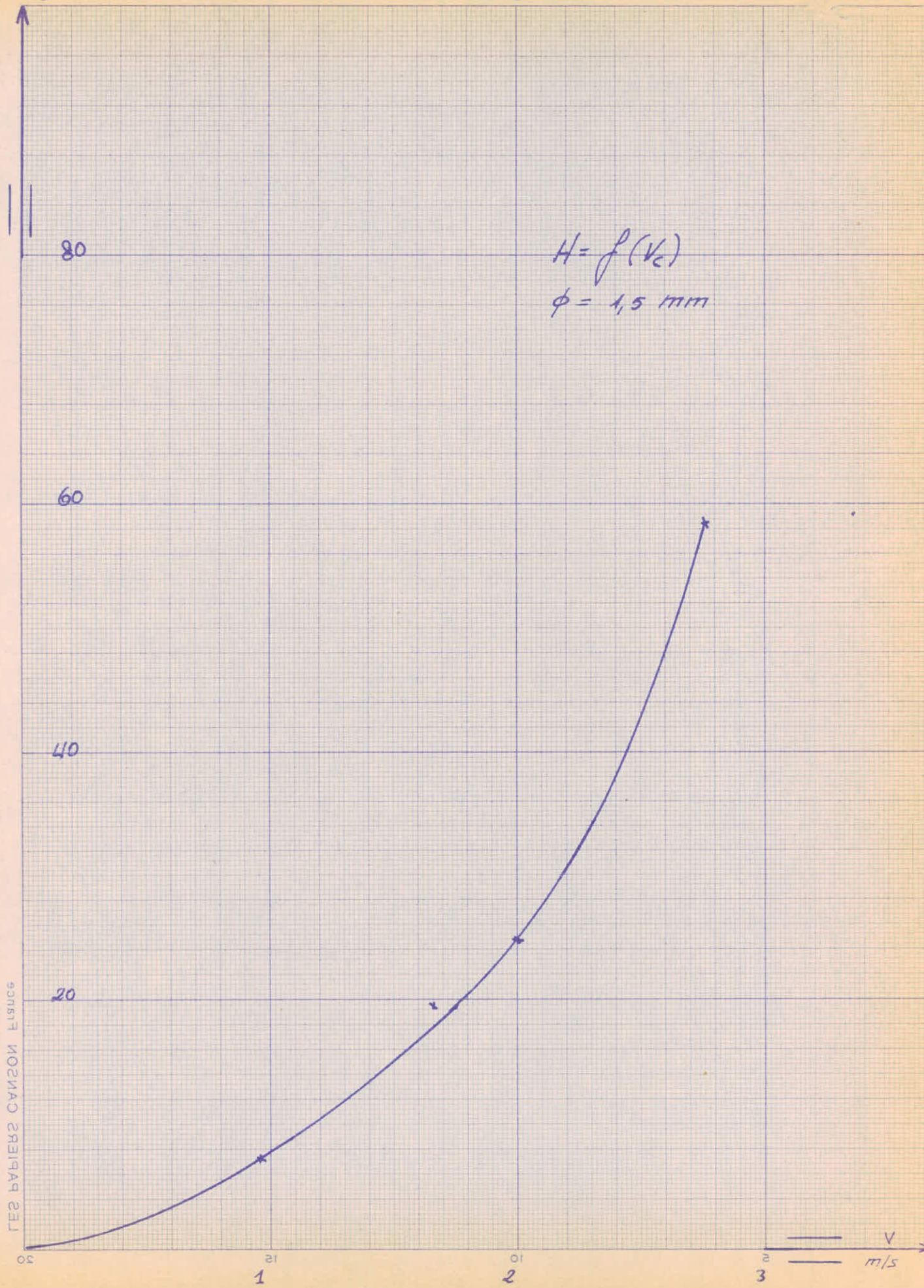
40



ГЭС ВАЙЛЕБС САНЗОН Е. ЛУИССЕ

H
cm

41



$$H = f(V_c)$$

$$\phi = 1,5 \text{ mm}$$

LES PAPIERS CAINSON FIGURE

V
m/s

80

60

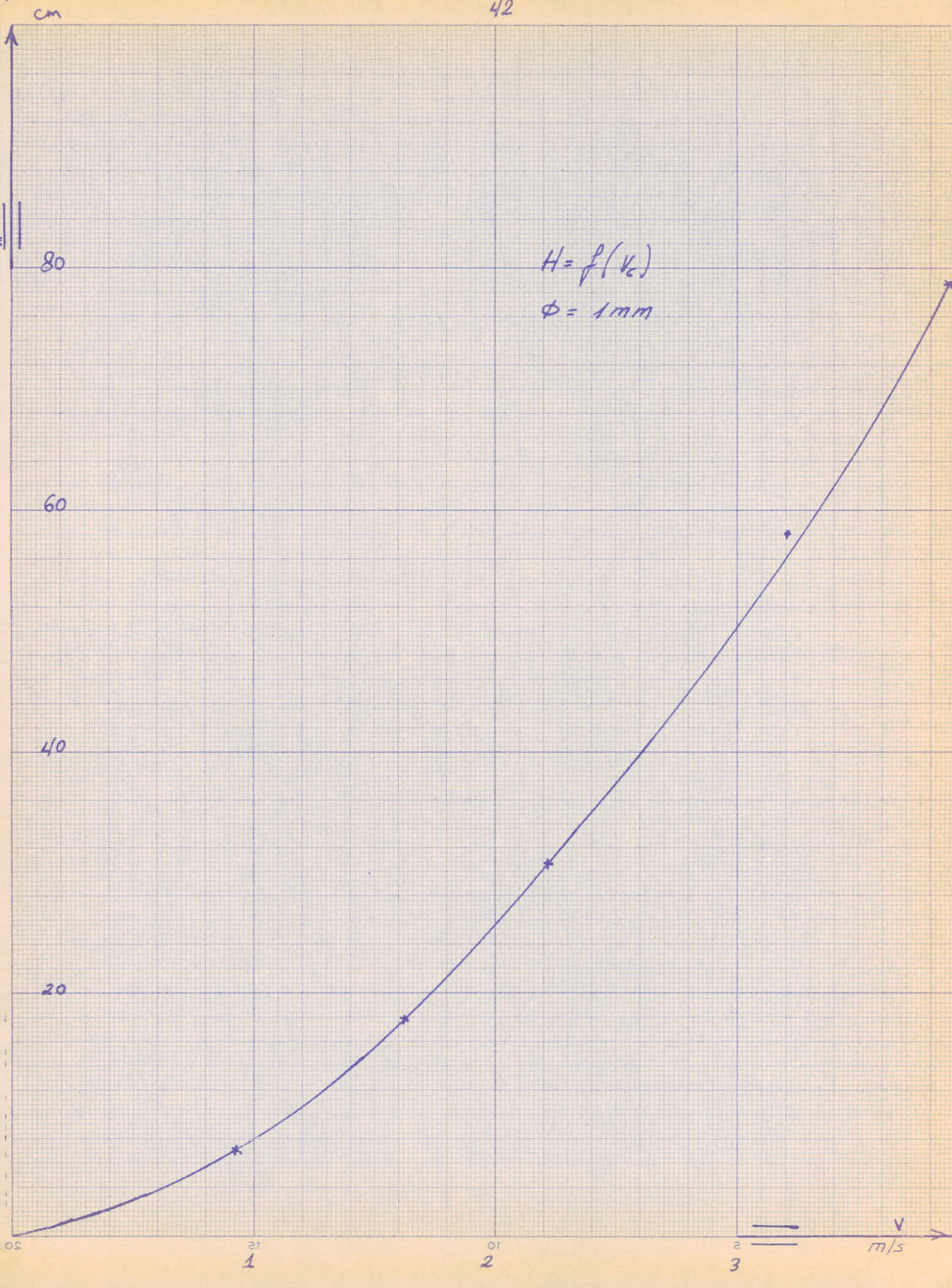
40

20

1

2

3



Les coefficients c_c

ϕ H	$\phi = 5 \text{ mm}$	$\phi = 4$	$\phi = 3$	$\phi = 2,5$	$\phi = 2$	$\phi = 1,5$	$\phi = 1$
0,24m	0,71	0,76	0,818	0,80	0,78	0,944	0,83
0,20	0,763	0,79	0,765	0,75	0,764	0,95	0,92
0,15	0,763	0,81	0,813	0,84	0,70	0,95	0,99
0,10	0,795	0,775	0,785	0,955	0,83	0,96	0,99
0,07	0,817	0,94	0,778	0,91	0,77	0,95	0,975
0,05	0,93	0,762	0,803	0,965	0,745	0,98	-
0,03	0,88	0,988	0,852	0,98	0,90	-	-
0,02	0,90	0,99	0,858	0,99	-	-	-
0,01	-	-	-	-	-	-	-

La vitesse dans la section contractée

orifice de diamètre $\phi = 5 \text{ mm}$

H	Q	V_e	V_c	C_{vc}	m_c	Re
0,24 m	$27 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	2,16 m/s	1,94 m/s	0,905	0,643	$10,8 \cdot 10^3$
0,20	26,5	1,98	1,77	0,895	0,683	9,9
0,15	23	1,72	1,53	0,89	0,679	8,6
0,10	19,4	1,40	1,245	0,89	0,7075	7
0,07	16,72	1,17	1,045	0,899	0,735	5,85
0,05	16,07	0,99	0,88	0,889	0,827	4,95
0,03	11,96	0,77	0,69	0,897	0,789	3,85
0,02	14,40	0,63	0,59	0,937	0,844	3,15
0,01	le	jet	se colle	à la	paroi	

La vitesse dans la section contractée

orifice de diamètre $\phi = 4 \text{ mm}$

H	Q	V_E	V_C	C_{vc}	m_c	Re
0,24 m	$1944 \cdot 10^{-6}$ m^3/s	2,16 m/s	2,04 m/s	0,946	0,719	$8,64 \cdot 10^3$
0,20	18,5	1,98	1,86	0,95	0,75	7,92
0,15	15,2	1,72	1,63	0,95	0,77	6,88
0,10	12,4	1,40	1,28	0,915	0,709	5,6
0,07	11,8	1,17	1,03	0,88	0,827	4,68
0,05	17,85	0,99	0,82	0,83	0,709	3,96
0,03	17,32	0,77	0,59	0,777	0,767	3,08
0,02	5,82	0,63	0,46	0,713	0,706	2,52
0,01	le	jet se	colle	à la	paroi	

