

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT : **D'HYDRAULIQUE**

PROJET DE FIN D'ETUDES

SUJET

Contribution à la détermination de la plus petite
échelle des modèles réduits des ouvrages
hydrauliques courts.
(Essais sur débit-mètre à ressaut en canal diédrique)

Proposé par :

G. LAPRAY

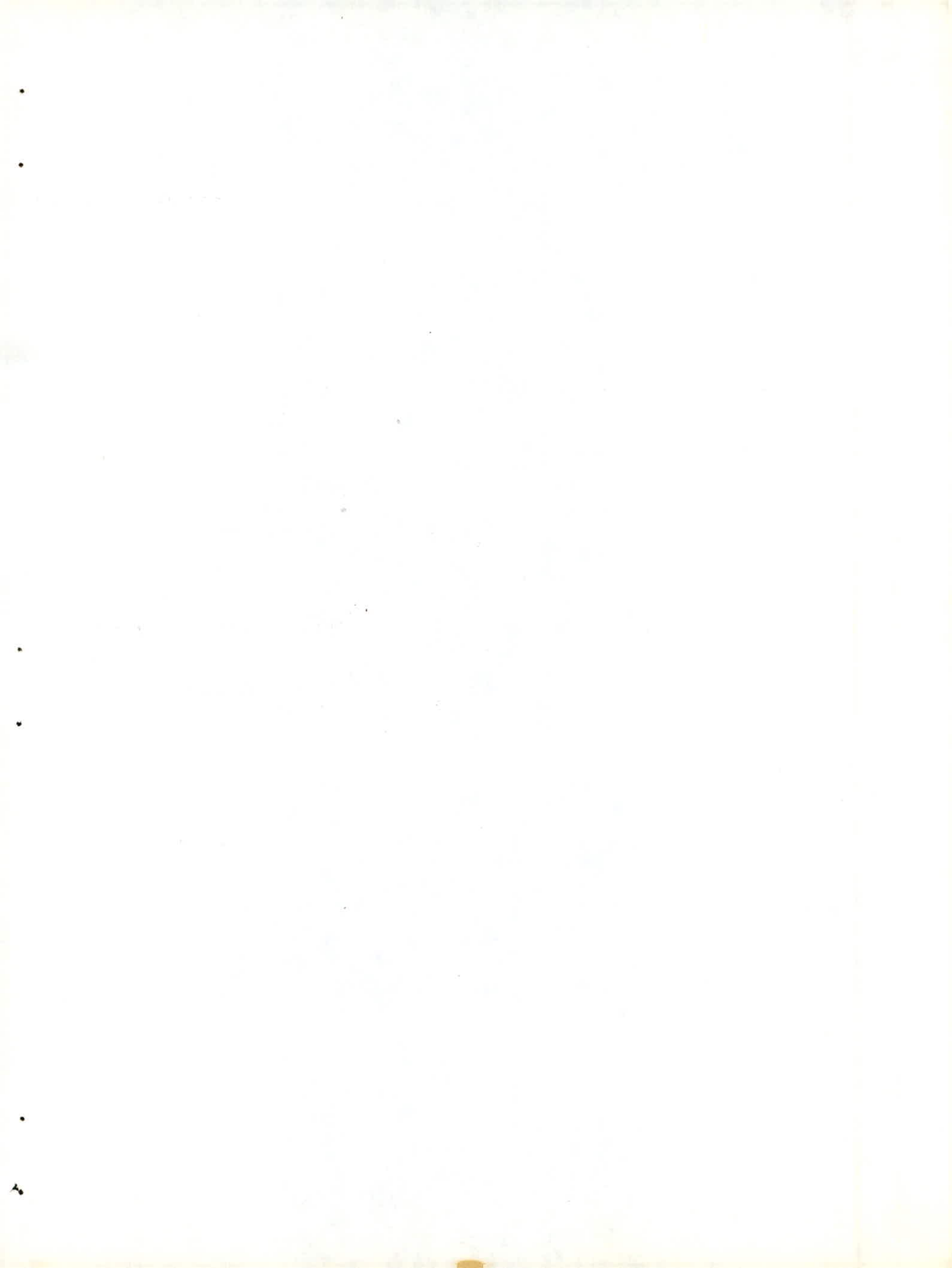
Etudié par :