La vitesse dans la section contractée

orifice de diamètre $\phi = 3 \text{ mm}$

H	Q	V_e	V_c	C_{vc}	m_c	Re
0,24 m	$12,63 \cdot 10^{-6}$ m ³ /s	2,16 m/s	2,06 m/s	0,953	0,78	$6,48 \cdot 10^3$
0,20	10,28	1,98	1,87	0,955	0,734	5,94
0,15	9,52	1,72	1,61	0,937	0,7675	5,16
0,10	7,76	1,40	1,33	0,95	0,736	4,20
0,07	6,33	1,17	1,08	0,924	0,868	3,51
0,05	5,18	0,99	0,87	0,88	0,671	2,97
0,03	4,58	0,77	0,64	0,832	0,822	2,31
0,02	3,32	0,63	0,45	0,713	0,706	1,89
0,01	Le	jet	se colle	à la	paroi	

La vitesse dans la section contractée

ouïfice de diamètre $\phi = 2,5 \text{ mm}$

H	Q	V_t	V_c	C_{vc}	m_c	Re
0,24 m	$17,49 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	2,16 m/s	1,91	0,886	0,709	$5,4 \cdot 10^3$
0,20	6,46	1,98	1,76	0,9	0,675	4,95
0,15	6,18	1,72	1,5	0,872	0,732	4,3
0,10	5,63	1,40	1,2	0,858	0,82	3,5
0,07	4,47	1,17	1	0,855	0,779	2,93
0,05	3,88	0,99	0,82	0,83	0,801	2,48
0,03	3	0,77	0,60	0,78	0,764	1,43
0,02	2,27	0,63	0,44	0,7	0,693	1,58
0,01	le	jet	se colle	à la	paroi	

La vitesse dans la section contractée

orifice de diamètre ϕ 2 mm

H	Q	V_e	V_c	C_{vc}	m_c	Re
0,24 m	$4,62 \cdot 10^6$ m ^{3/s}	2,16 m/s	1,88	0,87	0,678	$4,32 \cdot 10^3$
0,20	4,28	1,98	1,78	0,899	0,687	3,96
0,15	3,52	1,72	1,60	0,93	0,651	3,44
0,10	3,38	1,40	1,30	0,93	0,772	2,8
0,07	2,56	1,17	1,06	0,905	0,697	2,34
0,05	2,01	0,99	0,86	0,87	0,6485	1,98
0,03	1,8	0,77	0,64	0,83	0,745	1,54
0,02	le	jet	se colle	a- la	paroi	
0,01	"	"	"	"	"	

La vitesse dans la section contractée

orifice de diamètre $\phi = 1,5 \text{ mm}$.

H	Q	V_t	V_c	C_{vc}	m_c	Re
0,24 m	$3,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	2,16 m/s	1,98 m/s	0,917	0,866	$3,24 \cdot 10^3$
0,20	3,02	1,98	1,8	0,91	0,865	2,97
0,15	2,52	1,72	1,5	0,873	0,83	2,58
0,10	2,28	1,40	1,18	0,845	0,812	2,10
0,07	1,96	1,17	0,95	0,81	0,77	1,76
0,05	1,46	0,99	0,78	0,79	0,774	1,485
0,03	le	jet se	colle à	la	paroi	
0,02	"	"	"	"	"	
0,01	"	"	"	"	"	

La vitesse dans la section contractée

orifice de diamètre $\phi = 1 \text{ mm}$

H	Q	v_z	v_c	C_{vc}	m_c	Re
0,24m	$1,28 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$	2,16 m/s	1,96	0,908	0,753	$2,16 \cdot 10^3$
0,20	1,27	1,98	1,76	0,9	0,828	1,98
0,15	1,20	1,72	1,48	0,86	0,852	1,72
0,10	1,13	1,40	1,16	0,83	0,822	1,40
0,07	0,764	1,17	0,93	0,794	0,774	1,17
0,05	le	jet se	colle	à la	paroi	
0,03	"	"	"	"	"	
0,02	"	"	"	"	"	
0,01	"	"	"	"	"	

CHAPITRE V

---o Etude de la résistance de l'air o---

V-1: Introduction:

Revenons au chapitre III où l'on a déjà calculé la vitesse du jet par l'analyse de la trajectoire. La vitesse V_j trouvée est différente de la vitesse théorique du jet V_t ; et cette différence est due à la résistance de l'air. En effet le jet sortant de l'orifice à l'air libre subit l'action du frottement avec cet air.

Ici, on va étudier l'influence de la résistance de l'air sur le jet en mesurant l'augmentation de sa portée horizontale lorsqu'on fait l'essai dans le vide. Fig 13.

Sachant qu'il n'est pas dans la mesure de notre possible d'avoir un dispositif à pompe à vide indispensable pour réaliser cet essai n'existe pas dans le laboratoire; alors on a pensé à utiliser un autre système qui pourra nous assurer le même rôle que la pompe à vide.

V-2: Dispositif expérimental

a/ Un ventilateur centrifuge dont l'installation comprend un ventilateur entraîné par un moteur à courant continu, à excitation indépendante, ce moteur est monté par un groupe Ward-Léonard.

Les auxiliaires sont une tuyère d'entrée en Venturi et une tuyère de sortie en caisson réduit avec orifice en mince paroi interchangeable. Fig 14

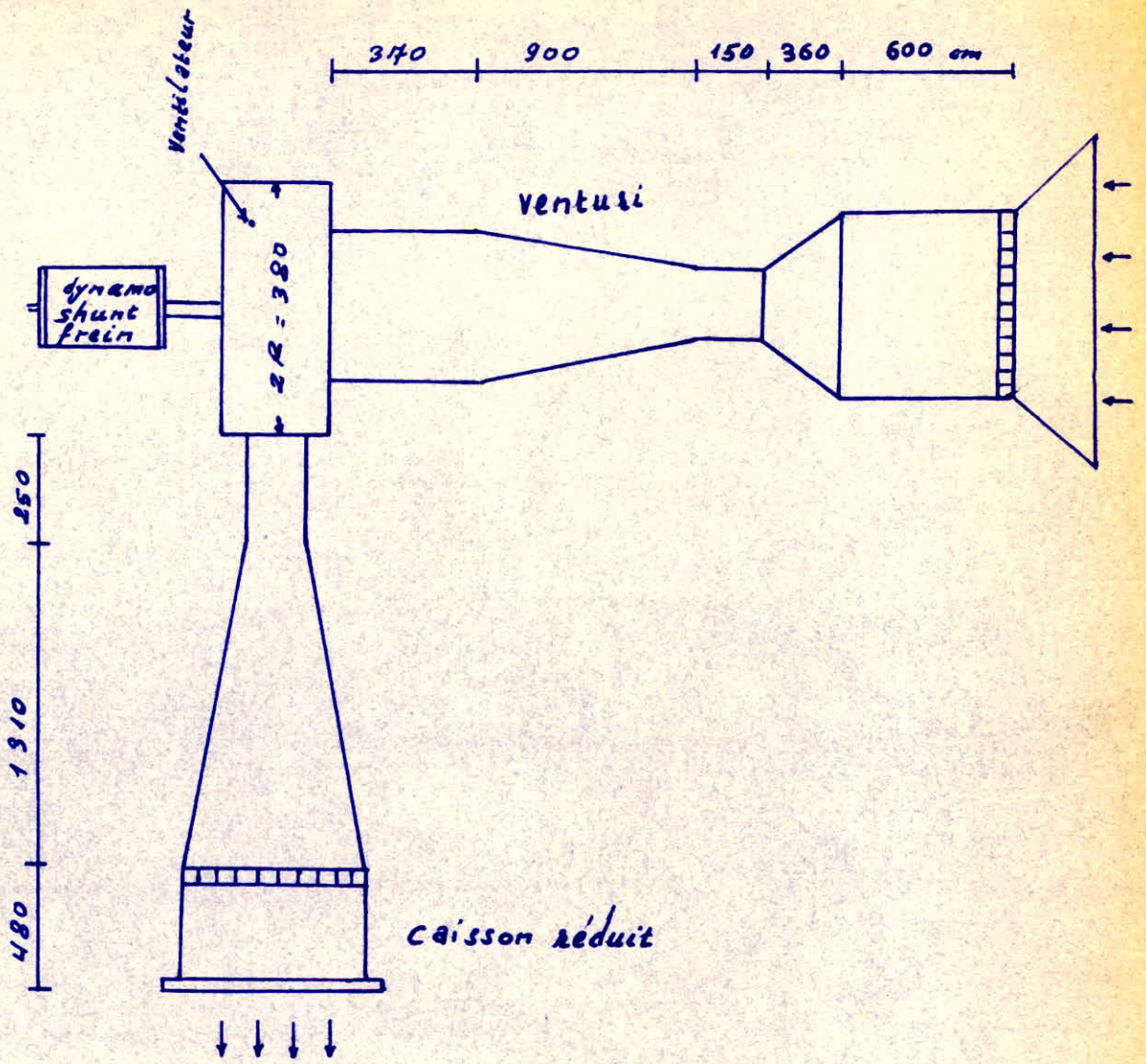


Fig 14

- b/ Une plaque horizontale placée à 10,5 cm du point d'éjection du jet.
- c/ Le système du vase de Lamariotte et du bassin; en changeant la charge dans le bassin, l'on pourra avoir la portée nécessaire.
- d/ Un tube en L relié au bassin pour cracher le jet, Fig 15, 16. Ce tube a un diamètre intérieur de 10mm et muni de deux tubes de diamètre intérieur 4mm et 2,5mm.

Sachant que l'existence du tube devant le ventilateur provoque un phénomène de sillage des remous qui transforme l'énergie cinétique en énergie potentielle de pression provoquant des pertes de l'énergie mécanique.

Donc pour la suppression de ce phénomène on a pensé à confectionner un carénage autour du tube; dont la largeur est 6 fois le diamètre extérieur du gros tube. Dans cette conditions on est sûr qu'on a dépassé la zone du sillage. Fig 17.

- e/ Appareil de mesure de la pression:

Pour le but d'explorer le champ de vitesse du jet d'air sortant du ventilateur, on a besoin d'un appareil très sensible aux faibles pressions, puisque les vitesses avec lesquelles l'on travaille sont bien faibles.

L'appareil qu'on a conçu est un micromanomètre incliné et à deux liquides. Il permet de déterminer des petites différences de pression avec beaucoup de précision; il est très astucieux car il permet d'avoir une grande dénivellation pour des très faibles pressions.

e1/ Description de l'appareil:

IL est constitué d'un tube en verre en U ; incliné de $1/10$ et de deux petits bassins en plexiglas. L'ensemble du tube et des bassins est monté sur une base en plexiglas maintenue parfaitement horizontale à l'aide d'une nivelle .

Les deux bassins sont munis de deux trous chacun; un trou d'alimentation et l'autre constitue une prise de pression. Le tube en U est muni aussi d'un petit tube d'alimentation. Fig 18.

Le choix des liquides doit satisfaire à la condition qu'ils ne soient pas miscibles et que la différence entre leur densités soit la plus faible possible.

Le tube en U est fabriqué en verre pour assurer la mobilité des liquides dedans, le reste de l'appareil est en plexiglas.

Après plusieurs essais on a réussi à fabriquer l'appareil et les liquides dedans sont l'eau distillée dont la densité est égale à 1, et le mazoute dont la densité est égale à 0,83.

La partie inférieure du tube est remplie par l'eau distillée et l'eau mazoute se trouve superposé là-dessus dans les deux branches du tube en U, remplissant aussi partiellement les bassins.

e2/ Principe de calcul de la pression par le micromanomètre incliné et à deux liquides.

Cet appareil est une combinaison de deux micromanomètres:

a: micromanomètre à deux liquides: Fig 19

Dans cet appareil le liquide plus dense remplit la partie inférieure du tube en U jusqu'à la ligne 0-0, et le liquide

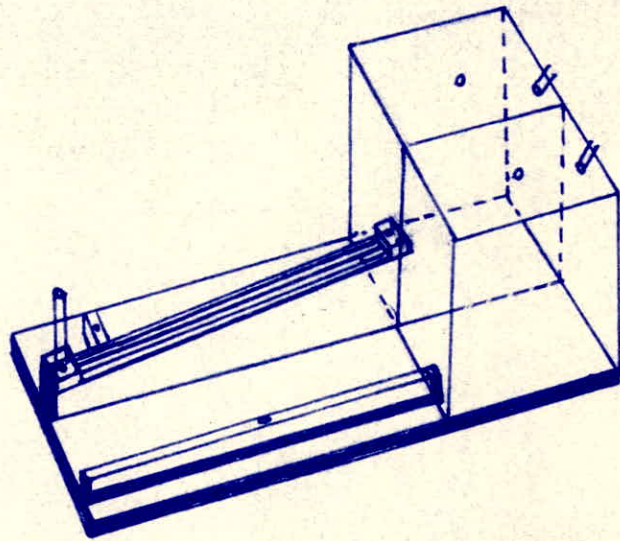
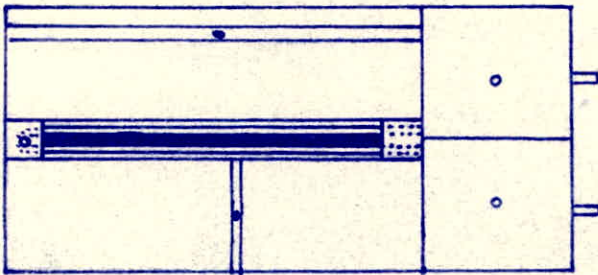
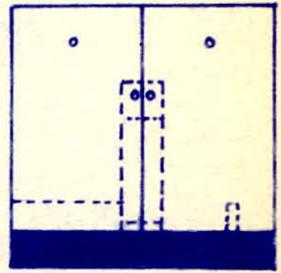
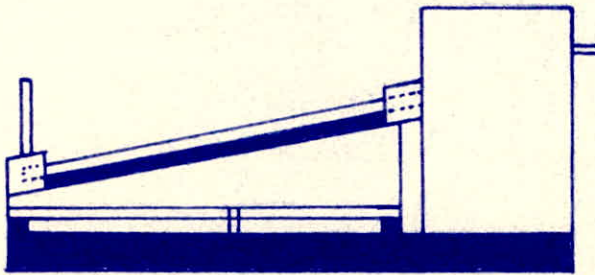


Fig 18

moins dense qui est superposé au 1^{er} dans les deux branches du tube en U remplit aussi partiellement la partie supérieure élargie de chacun des deux branches, jusqu'au niveau de la ligne 1-1. Le gaz dont on mesure la pression différentielle occupe l'espace située au-dessus de la ligne 1-1. Lorsque la pression en C est légèrement supérieure à la pression en D, les ménisques se déplacent comme il est représenté sur la Fig 19, le volume du liquide déplacé dans chacun des bassins est égal au volume du liquide déplacé dans le tube en U ;

Ainsi on a $A \Delta y = aR/2$

avec A : la section de chacun des bassins
 a : " " " " " branches

En partant de C on a l'équation manométrique suivante:

$$h_c = (k_1 + ay) \sqrt[3]{1} + (k_2 - ay + R/2) \sqrt[3]{2} - R \sqrt[3]{3} - (k_2 - R/2 + ay) \sqrt[3]{2} - (k_1 - ay) \sqrt[3]{1} \rho = h_D$$

avec $\sqrt[3]{j}$ la densité relative des fluides dans les divers organes de l'appareil.

L'équation précédente devient:

$$\Delta h = R \left[\sqrt[3]{3} - \sqrt[3]{2} (1 - a/A) - \sqrt[3]{1} \cdot a/A \right]$$

L'expression entre les crochets est une constante qui dépend des caractéristiques de l'appareil et des liquides utilisés.

b: micromanomètre incliné: Fig 20

C'est un des appareils les plus répandus dans les laboratoires de recherches scientifiques, et à raison de sa simplicité doublée de qualités métrologiques très convenables; il est beaucoup employé dans les essais de nature industrielle.

Au début on remplit la cuve avec un liquide; le niveau commun figuré en pointillé permet de mettre l'échelle avec l'origine au droit de la partie supérieure du ménisque dans le tube, si l'on fait presser une pression p_1 dans la cuve et une autre pression p_2 dans le tube, l'on aura une baisse du niveau dans la cuve et une hausse du niveau dans le tube si $p_1 > p_2$.

En même temps, l'on pourra lire sur l'échelle graduée la longueur L_{lue} , la formule de la pression statique mène à la relation:

$$p_1 - p_2 = \rho h = \rho L_v \sin \alpha$$

La relation entre la longueur lue et la longueur vraie sera donnée par l'équivalence des volumes:

$$\pi D^2/4 (L_v - L_{lue}) \sin \alpha \quad \text{et} \quad \pi d^2/4 \cdot L_{lue}$$

il en résulte

$$p_1 - p_2 = \rho \left(1 + \frac{d^2}{D^2} \sin \alpha \right) L_{lue} \sin \alpha$$

e3/Calcul de la pression à l'aide du micromanomètre incliné et à deux liquides.

On a combiné le principe du micromanomètre à deux liquides avec celui du micromanomètre incliné pour avoir une méthode de calcul propre au micromanomètre incliné et à deux liquides.

En effet, si la différence de pression dans les deux branches du tube en U est $(p_1 - p_2)$;

on a :

$$\Delta h = h_1 - h_2 = R \sin \alpha \left[\rho_3 - \rho_2 \left(1 - \frac{a}{A} \right) - \rho_1 \cdot \frac{a}{A} \right]$$

le dernier terme étant négligeable, la formule devient:

$$\Delta h = R \cdot \sin \alpha \left[\sqrt[3]{\frac{1}{3}} - \sqrt[2]{1 - a/A} \right]$$

Etant donné que $\sin \alpha = 1/10$

$$\sqrt[3]{\frac{1}{3}} = 1$$

$$\sqrt[2]{\frac{1}{3}} = 0,83$$

$$d = 8,3 \text{ mm et } a = 0,54 \text{ cm}^2$$

$$A = 75 \times 62 \text{ mm}^2 = 46,5 \text{ cm}^2$$

$$a/A = 0,01$$

avec ces données, on peut écrire:

$$\Delta h = 18 \cdot R \cdot 10^{-3}$$

R: étant la lecture directe donnée par le micromanomètre.

D'après l'équation d'énergie des écoulements compressibles

l'on peut écrire :

$$\rho V^2 / 2 = p_2 - p_1$$

cette équation découlant du théorème de Bernouilli, valable pour un fluide incompressible reste valable pour un fluide compressible s'écoulant dans les mêmes conditions, tant que la vitesse d'écoulement reste inférieure à 100m/s.

Donc dans notre cas, on en déduit:

$$\rho_{\text{air}} \cdot V^2 / 2 = \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot \Delta h$$

d'où $V^2 = 2 \rho_{\text{eau}} \cdot g \cdot \Delta h / \rho_{\text{air}}$

et

$$V = \sqrt{2g \cdot \rho_{\text{eau}} \cdot \Delta h / \rho_{\text{air}}}$$

donc connaissant R, l'on pourra calculer Δh et V.

V-3: Expérimentation ..

A l'aide du micromanomètre incliné et à deux liquides l'on a pu explorer le champ de vitesse de l'air sortant de la soufflerie et a trouvé qu'à partir de l'ouverture et jusqu'à une distance égale à 50cm ; la vitesse de l'air en tout les points de l'axe passant par le centre de l'ouverture, et du cylindre l'entourant et ayant comme rayon le demi-rayon de l'ouverture, on a trouvé que la vitesse est la même et le champ est uniforme.

Tout d'abord, on a mesuré la portée du jet L' , connaissant la vitesse correspondante V_j' ; on a pu régler la soufflerie à l'aide du micromanomètre pour nous donner cette vitesse, voir fig 21. Avec cette vitesse, l'air envoyé dans le dos du jet d'eau ne résiste plus à son mouvement, ce qui donne une portée plus grande L et la vitesse correspondante est V_j , voir fig 12.

Ayant la portée du jet avec l'effet du frottement de l'air et la portée sans cet effet, on en déduit l'augmentation de la portée $\Delta L = L - L'$.

V-4: Résultats

Dans les deux tableaux qui suivent l'on trouve la série des mesures concernant l'ouverture $\phi=4\text{mm}$ et celle de $\phi=2,5\text{mm}$.

Ensuite l'on a tracé la courbe $\Delta L/L' = f(L)$ pour chaque cas sur une feuille de division logarithmique. Voir les tableaux et les graphes.

Etude de la résistance de l'air - $\phi = 4 \text{ mm}$.