**M. BENSALAH
O. OUFFA**

Dirigé par :

G. LAPRAY

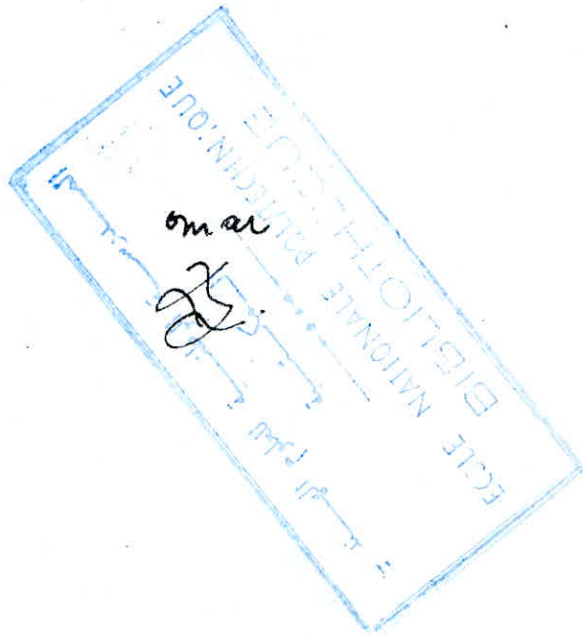




Uédicaces

A la mémoire de nos pères
Nous dédions ce modeste travail:
A nos mères
A nos frères et sœurs
A tous nos amis et ceux qui nous
ont aidé

M. BENSAFI



REMERCIEMENTS

Nous remercions vivement notre promoteur Monsieur GEZA LAPRAY pour l'aide qu'il nous a apporté au cours de l'élaboration de cette étude du point de vue spirituel et matériel (outillages).

Toute notre gratitude :

A Monsieur KHETTAB - Chef de département hydraulique -

A tous les professeurs et assistants qui ont contribué à notre formation d'ingénieur.

A M^{lle} LE-DG S. BELAIDOUNI ainsi que Mademoiselle DJEMMAD pour la frappe.

Notre respect aux membres du jury qui nous fera l'honneur d'apprécier notre travail.

TABLE DES MATIERES

	<u>Pages</u>
<u>AVANT PROPOS.</u>	1
<u>INTRODUCTION</u>	2
<u>CHAPITRE I - ETALONNAGE DU DEBIT METRE A SECTION RETRECIE EN FORME DE SEGMENT.</u>	4
1 - PRINCIPE	
2 - GENERALITES	
3 - APPAREIL D'ETALONNAGE	5
4 - CALCUL THEORIQUE DU DEBIT PASSANT DANS UN TUPE DE DEBIT METRE A SECTION RETRECIE EN FORME DE SEGMENT	6
. TABLEAU DES RESULTATS DE MESURE	
. COURBE D'ETALONNAGE	
<u>CHAPITRE II - DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE</u>	11
I - MODELE REDUIT	
II- BASSIN A NIVEAU CONSTANT	12
<u>CHAPITRE III - THEORIE GENERALE DE L'APPAREIL</u>	13
I - PASSAGE DU COURANT PAR LE DIEDRE ASCENDANT ET LE SEUIL	
A. PLAN DE CHARGE PRIMITIF AU DESSUS DE LA C.L.D.	14
B. PLAN DE CHARGE PRIMITIF AU DESSOUS DE LA C.L.D.	15
C. CARACTERISTIQUES D'UNE SECTION DE CONTROLE	16
D. MINIMUM DE LA CHARGE DANS LA SECTION DE CONTROLE	18
E. PROFONDEUR ET VITESSE CRITIQUES	19