L'_1	11,92 cm	12	12,20	11,90	11,70
V'_{j1}	0,817 m/s	0,822	0,835	0,845	0,8
L_1	12 cm	12,10	12,30	12,00	11,80
V_{j1}	0,822 m/s	0,83	0,843	0,82	0,81
V_{j1}^2	0,675 m ² /s ²	0,69	0,71	0,67	0,655
$\Delta L/L'_1$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$7,2 \cdot 10^{-3}$	$7,3 \cdot 10^{-3}$	$7,4 \cdot 10^{-3}$	$7,1 \cdot 10^{-3}$
L'_2	14,86 cm	15,05	15,05	14,65	14,45
V'_{j2}	1,027 m/s	1,03	1,03	1,00	0,99
L_2	15,00 cm	15,20	15,20	14,80	14,60
V_{j2}	1,03 m/s	1,05	1,05	1,01	1,00
V_{j2}^2	1,06 m ² /s ²	1,10	1,10	1,02	1,00
$\Delta L/L'_2$	$1,075 \cdot 10^{-2}$	$1,075 \cdot 10^{-2}$	$1,125 \cdot 10^{-2}$	$1,15 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
L'_3	17,75 cm	18,10	18,10	17,30	17,30
V'_{j3}	1,215 m/s	1,24	1,24	1,185	1,185
L_3	18,00 cm	18,40	18,40	17,6	17,6
V_{j3}	1,23 m/s	1,26	1,26	1,205	1,205
V_{j3}^2	1,51 m ² /s ²	1,586	1,586	1,44	1,44
$\Delta L/L'_3$	$1,63 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,675 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,65 \cdot 10^{-2}$
L'_4	19,80 cm	19,95	19,9	19,45	19,40
V'_{j4}	1,30 m/s	1,368	1,36	1,33	1,33
L_4	20,10 cm	20,20	20,15	19,80	19,80
V_{j4}	1,376 m/s	1,385	1,38	1,36	1,36
V_{j4}^2	1,89 m ² /s ²	1,92	1,90	1,85	1,85
$\Delta L/L'_4$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2,175 \cdot 10^{-2}$	$2,1 \cdot 10^{-2}$	$1,9 \cdot 10^{-2}$	$2,075 \cdot 10^{-2}$

Etude de la résistance de l'air - $\phi = 2,5 \text{ mm}$.

L'_1	14,15 cm	14,10	14,50	14,30	14,10
V'_{d1}	0,765 m/s	0,76	0,79	0,775	0,76
L_1	14,2 cm	14,2	14,6	14,4	14,2
V_{d1}	0,767 m/s	0,767	0,795	0,78	0,767
V_{d1}^2	0,59 m ² /s ²	0,59	0,63	0,61	0,59
$\Delta L/L_1$	$6 \cdot 10^{-3}$	$6,25 \cdot 10^{-3}$	$6,4 \cdot 10^{-3}$	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$6,65 \cdot 10^{-3}$
L'_2	13,85 cm	14,30	13,45	13,65	14,25
V'_{d2}	0,95 m/s	0,985	0,98	0,985	0,975
L_2	14 cm	14,4	13,6	13,8	14,4
V_{d2}	0,96 m/s	0,985	0,98	0,945	0,985
V_{d2}^2	0,97 m ² /s ²	0,98	0,865	0,893	0,98
$\Delta L/L'_2$	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$9,5 \cdot 10^{-3}$	$4,12 \cdot 10^{-2}$
L'_3	16,75 cm	17,15	17,10	17,20	16,40
V'_{d3}	1,15 m/s	1,175	1,19	1,18	1,12
L_3	17 cm	17,4	17,4	17,5	16,7
V_{d3}	1,165 m/s	1,19	1,29	1,20	1,14
V_{d3}^2	1,36 m ² /s ²	1,42	1,42	1,44	1,3
$\Delta L/L'_3$	$1,475 \cdot 10^{-2}$	$1,425 \cdot 10^{-2}$	$1,55 \cdot 10^{-2}$	$1,475 \cdot 10^{-2}$	$1,575 \cdot 10^{-2}$
L'_4	18,65 cm	18,45	19,10	19,10	18,65
V'_{d4}	1,28 m/s	1,26	1,31	1,31	1,28
L_4	19 cm	18,8	19,4	19,5	19
V_{d4}	1,30	1,29	1,33	1,335	1,3
V_{d4}^2	1,69 m ² /s ²	1,66	1,77	1,78	1,69
$\Delta L/L'_4$	$1,8 \cdot 10^{-2}$	$1,875 \cdot 10^{-2}$	$1,75 \cdot 10^{-2}$	$1,85 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$

BP 007/73

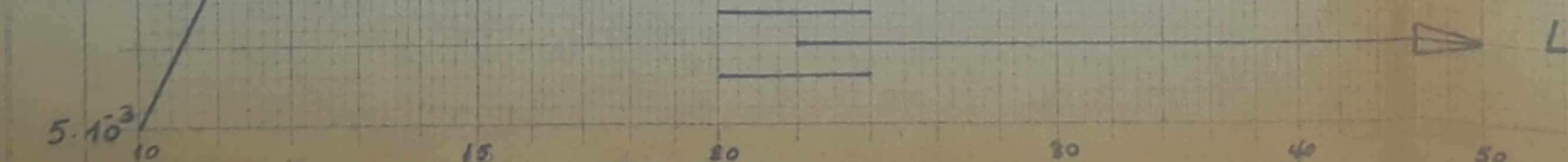
p. 62

 $\Delta L/L'$ $4 \cdot 10^{-2}$ $3,5 \cdot 10^{-2}$ $3 \cdot 10^{-2}$ $2,5 \cdot 10^{-2}$ $2 \cdot 10^{-2}$ $1,5 \cdot 10^{-2}$ $1 \cdot 10^{-2}$ $9 \cdot 10^{-3}$ $8 \cdot 10^{-3}$ $7 \cdot 10^{-3}$ $6 \cdot 10^{-3}$ $5 \cdot 10^{-3}$ 10 15 20 30 40 50 60 70 80 90 100

$$\Delta L/L' = f(L)$$

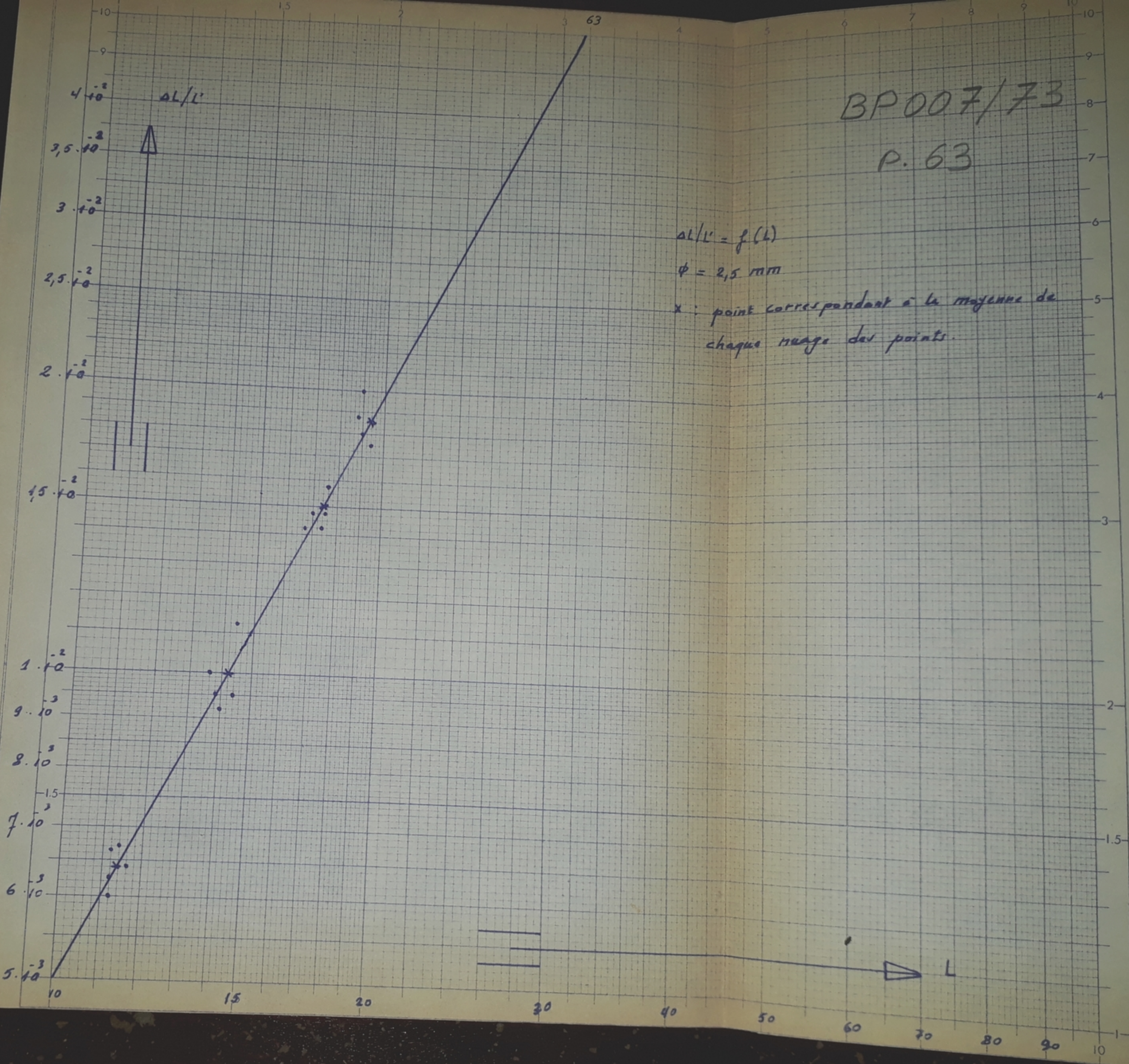
$$\phi = 4 \text{ mm}$$

x: point correspondant à la moyenne de chaque nuage de points



BP007/73

P. 63



V-5: Conclusion

Les courbes que l'on a trouvé sont des droites de pente égale à 2. La droite représentée sur une feuille logarithmique correspond à une parabole .

On en déduit que la résistance de l'air au mouvement du jet d'eau est proportionnelle au carré de la portée , et en d'autre termes elle est proportionnelle au carré de la vitesse.

CHAPITRE VI—o Similitude de Reech-Froude o—VI -1: Analyse dimensionnelle

Les paramètres adimensionnels ont apporté une importante contribution à nos connaissances concernant les mouvements des fluides; du fait qu'ils permettent d'étendre la validité des résultats expérimentaux obtenus avec un fluide sur des mouvements analogues d'autres fluides, ayant des propriétés physiques différentes.

L'analyse dimensionnelle constitue le meilleur moyen pour déterminer les dits paramètres.

Une catégorie très importante des paramètres adimensionnels est constituée par ceux qui expriment la relation entre l'effet sur le phénomène d'écoulement des deux propriétés physiques; généralement entre les forces dues à l'inertie d'une part, et à une autre propriété physique comme la viscosité, la masse volumique l'élasticité ou la tension superficielle d'autre part.

VI -2: Etudes des modèles

L'idée vient naturellement d'essayer de voir en petit comment cela se passe en grand. C'est ce qui constitue le principe des essais sur modèles réduits; qui ont pris un développement considérable non seulement en hydraulique mais dans d'autres branches de la mécanique des fluides, notamment en aérodynamique.

La faveur dont bénéficient ces essais s'explique par les facilités qu'offrent toutes les mesures effectuées au laboratoire, la plus grande précision qu'autorisent les appareils

de même pour les accélérations:

$$\gamma_2 / \gamma_1 = \lambda \gamma = L_2 / L_1 \cdot t_1^2 / t_2^2 = \lambda / \lambda_t^2$$

On constate que le choix de l'échelle des temps impose celle des vitesses; et celle des accélérations.

c/ Similitude dynamique

Les mouvements dans le prototype et dans le modèle sont provoqués par des forces. Pour que les deux systèmes soient dynamiquement semblables, il est nécessaire que les forces agissant en des points homologues du modèle et du prototype soient dans un rapport fixe et bien déterminé.

Il en découle que l'existence d'une similitude dynamique stricte est conditionnée par l'identité des nombres de FROUDE, REYNOLDS, MACH, et WEBER, dans les points homologues du modèle et du prototype. Ce qui est pratiquement impossible à réaliser sauf si l'échelle du modèle $\lambda = 1$.

Heureusement cette impossibilité ne signifie pas la caducité de l'expérimentation sur modèles réduits, car suivant la nature de l'écoulement les forces y intervenant sont plus ou moins importantes.

- Ainsi les forces dues à la tension superficielle n'interviennent que dans le cas des écoulements par gouttes ou par petits jets.
- et l'effet des forces dues à l'élasticité n'a pratiquement aucune influence sur l'écoulement permanent franchement subsonique des liquides ($M=0,7$).

- Les forces à la viscosité peuvent avoir une importance plus ou moins grande par rapport aux forces dues à l'inertie et à la pesanteur, suivant le degré de turbulence du régime, c-à-d suivant la grandeur du nombre de Reynolds caractérisant l'écoulement.

VI -4: Définitions

1/ Le nombre de FROUDE:

Il exprime la relation entre les forces dues à l'inertie et les forces dues à la pesanteur.

Dans le cas des écoulements à surface libre l'action de la pesanteur devient importante au point de vue de la nature de l'écoulement.

Ce nombre est utilisé dans le calcul des ressauts hydrauliques, dans les projets des canaux ouverts, dans de nombreuses structures hydrauliques et dans les constructions navales.

2/ Le nombre de REYNOLDS:

Il caractérise la relation entre les forces dues à l'inertie et les forces dues à la viscosité.

Ce paramètre joue un rôle très important dans la détermination des phénomènes d'écoulement, la résistance etc.

3/ Le nombre de WEBER:

Il exprime la relation entre les forces dues à l'inertie et les forces dues à la tension superficielle.

Ce paramètre est important pour l'étude des petits jets et des gouttes.

4/ Le nombre de MACH:

Il exprime la relation entre les forces dues à l'inertie et les forces dues à l'élasticité. C'est la vitesse du fluide divisée par la vitesse du son dans le milieu.

On va examiner ci-après, les deux cas les plus importants du point de vue pratique de la similitude dynamique.

V1 -5:a: Cas où les forces dues à la viscosité sont négligeables par rapport aux forces dues à l'inertie et à la pesanteur.

Similitude de REECH-FROUDE

- La force due à l'inertie agissant sur la particule de masse m , animée d'une vitesse v sur sa trajectoire dont le rayon de courbure est r ; a pour expression:

$$\text{dans le prototype } F_1 = m_1 v_1^2 / r$$

$$\text{et au point homologue du modèle } F_2 = m_2 v_2^2 / r$$

$$\text{d'où } F_2 / F_1 = (m_2 / m_1) (v_2^2 / v_1^2) (r_1 / r_2)$$

posons $F_2 / F_1 = \lambda_{fi}$: échelle des forces d'inertie

et $m_2 / m_1 = \lambda_m$: échelle des masses

$$\text{il vient } \lambda_{fi} = \lambda_m \lambda_v^2 / \lambda_r = \lambda_m \lambda_v^2 \lambda_r^{-2}$$

$$\text{mais } \lambda_m = \lambda_\rho \cdot \lambda^3$$

$$\text{donc } \lambda_{fi} = \lambda_\rho \cdot \lambda^4 \cdot \lambda_r^{-2}$$

- Quant à l'échelle λ_{fp} des forces dues à la pesanteur; on sait que $F = mg$,
et de la même manière que le raisonnement précédent on trouve:

$$\lambda_{fp} = \lambda_\rho \cdot \lambda^3 \cdot \lambda_g$$

λ_g désignant l'échelle de l'accélération de la pesanteur, et comme il est pratiquement impossible de faire varier g ;

alors $\lambda_g = 1$

et l'équation précédente devient: $\lambda_{fp} = \lambda_\rho \cdot \lambda^3$

Si donc, l'écoulement considéré est tel que les forces dues à la viscosité puissent être négligées par rapport aux forces dues à l'inertie et à la pesanteur, ces deux dernières catégories sont pratiquement seules à intervenir et la condition de la similitude des forces impose que les rapports λ_{fi} et λ_{fp} soient les mêmes:

$$c\text{-à-d} \quad \lambda_\rho \lambda^4 \lambda_t^{-2} = \lambda_\rho \lambda^3$$

$$d'où \quad \lambda / \lambda_t^2 = 1 \quad \text{ou} \quad \lambda^2 / \lambda_t^2 = \lambda \quad \text{or} \quad \lambda_v = \lambda / \lambda_t$$

$$donc \quad \lambda_v = \sqrt{\lambda} = \sqrt{\frac{L_2}{L_1}}$$

Le rapport des vitesses est donc égal à la racine carrée du rapport des longueurs, cette relation très importante est connue sous le nom de la loi de Similitude de REECH-FROUDE.

$$D'après cette relation \quad v_2^2 / v_1^2 = L_2 / L_1 \quad \text{ou} \quad v_2^2 / g L_2 = v_1^2 / g L_1$$

La condition de la similitude imposée revient donc à réaliser un écoulement caractérisé par un même nombre de FROUDE dans le modèle et dans le prototype.

En combinant les similitudes géométrique cinématique et dynamique il est facile d'établir les rapports de toutes les caractéristiques de l'écoulement dans le modèle et dans le prototype:::

$$\text{-temps} \quad \lambda_t = \sqrt{\lambda_v}$$

$$\text{-vitesse} \quad \lambda_v = \sqrt{\lambda}$$

$$\text{-débit} \quad \lambda_q = \lambda^{5/2} = \lambda_v \lambda^2$$

$$\text{-accélération} \quad \lambda_x = \lambda / \lambda_t^2 = 1$$

$$\text{-force} \quad \lambda_f = \lambda_m \lambda_x = \lambda_\rho \lambda^3$$

$$\text{-pression} \quad \lambda_p = \lambda_f / \lambda^2 = \lambda_q \lambda$$

$$\text{-puissance} \quad \lambda_p = \lambda_f \lambda / \lambda_t = \lambda_q \lambda^{7/2}$$

Le plus souvent on utilise le même fluide dans le modèle et dans le prototype; il suffit alors de faire $\lambda_q = 1$.

VI.-5:b: Cas où les forces dues à la pesanteur sont négligeables par rapport aux forces dues à l'inertie et à la viscosité.

Dans ce cas on envisage la similitude de Reynolds.

On va voir maintenant deux grandes classes parmi les ouvrages hydrauliques :

1/ Ouvrages courts découverts:

Dans le cas des ouvrages tels

que déversoirs, vannes, orifices, bassins de dissipation d'énergie, raccords des canaux etc.

Les forces déterminant l'écoulement sont dues à la pesanteur et à l'inertie, les forces dues à la viscosité sont insignifiantes, elles n'interviennent même pas dans les formules relatives à l'écoulement.

Ainsi les essais sur modèles concernant cette catégorie d'ouvrages dits ouvrages courts doivent être exécutés suivant les lois de la similitude de REECH-FROUDE.

2/ Ouvrages longs découverts:

C'est le cas des écoulements

à surface libre dans un canal ou rivière.

V1 -6: Détermination du seuil de WEBER

L'écoulement à travers les orifices circulaires constitue un écoulement à surface libre.

La similitude exige donc le respect des lois de REICH-FROUDE; autrement dit, pour que deux écoulements à travers deux orifices en mince paroi soient semblables il faut qu'ils aient le même nombre de FROUDE.

La détermination du seuil de WEBER se fait de la manière suivante:

1^{er} pas: On se propose un prototype de diamètre $\phi=300\text{mm}$, le coefficient de débit de cet orifice pour les différentes charges est tiré du manuel d'hydraulique général puisque l'on ne peut pas le déterminer au laboratoire.

Connaissant le coefficient de débit pour une charge donnée, on peut calculer le débit correspondant d'après la formule: $Q=mA\sqrt{2gh}$.

Ensuite on a tracé la courbe $Q=f(h/D)$, sur une feuille de division logarithmique et la courbe obtenue est une droite de pente égale à $1/2$.

2^{ème} pas: La série des modèles qu'on dispose est constituée par des orifices de diamètre:

$\phi=180/60/30/15/5/4/3/2,5/2/1,5/1$ mm. Les essais que nous avons fait au laboratoire correspondent aux orifices $\phi=5/4/3/2,5/2/1,5/1\text{mm}$; quant aux autres il n'était pas dans notre possible de déterminer leur caractéristiques au laboratoire ; alors on a

tiré leur coefficient de débit relatif aux différentes charges du manuel d'hydraulique général aussi.

3^{ème} pas: Pour chaque modèle on a calculé le rapport h/D et avec ce rapport on a pu trouver le débit Q_p du prototype à l'aide du graphe $Q=f(h/D)$.