II - ETUDE DE L'ECOULEMENT DANS LE CANAL DIEDRIQUE SUCCEDANT A LA SECTION DE CONTROLE	21
A. EXAMEN DU COMPORTEMENT DU COURANT	
B. INDEPENDANCE DE L'ECOULEMENT VIS A VIS DU PLAN DE CHARGE AVAL	23
III - ETUDE DE L'ECOULEMENT DANS LA ZONE DE TRANSITION CONSECUTIVE AU TRONCON TORRENTIEL CONSTITUANT LA LIAISON AVEC LA COURANT A L'AVAL DE L'OUVRAGE.	23
A. INFLUENCE DU PROFIL TERMINAL	
B. RESSAUT EN CANAL DIEDRIQUE	24
C. PERTE DE CHARGE DUE AU RESSAUT	26
D. POSITION DU PROFIL INITIAL DU RESSAUT	29
 <u>CHAPITRE IV - SIMILITUDE, ETUDE DES MODELES</u>	35
I.- INTRODUCTION	
A. MODELE REDUIT	37
B. QUELQUES PROPRIETES PHYSIQUE DES FLUIDES	
II - RAPPELS DE SIMILITUDES	39
III - LOIS DE SIMILITUDES	
IV - PRODUIT SANS DIMENSIONS	45

S Y M B O L E S & U N I T E S
/-----/

L.	Dimension linéaire	m
e.	Largeur du plan du liquide	m
K.	Tirant critique	m
H _k .	Charge minima du dessus du seuil	m
h _{th} .	Tirant d'eau théorique	m
h _t .	Tirant d'eau tranche torrentiel	m
h.	Tirant d'eau tranche fluvial	m
H.	Perte de charge due au ressaut	m
φ.	Angles d'ouverture	degré
J _o '.	Pente géométrique ascendante	sans dimens
J _o .	Pente géométrique descendante	sans dimens
H.	Charge spécifique	m
A.	Aire d'une section	m ²
A _k .	Aire de section critique ou de contrôle	m ²
P.	Périmètre mouillé	m
D _k .	Diamètre hydraulique critique	m
V.	Volume	m ³
t.	temps	sec.
Q.	Débit :	m ³ /s
	: paramètre de la longueur du ressaut	
V.	Vitesse	m/s
V _k .	Vitesse critique	m/s
g.	Accélération de la pesanteur	m/s ²
\bar{w} .	Poids spéc.	kg/m ³ -N/m
ρ.	Masse volumique	Kg/m ³
p.	pression	kg/m ² - pa.
ν.	Viscosité cinématique	m ² /sec.
σ.	Tension superficielle	kg/m
t°.	Température	°C
Re.	Nombre de REYNOLDS	sans dimens
We.	Nombre de WEBER	sans dimens

AVANT PROPOS

La recherche de l'économie des essais d'hydrauliques sur modèles réduits incite à réduire l'échelle des dits modèles au minimum compatible avec les exigences de la similitudes ; la diminution des dimensions ayant pour suite une très forte réduction des frais et un gain de temps très considérable.

Il est notoire, que pour les ouvrages longs, le minimum de l'échelle linéaire Δ_{\min} est imposé par le seuil de REYNOLDS ; mais dans le cas des ouvrages courts, où la viscosité et les pertes de charges linéaires n'entrent pas en ligne de compte, (par exemple l'écoulement par un orifice, par un déversoir ; etc...) le seuil de REYNOLDS n'a aucune influence sur le phénomène.

Il nous a apparu par contre bien évident que la diminution de l'échelle, au delà d'une certaine valeur limite du nombre de Weber doit avoir pour suite l'accroissement de l'influence des forces dues à la tension superficielle, de sorte que celles-ci ne peuvent plus être négligeables par rapport aux forces dues à la pesanteur et à l'inertie.

Dans un tel cas, la validité de la similitude de REECH FROUDE ne pourrait subsister qu'en cas d'une identité du nombre de Weber sur le modèle et le prototype, ce qui n'est possible que s'il y a compatibilité entre la similitude de REECH FROUDE et celle de WEBER.