Ensuite on a calculé l'échelle $k=\phi_{\text{modèle}}/\phi_{\text{prototype}}$.

Puis on a déterminé le débit similitude $Q_s=k^{5/2} \cdot Q_p$

Ayant le débit expérimental de chaque orifice $Q_{\text{exp}}=mA\sqrt{2gh}$.

Finalement on a calculé le nombre de WEBER pour chaque modèle.

RESULTATS

Le 1er tableau de la série suivante est relatif au prototype et les autres sont relatifs aux différents modèles.

Finalement on trouve la gamme de courbes $Q_{\text{exp}}/Q_s=f(W)$ pour chaque cas de h/D .

Modèle $\phi = 0,18 \text{ m} - A = 0,0254 \text{ m}^2$

h	h/D	m	Q_p m^3/s	λ	$\lambda^{5/2}$	Q_s m^3/s	Q_{exp} m^3/s	Q_{exp}/Q_s	W
0,15 m	0,834	0,592	0,0925	0,6	0,279	0,0258	0,0258	1	$7,26 \cdot 10^3$
0,18	1	0,593	0,103			0,0287	0,0283	0,986	$8,73 \cdot 10^3$
0,21	1,167	0,593	0,1105			0,0308	0,0306	0,994	$1,02 \cdot 10^4$
0,24	1,33	0,594	0,1175			0,0328	0,0328	1	$1,166 \cdot 10^4$
0,27	1,5	0,594	0,125			0,0349	0,0347	0,994	$1,31 \cdot 10^4$
0,30	1,67	0,595	0,132			0,0368	0,0367	0,997	$1,465 \cdot 10^4$
0,40	2,22	0,595	0,160			0,0446	0,0423	0,948	$1,94 \cdot 10^4$
0,60	3,34	0,596	0,187			0,0522	0,0519	0,994	$2,91 \cdot 10^4$
0,90	5	0,597	0,224			0,0625	0,0637	1,02	$4,36 \cdot 10^4$
1,20	6,67	0,598	0,262			0,0729	0,0732	1,004	$5,74 \cdot 10^4$
1,80	10	0,597	0,321			0,0895	0,0903	1,009	$8,75 \cdot 10^4$
2,40	13,33	0,597	0,361			0,1006	0,104	1,034	$1,16 \cdot 10^5$
3,00	16,67	0,596	0,418			0,1165	0,1159	0,995	$1,45 \cdot 10^5$
6,00	33,34	0,596	0,585			0,163	0,164	1,01	$2,89 \cdot 10^5$

Modèle $\phi = 0,060 \text{ m}$ - $A = 0,0028 \text{ m}^2$.

h	h/D	m	Q_p	λ	$\lambda^{5/2}$	Q_s	Q_{exp}	Q_{exp}/Q_s	W
0,15	2,5	0,600	0,162	9,5	0,177	0,0287	0,0288	1,002	$2,42 \cdot 10^3$
0,18	3	0,601	0,177			0,0314	0,0316	1,01	$2,91 \cdot 10^3$
0,21	3,5	0,601	0,191			0,0329	0,0342	1,01	$3,39 \cdot 10^3$
0,24	4	0,601	0,203			0,0359	0,0365	1,02	$3,88 \cdot 10^3$
0,27	4,5	0,601	0,2165			0,0382	0,0387	1,01	$4,37 \cdot 10^3$
0,30	5	0,600	0,224			0,0397	0,0408	1,03	$4,85 \cdot 10^3$
0,40	6,67	0,600	0,2617			0,0463	0,047	1,02	$6,45 \cdot 10^3$
0,60	10	0,599	0,321			0,0568	0,0575	1,01	$9,69 \cdot 10^3$
0,90	15	0,599	0,394			0,0697	0,0705	1,01	$1,45 \cdot 10^4$
1,20	20	0,599	0,455			0,0801	0,081	1,01	$1,91 \cdot 10^4$
1,80	30	0,598	0,556			0,0984	0,100	1,02	$2,92 \cdot 10^4$
2,40	40	0,598	0,641			0,1115	0,115	1,01	$3,88 \cdot 10^4$
3,00	50	0,597	0,718			0,127	0,128	1,01	$4,83 \cdot 10^4$
6,00	60	0,596	0,785			0,139	0,180	1,30	$9,66 \cdot 10^4$

Modèle $\phi = 0,030 \text{ m}$ - $A = 7,065 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

h	$h/0$	m	Q_p	λ	$\frac{5/2}{\lambda}$	Q_s	Q_{exp}	Q_{exp}/Q_s	W
0,12	4	0,618	0,203	0,1	0,0032	$6,5 \cdot 10^{-4}$	$6,315 \cdot 10^{-4}$	1,048	$1 \cdot 10^3$
0,15	5	0,615	0,224			$7,17 \cdot 10^{-4}$	$7,55 \cdot 10^{-4}$	1,054	$1,21 \cdot 10^3$
0,18	6	0,613	0,251			$8,03 \cdot 10^{-4}$	$8,14 \cdot 10^{-4}$	1,014	$1,45 \cdot 10^3$
0,21	7	0,611	0,270			$8,64 \cdot 10^{-4}$	$8,75 \cdot 10^{-4}$	1,01	$1,69 \cdot 10^3$
0,24	8	0,610	0,289			$9,25 \cdot 10^{-4}$	$9,36 \cdot 10^{-4}$	1,01	$1,94 \cdot 10^3$
0,27	9	0,609	0,3025			$9,68 \cdot 10^{-4}$	$9,9 \cdot 10^{-4}$	1,02	$2,18 \cdot 10^3$
0,30	10	0,608	0,322			$10,28 \cdot 10^{-4}$	$10,44 \cdot 10^{-4}$	1,016	$2,42 \cdot 10^3$
0,40	13,33	0,605	0,3605			$11,53 \cdot 10^{-4}$	$11,97 \cdot 10^{-4}$	1,04	$3,22 \cdot 10^3$
0,60	20	0,604	0,455			$14,57 \cdot 10^{-4}$	$14,63 \cdot 10^{-4}$	1,004	$4,84 \cdot 10^3$
0,90	30	0,603	0,556			$17,8 \cdot 10^{-4}$	$17,9 \cdot 10^{-4}$	1,005	$7,26 \cdot 10^3$
1,20	40	0,602	0,641			$20,5 \cdot 10^{-4}$	$20,47 \cdot 10^{-4}$	1	$9,56 \cdot 10^3$
1,80	60	0,601	0,785			$25,14 \cdot 10^{-4}$	$25,24 \cdot 10^{-4}$	1,004	$1,46 \cdot 10^4$
2,40	80	0,600	0,908			$29,05 \cdot 10^{-4}$	$29,05 \cdot 10^{-4}$	1	$1,94 \cdot 10^4$
3,00	100	0,598	1,03			$32,95 \cdot 10^{-4}$	$32,4 \cdot 10^{-4}$	0,98	$2,42 \cdot 10^4$
6,00	200	0,596	-			-	-	-	-

Modèle $\phi = 0,015$ - $A = 1,77 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$.

h	h/l_0	m	Q_p	λ	$\frac{5/2}{\lambda}$	Q_s	Q_{exp}	Q_{exp}/Q_s	W
0,12	8	0,631	0,289	0,05	0,00056	$1,6 \cdot 10^{-4}$	$1,74 \cdot 10^{-4}$	1,074	$5 \cdot 10^2$
0,15	10	0,627	0,321			$1,79 \cdot 10^{-4}$	$1,91 \cdot 10^{-4}$	1,06	$6 \cdot 10^2$
0,18	12	0,624	0,365			$2,04 \cdot 10^{-4}$	$2,08 \cdot 10^{-4}$	1,015	$7,27 \cdot 10^2$
0,21	14	0,622	0,380			$2,12 \cdot 10^{-4}$	$2,23 \cdot 10^{-4}$	1,046	$8,5 \cdot 10^2$
0,24	16	0,620	0,4075			$2,28 \cdot 10^{-4}$	$2,38 \cdot 10^{-4}$	1,044	$9,72 \cdot 10^2$
0,27	18	0,618	0,432			$2,42 \cdot 10^{-4}$	$2,52 \cdot 10^{-4}$	1,04	$1,09 \cdot 10^3$
0,30	20	0,617	0,455			$2,55 \cdot 10^{-4}$	$2,65 \cdot 10^{-4}$	1,04	$1,21 \cdot 10^3$
0,40	26,66	0,613	0,543			$3,04 \cdot 10^{-4}$	$3,04 \cdot 10^{-4}$	1	$1,64 \cdot 10^3$
0,60	40	0,610	0,641			$3,59 \cdot 10^{-4}$	$3,7 \cdot 10^{-4}$	1,04	$2,42 \cdot 10^3$
0,90	60	0,606	0,785			$4,4 \cdot 10^{-4}$	$4,5 \cdot 10^{-4}$	1,02	$3,63 \cdot 10^3$
1,20	80	0,605	0,908			$5,08 \cdot 10^{-4}$	$5,16 \cdot 10^{-4}$	1,015	$4,78 \cdot 10^3$
1,80	120	0,604	-			-	-	-	-
2,40	160	0,603	-			-	-	-	-
3,00	200	0,601	-			-	-	-	-
6,00	400	0,598	-			-	-	-	-

Modèle $\phi = 0,005 \text{ m} - A = 19,64 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$.

h	h/D	Q_p	λ	$\frac{5/2}{\lambda}$	Q_s	$\frac{Q_{exp}}{Q_s}$	Q_{exp}	W
0,24	48	0,7	0,01665	$3,6 \cdot 10^5$	$25,2 \cdot 10^{-6}$	1,07	$27 \cdot 10^{-6}$	$3,24 \cdot 10^2$
0,20	40	0,641			$23 \cdot 10^{-6}$	1,152	$26,5 \cdot 10^{-6}$	$2,69 \cdot 10^2$
0,15	30	0,556			$20 \cdot 10^{-6}$	1,15	$23 \cdot 10^{-6}$	$2,01 \cdot 10^2$
0,10	20	0,455			$164 \cdot 10^{-6}$	1,18	$19,4 \cdot 10^{-6}$	$1,34 \cdot 10^2$
0,07	14	0,380			$13,7 \cdot 10^{-6}$	1,22	$16,72 \cdot 10^{-6}$	$94 \cdot 10^1$
0,05	10	0,321			$11,55 \cdot 10^{-6}$	1,39	$16,07 \cdot 10^{-6}$	$6,7 \cdot 10^1$
0,03	6	0,251			$9,05 \cdot 10^{-6}$	1,32	$11,96 \cdot 10^{-6}$	$4,7 \cdot 10^1$
0,02	4	0,203			$7,3 \cdot 10^{-6}$	1,97	$14,4 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^1$
0,01	2	0,144			$5,02 \cdot 10^{-6}$	-	-	-