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

L'étude de notre projet consiste à la détermination de l'échelle admissible pour les "ouvrages courts" compatible avec l'effet de la tension superficielle par le truchement d'un seuil de WEBER qui précède la recherche de la solution la plus expéditive et la plus économique de l'expérimentation sur modèle réduit.

Il est à noter que notre appareil conçu par Mr LAPRAY appartenant à la catégorie des ouvrages court qui va nous permettre la vérification expérimentale de la théorie du seuil diédrique dont les pertes de charges linéaires et la viscosité sont négligeables et par voie de conséquence le seuil de REYNOLDS n'y intervient pas.

Il est évident que la limite de validité qu'on cherche sera atteinte lorsque le phénomène se produisant sur le modèle réduit aura été sérieusement affecté par la tension superficielle et le nombre de WEBER y correspondant sera appelé "SEUIL DE WEBER", d'où la détermination expérimentale des valeurs minimum des grandeurs physiques (charge, débit, vitesses etc...) caractérisant le phénomène d'écoulement par un tel appareil montrent que la diminution de l'échelle au delà d'une certaine valeur limite du nombre de WEBER doit avoir comme unité l'accroissement de l'influence des forces dues à la tension superficielle, de sorte que celles-ci ne peuvent plus être négligeables par rapport aux forces dues à la pesanteur et à l'inertie.

Dans un tel cas la validité de la similitude de REECH FROUDE ne pouvant subsister qu'en cas d'une identité du nombre de WEBER sur le modèle et le prototype, ce qui n'est possible que s'il y a compatibilité entre la similitude de REECH et celle de WEBER.

. Condition de WEBER.

$$\frac{V_1^2 l_1 \rho_1}{\sigma_1} = \frac{V_2^2 l_2 \rho_2}{\sigma_2} \quad (1)$$

. Condition de REECH FROUDE

$$\frac{V_1^2}{g l_1} = \frac{V_2^2}{g l_2} \quad (2)$$

$$l_2 = \lambda l_1 \quad (3)$$

$$V_2 = \lambda_V V_1 \quad (4)$$

en éliminant l_2 et V_2 entre (2), (3) et (4) on tire.

$$\frac{V_2}{V_1} = \sqrt{\frac{l_2}{l_1}} \Rightarrow \lambda_V = \sqrt{\lambda} \quad (5)$$

En appelant S , le rapport entre la tension superficielle et la masse volumique ρ , tension superficielle cinématique et en posant :

$$\frac{\sigma}{\rho} = S \quad \text{d'où l'équation (1) devient.}$$

$$\frac{V_1^2 l_1}{S_1} = \frac{V_2^2 l_2}{S_2} \quad (7)$$

$$\text{d'où: } \frac{S_2}{S_1} = \frac{V_1^2 l_1}{V_2^2 l_2} \quad \text{soit } \lambda_S = \lambda^2 \quad (8)$$

C'est à dire les conditions de la similitude de REECH FROUDE et de la similitude de WEBER ne pourrait être respectée que si l'équation (8) était satisfaite. Ce qui est absolument impossible, si les liquides passant par les modèles d'une part et le prototype d'autre part, sont les mêmes.

CH-I-

CH-I-ETALONNAGE DU DEBIT. METRE A SECTION RETRECIE EN FORME DE SEGMENT.

1.1. PRINCIPE

En hydraulique avec des conduites en charge, on mesure souvent le débit en produisant une variation de vitesse au moyen d'un rétrécissement du tuyau. Si l'on mesure le terme $V^2/2g$ avant et dans le rétrécissement on a la différence $(V_2^2 - V_1^2)/2g$. on peut déduire le débit (Q), le rétrécissement de la veine liquide peut être provoqué par un diaphragme (à bord tranchant) par une tuyère à bord arrondi ou par un tube de forme particulière inventé par M^r LAPRAY (fig.a), il est basé sur un rétrécissement graduel de la section suivi d'un élargissement graduel aussi, et qu'il sert également à la mesure des débits.

Le débit mètre sera dans une position inclinée légèrement pour éliminer éventuellement les phénomènes de cavitation.

En principe, le débit mètre à section rétrécie consiste en un fort rétrécissement du tube suivi d'un élargissement qu'il prend la forme du tube. Le grand avantage de ce débit mètre consiste en la présence de faibles pertes de charges.

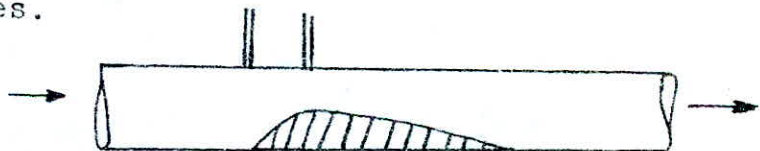


fig.a

1.2. GENERALITES

Pour les petits débits, on recueille dans un récipient le volume d'eau écoulé pendant une durée t , et on en déduit le débit : $Q = \frac{V}{t}$
Le volume V est mesuré directement dans la capacité jaugée, confectionnées à cette occasion, le temps t observé à l'aide d'un chronomètre ordinaire.

I.3. APPAREILS D'ETALONNAGE : CAPACITE JAUGEE

Cet appareil est un récipient composé de deux parties, la première en métal à section horizontale de $6,25 \text{ dm}^2$ et l'autre en plexiglas à section horizontale de 1 dm^2 (voir dessin A).

La partie métallique est constituée d'un tronc inférieur prismatique et d'un autre tronc supérieur de transition en forme de tronc de pyramide.

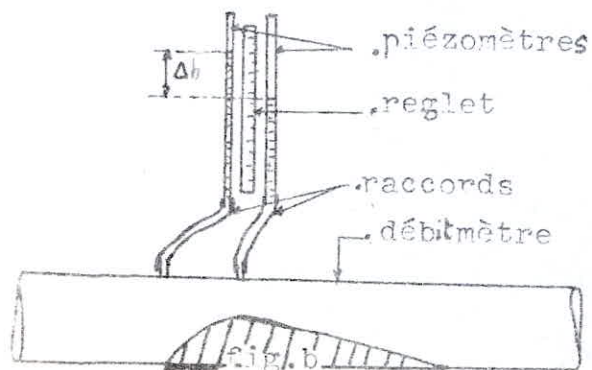
La partie en plexiglas, superposée à partie métallique a pour section un carré de 10 cm sur 10 cm.

Une réglette graduée en position verticale permet la lecture des volumes contenus sachant :

- . Que la division de 20 cm correspond à un volume de 28 litres.
- . Que la différence de 1 cm lu sur la réglette correspond à 1/10 de litre.