Modèle $\phi = 0,004 \text{ m} - A = 12,56 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

h	$h/2$	q_p	λ	$\frac{s/2}{\lambda}$	Q_s	Q_{exp}	Q_{exp}/Q_s	W
0,24	60	0,785	0,013	$1933 \cdot 10^{-6}$	$15,1 \cdot 10^{-6}$	$1944 \cdot 10^{-6}$	1,287	$2,59 \cdot 10^2$
0,20	50	0,718			14,4	$18,5 \cdot 10^{-6}$	1,275	$2,15 \cdot 10^2$
0,15	37,5	0,620			$11,9 \cdot 10^{-6}$	$15,2 \cdot 10^{-6}$	1,277	$4,61 \cdot 10^2$
0,10	25	0,508			$9,82 \cdot 10^{-6}$	$12,4 \cdot 10^{-6}$	1,26	$1,07 \cdot 10^2$
0,07	17,5	0,425			$8,21 \cdot 10^{-6}$	$11,8 \cdot 10^{-6}$	1,44	$0,75 \cdot 10^2$
0,05	12,5	0,360			$6,96 \cdot 10^{-6}$	$7,85 \cdot 10^{-6}$	1,13	$0,53 \cdot 10^2$
0,03	7,5	0,278			$5,38 \cdot 10^{-6}$	$7,32 \cdot 10^{-6}$	1,36	$0,37 \cdot 10^2$
0,02	5	0,224			$4,33 \cdot 10^{-6}$	$5,82 \cdot 10^{-6}$	1,33	$0,21 \cdot 10^2$
0,01	2,5	0,162			$2,13 \cdot 10^{-6}$	-	-	-

Modèle $\phi = 0,003 \text{ m} - A = 7,075 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$

h	h/d	Q_p	λ	$\frac{5}{\lambda}$	Q_s	Q_{exp}	Q_{exp}/Q_s	W
0,24	80	0,908	0,01	$1 \cdot 10^{-5}$	$9,08 \cdot 10^{-6}$	$12,63 \cdot 10^{-6}$	1,39	$1,94 \cdot 10^{-2}$
0,20	66,7	0,827			$8,27 \cdot 10^{-6}$	$10,28 \cdot 10^{-6}$	1,24	$1,61 \cdot 10^{-2}$
0,15	50	0,718			$7,18 \cdot 10^{-6}$	$9,52 \cdot 10^{-6}$	1,34	$1,21 \cdot 10^{-2}$
0,10	33,3	0,585			0,585	$7,76 \cdot 10^{-6}$	1,26	$0,8 \cdot 10^{-2}$
0,07	23,3	0,49			$4,9 \cdot 10^{-6}$	$6,33 \cdot 10^{-6}$	1,29	$0,56 \cdot 10^{-2}$
0,05	16,67	0,46			$4,6 \cdot 10^{-6}$	$5,18 \cdot 10^{-6}$	1,13	$0,40 \cdot 10^{-2}$
0,03	10	0,321			$3,21 \cdot 10^{-6}$	$4,52 \cdot 10^{-6}$	1,43	$0,28 \cdot 10^{-2}$
0,02	6,67	0,262			$2,62 \cdot 10^{-6}$	$3,52 \cdot 10^{-6}$	1,35	$0,16 \cdot 10^{-2}$
0,01	3,33	0,187			$1,87 \cdot 10^{-6}$	-	-	-

Modèle $\phi = 9,0025 \text{ m} - A = 4,91 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$.

h	$h/10$	Q_p	λ	$\lambda^{5/2}$	Q_{exp}	Q_s	Q_{exp}/Q_s	W
0,24	96	0,993	0,0083	$0,27 \cdot 10^{-6}$	$7,49 \cdot 10^{-6}$	$6,23 \cdot 10^{-6}$	1,2	$1,62 \cdot 10^2$
0,20	80	0,908			$6,46 \cdot 10^{-6}$	$5,7 \cdot 10^{-6}$	1,13	$1,34 \cdot 10^2$
0,15	60	0,785			$6,18 \cdot 10^{-6}$	$4,92 \cdot 10^{-6}$	1,26	$1 \cdot 10^2$
0,10	40	0,641			$5,63 \cdot 10^{-6}$	$4,02 \cdot 10^{-6}$	1,4	$0,53 \cdot 10^2$
0,07	28	0,537			$4,47 \cdot 10^{-6}$	$3,365 \cdot 10^{-6}$	1,33	$0,46 \cdot 10^2$
0,05	20	0,455			$3,88 \cdot 10^{-6}$	$2,854 \cdot 10^{-6}$	1,36	$0,33 \cdot 10^2$
0,03	12	0,365			$3,00 \cdot 10^{-6}$	$2,29 \cdot 10^{-6}$	1,31	$0,23 \cdot 10^2$
0,02	8	0,289			$2,27 \cdot 10^{-6}$	$1,81 \cdot 10^{-6}$	1,25	$0,13 \cdot 10^2$
0,01	4	0,203			-	$1,27 \cdot 10^{-6}$	-	-

Modèle $\phi = 0,002 \text{ m}$ - $A = 3,14 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$.

h	h/D	Q_p	λ	$\frac{5/2}{\lambda}$	Q_s	Q_{exp}	Q_{exp}/Q_s	W
0,24	120	-	0,0067	$3,67 \cdot 10^{-6}$	-	$4,62 \cdot 10^{-6}$	-	$1,29 \cdot 10^2$
0,20	100	1,03			$3,78 \cdot 10^{-6}$	$4,28 \cdot 10^{-6}$	1,132	$1,07 \cdot 10^2$
0,15	75	0,88			$3,23 \cdot 10^{-6}$	$3,52 \cdot 10^{-6}$	1,0897	$0,8 \cdot 10^2$
0,10	50	0,718			$2,618 \cdot 10^{-6}$	$3,38 \cdot 10^{-6}$	1,29	$0,53 \cdot 10^2$
0,07	35	0,60			$2,21 \cdot 10^{-6}$	$2,56 \cdot 10^{-6}$	1,158	$0,37 \cdot 10^2$
0,05	25	0,508			$1,865 \cdot 10^{-6}$	$2,01 \cdot 10^{-6}$	1,078	$0,26 \cdot 10^2$
0,03	15	0,394			$1,445 \cdot 10^{-6}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	1,246	$0,10 \cdot 10^2$
0,02	10	0,321			$1,18 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
0,01	5	0,224			$0,822 \cdot 10^{-6}$	-	-	-

Modèle $\phi = 0,0015 \text{ m} - A = 1,768 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$.

h	h/D	Q_p	λ	$\frac{5/2}{\lambda}$	Q_s	Q_{exp}	Q_{exp}/Q_s	W
0,24	160	-	0,005	$1,77 \cdot 10^{-6}$	$1, -$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	-	$0,97 \cdot 10^{-2}$
0,20	133,4	-			-	$3,02 \cdot 10^{-6}$	-	$0,80 \cdot 10^{-2}$
0,15	100	1,03			$1,82 \cdot 10^{-6}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$	1,39	$0,6 \cdot 10^{-2}$
0,10	66,6	0,827			$1,465 \cdot 10^{-6}$	$2,22 \cdot 10^{-6}$	1,56	$0,403 \cdot 10^{-2}$
0,07	46,6	0,691			$1,22 \cdot 10^{-6}$	$1,96 \cdot 10^{-6}$	1,61	$0,28 \cdot 10^{-2}$
0,05	33,34	0,585			$1,035 \cdot 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^{-6}$	1,41	$0,2 \cdot 10^{-2}$
0,03	20	0,455			$0,805 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
0,02	13,34	0,3715			$0,657 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
0,01	6,66	0,2617			$0,463 \cdot 10^{-6}$	-	-	-

Modèle $\phi = 0,0015 \text{ m} - A = 1,768 \cdot 10^6 \text{ m}^2$.

h	h/d	Q_p	λ	$\frac{5/2}{\lambda}$	Q_s	Q_{exp}	Q_{exp}/Q_s	W
0,24	160	-	0,005	$177 \cdot 10^{-6}$	$1, -$	$3,3 \cdot 10^{-6}$	-	$0,97 \cdot 10^{-2}$
0,20	133,4	-			-	$3,02 \cdot 10^{-6}$	-	$0,80 \cdot 10^{-2}$
0,15	100	1,03			$1,82 \cdot 10^{-6}$	$2,52 \cdot 10^{-6}$	1,39	$0,6 \cdot 10^{-2}$
0,10	66,6	0,827			$1,465 \cdot 10^{-6}$	$2,22 \cdot 10^{-6}$	1,56	$0,403 \cdot 10^{-2}$
0,07	46,6	0,691			$1,22 \cdot 10^{-6}$	$1,96 \cdot 10^{-6}$	1,61	$0,28 \cdot 10^{-2}$
0,05	33,34	0,585			$1,035 \cdot 10^{-6}$	$1,46 \cdot 10^{-6}$	1,41	$0,2 \cdot 10^{-2}$
0,03	20	0,455			$0,805 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
0,02	13,34	0,3715			$0,657 \cdot 10^{-6}$	-	-	-
0,01	6,66	0,2617			$0,463 \cdot 10^{-6}$	-	-	-

Modèle $\phi = 0,001 \text{ m} - A = 0,785 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2$.

f_z	A/D	Q_p	λ	$\lambda^{5/2}$	Q_s	Q_{exp}	Q_{exp}/Q_s	W
0,24	240	-	0,0033	$0,627 \cdot 10^{-6}$	-	$1,28 \cdot 10^{-6}$	-	64,8
0,20	200	-			-	$1,27 \cdot 10^{-6}$	-	53,8
0,15	150	-			-	$1,2 \cdot 10^{-6}$	-	40,3
0,10	100	1,03			$0,645 \cdot 10^{-6}$	$1,13 \cdot 10^{-6}$	1,75	26,9
0,07	70	0,846			$0,53 \cdot 10^{-6}$	$0,764 \cdot 10^{-6}$	1,25	18,8
0,05	50	-			-	-	-	-
0,03	30	-			-	-	-	-
0,02	20	-			-	-	-	-
0,01	10	-			-	-	-	-