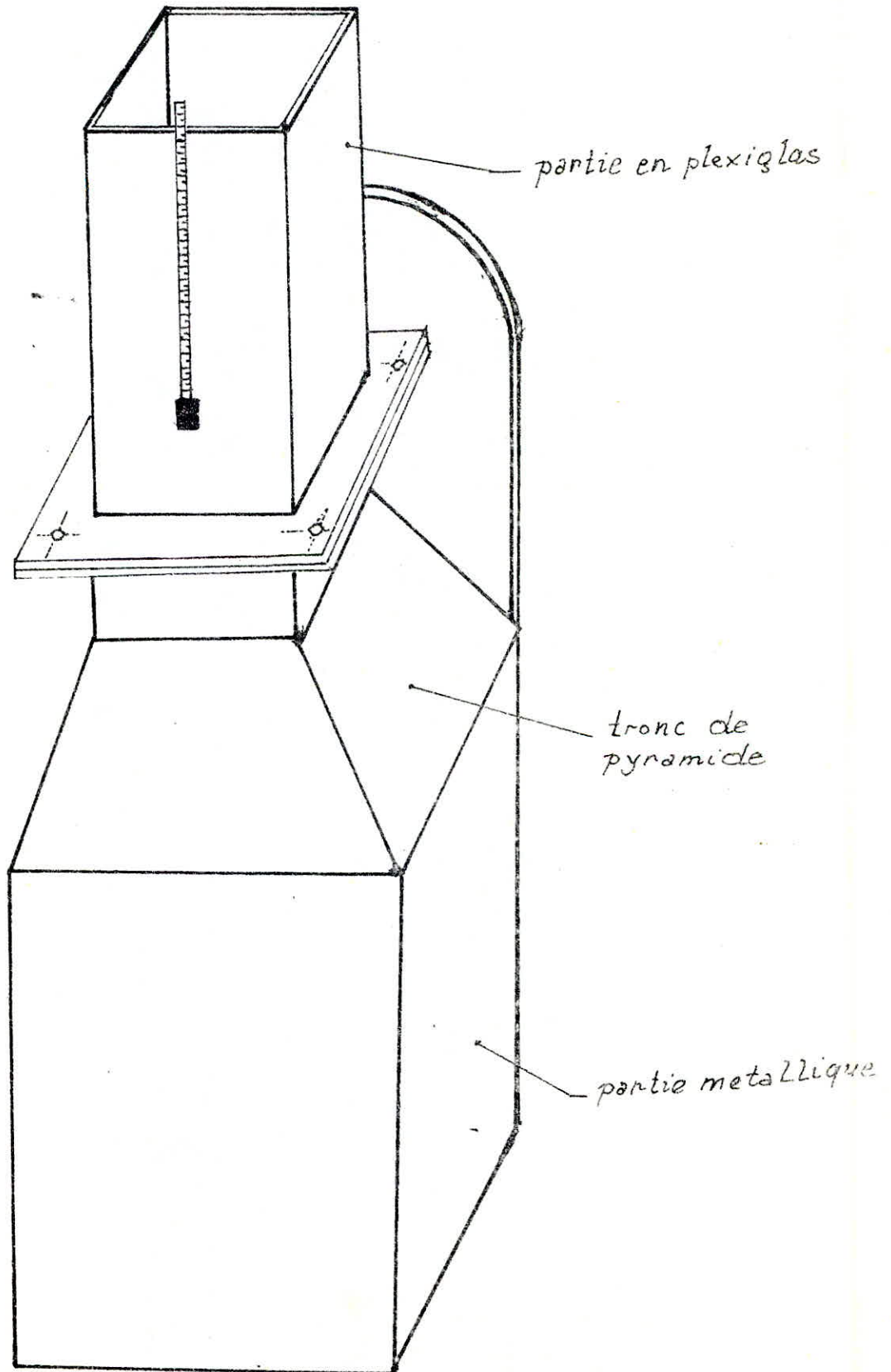
. LES MANOMETRES DIFFERENTIELS.

Ils sont constitués par des piézomètres ordinaires à eau. On a utilisé des tubes en plexiglas pour fabriquer ces piézomètres. Ces tubes sont rattachés par des raccords flexibles (munis de dispositifs de purge) transparents en nylon aux prises des pression sur le débit mètre. Ces prises des pression sont constituées par un orifice beaucoup plus faible que celui du tube du manomètre. Ceci élimine les fluctuations dans les tubes. La lecture sur deux tubes déterminera la chute piézométrique intervenant dans le convergent, en raison de la transformation en énergie cinétique de l'énergie potentielle de pression. C'est en fonction de Δh que nous pouvons contrôler le débit. (fig. b)