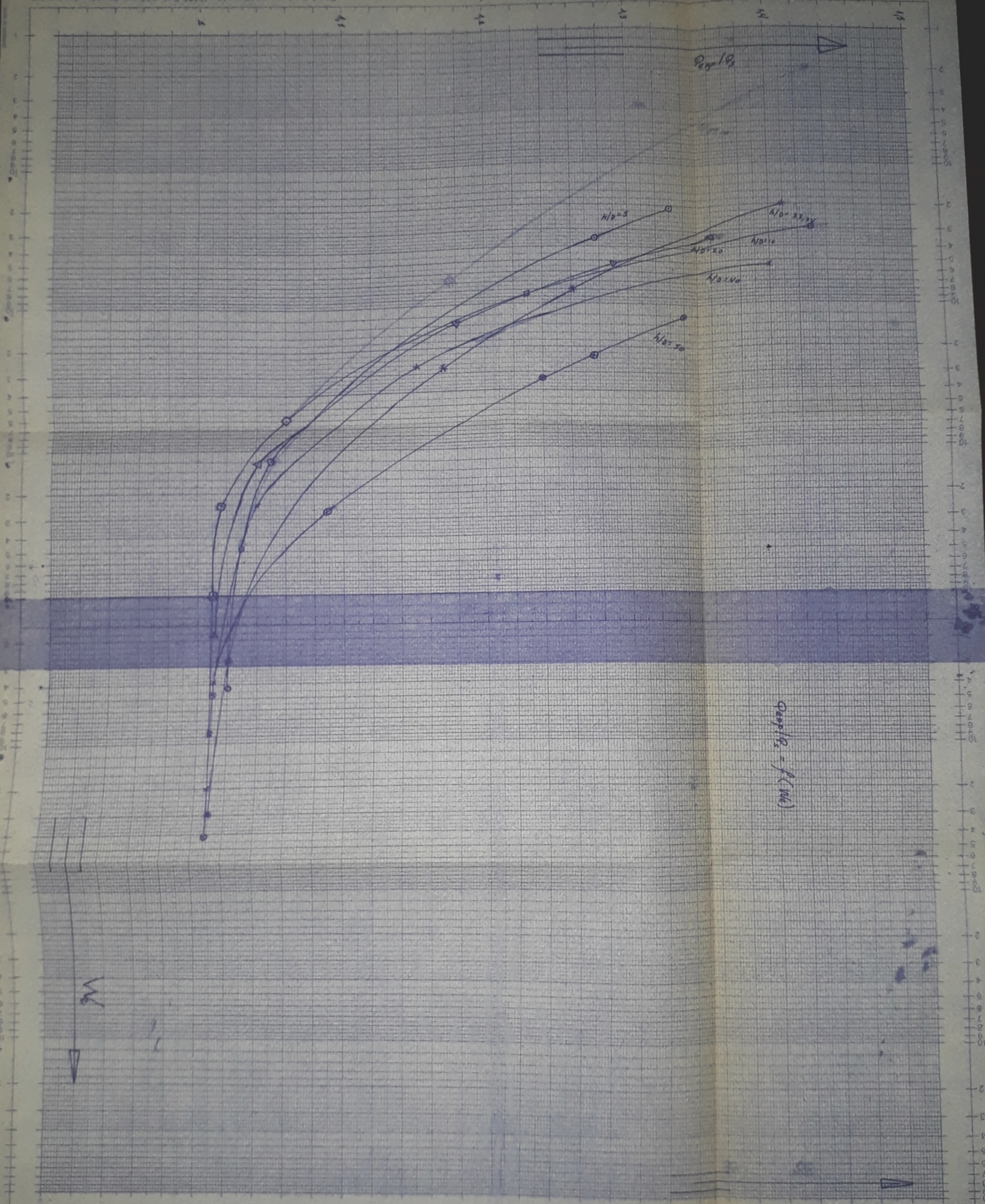
3

Prototype $\phi = 0,30 \text{ m}$ - $A = 0,0707 \text{ m}^2$.				
h	A/D	m	$\sqrt{2gh}$	Q
0,21 m	0,70	0,590	2,032 m/s	0,0848 m ³ /s
0,24	0,80	0,591	2,173	0,0908
0,27	0,90	0,591	2,304	0,09626
0,30	1,00	0,592	2,427	0,1016
0,40	1,33	0,593	2,80	0,1174
0,60	2,00	0,595	3,43	0,1443
0,90	3,00	0,597	4,20	0,1772
1,20	4,00	0,596	4,82	0,2031
1,80	6,00	0,596	5,95	0,2507
2,40	8,00	0,593	6,86	0,289
3,00	10,00	0,593	7,66	0,321
6,00	20,00	0,594	10,83	0,455

BP007/73

Nr. 398, P

Eine Achse liegt gemäß von 1 bis 10000 Einheiten 50 mm, die andere linear in mm.



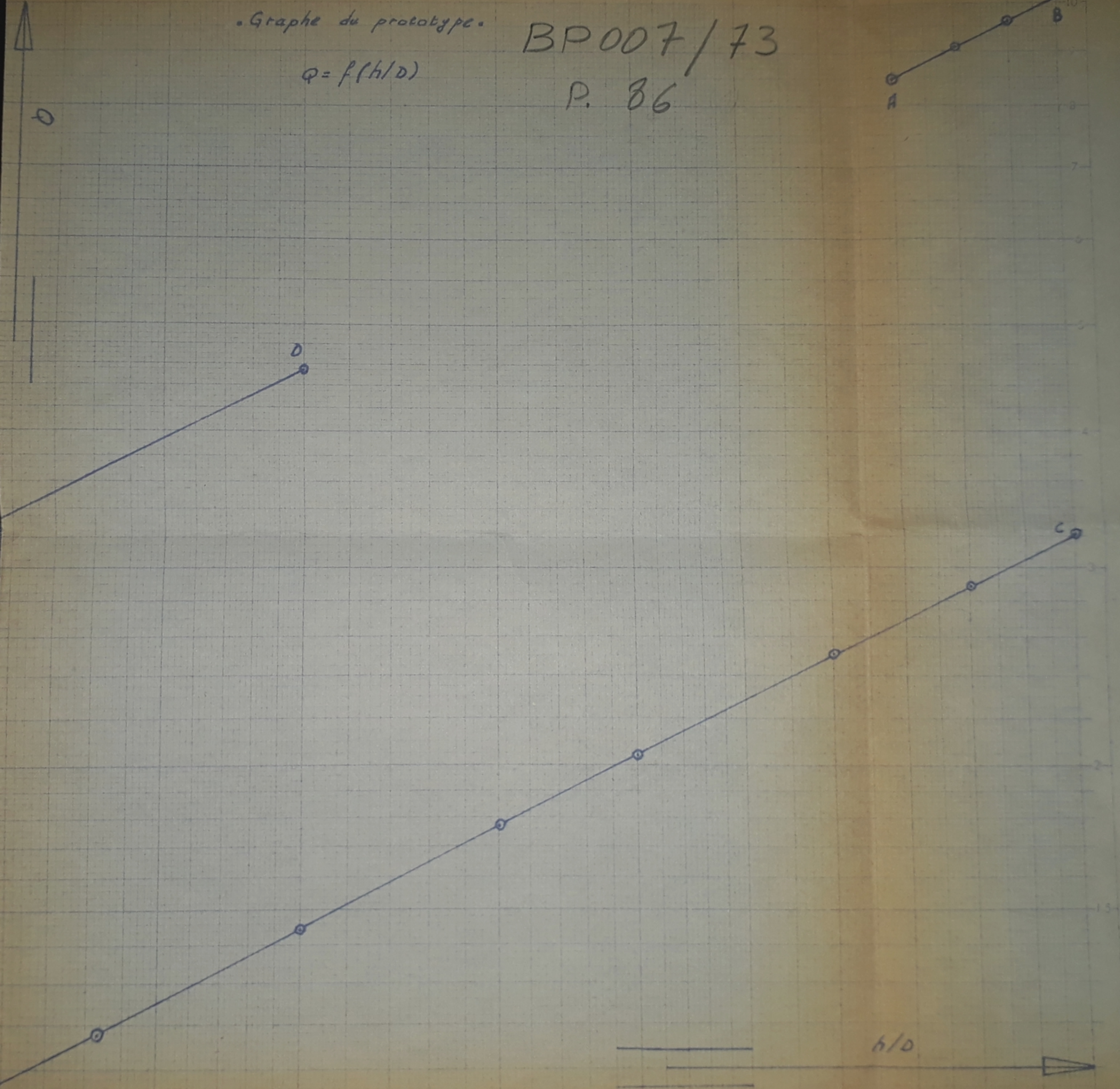
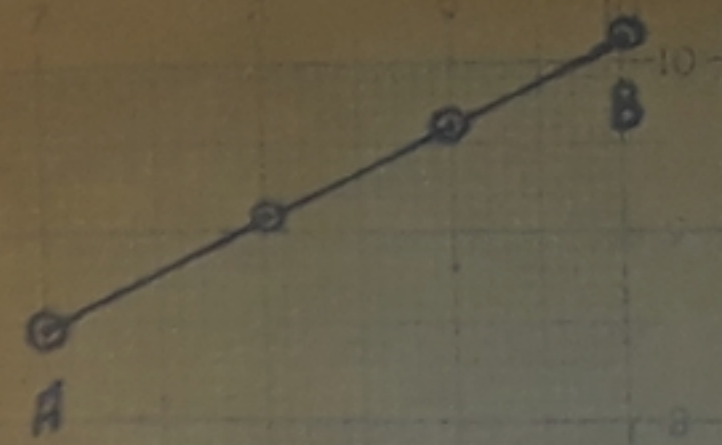
$$Q_{amp}/10^2 = f(W_k)$$

• Graphe du prototype.

$$Q = f(h/D)$$

BP007/73

P. 86



C O N C L U S I O N

Nous constatons d'après la série des courbes $Q_{\text{exp}} / Q_s = f(W_e)$; que la similitude de REECH-FROUDE reste valable à partir d'un nombre de WEBER égal à $4 \cdot 10^4$ avec une incertitude de 2%.

Et à partir d'un nombre égal à $6 \cdot 10^3$ avec une incertitude de 5%.

Au dessous de ce seuil la similitude de R-F n'est plus applicable.

B I B L I O G R A P H I E

- Cours de M. LAPRAY
- Cours d'hydraulique de M.TISON
- Manuel d'hydraulique générale de M.LENCASTRE
- Résistance à l'avancement dans les fluides de
M.HOERNER.