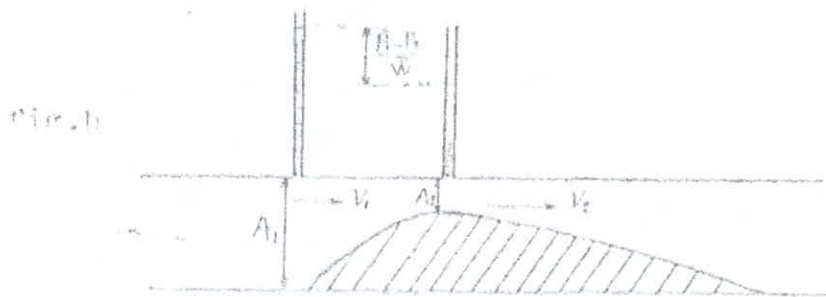
~A~

Dessin d'ensemble de la Jauge



74. CALCUL THEORIQUE, DU DEBIT PASSANT DANS UN TUBE DE DEBIT, METRE A SECTION RETRECIE EN FORME DE SEGMENT.

C'est une tuyauterie convergente, divergent qu'on intercale dans une section A_1 , dont on veut déterminer le débit fig (b).



Entre l'amont et le col de section A_2 nous avons en application de la loi de BERNOULLI qui dit :

$$z_1 + \frac{p_1}{W} + \frac{V_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{W} + \frac{V_2^2}{2g} + \Delta h \quad (1)$$

A_1 : section qui se trouve à l'amont

A_2 : section au droit du retrecissement

V_1 et V_2 : sont les vitesses moyennes correspondant à chacune des sections.

Comme nous avons une très petite différence entre les 2 centres de gravités de (A_1 et A_2), donc nous supposons que les 2 Centres de gravités sont sur le même plan horizontal ($z_1 = z_2$) + en considérant les pertes de charges négligeables et les côtes $z_1 = z_2$ de l'équation (1) on obtient :

$$\frac{p_1}{W} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{p_2}{W} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$\frac{p_1 - p_2}{W} = \frac{V_2^2 - V_1^2}{2g} \quad (2)$$

Dans notre cas le fluide est incompressible d'où l'égalité du débit dans ces deux sections s'écrit par application de l'équation de continuité

$$Q = A_1 V_1 = A_2 V_2$$
$$V_2 = \frac{A_1 V_1}{A_2} \quad \text{et} \quad v_2^2 = v_1^2 \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \quad (3)$$

En application de (3) et (2) on obtient :

$$\frac{P_1 - P_2}{W} = \frac{V_1^2}{2g} \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]$$
$$V_1 = \frac{\sqrt{2g}}{\left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]^{1/2}} \cdot \left[\frac{P_1 - P_2}{W} \right]^{1/2}$$

sachons que $\Delta h = \frac{P_1 - P_2}{W}$ on obtient l'équation du débit suivant :

$$Q = A_1 \left[\frac{2g}{1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2} \right]^{1/2} \cdot \Delta h^{1/2}$$

Posons donc $K = 2g / \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]^{1/2}$

$$\text{D'où:} \quad Q = A_1 V_1 = A_2 V_2 = K \cdot A_1 \sqrt{\Delta h}$$

K : coefficient du débit

Le débitmètre a un diamètre $D = 2 \text{ cm.}$ et $Q = \frac{V}{t}$

Dans notre cas pour chaque débitmètre correspond une différence piézométrique Δh_i ce qui nous permet de tracer une courbe d'étalonnage de la forme :

$$Q = a \Delta h^b \quad \text{avec } a = K A_1$$

$$b = \frac{1}{2} = 0,5 \quad \text{et} \quad \Delta h = h_1 - h_2$$

Si on dispose des valeurs de sections A_1 et A_2 le coefficient a serait terminé mais les résultats seront toujours affectés d'une certaine erreur systématique.

Pour cela on fait un ajustement de puissance pour les débits (Q_i) et les Δh_i respectivement.

Pour cela on passe directement à la linéarisation de cette fonction en application du logarithme Népérien d'où l'on peut écrire.

$$\ln Q = b \ln \Delta h + \ln a \quad \text{avec } a > 0$$

Dans ce cas pour déterminer a et b on utilise la ou les méthodes les plus efficaces qui sont celles des moindres carrés et celle du programme de la Ti.59.

Méthode des moindres carrés :

$$b = \frac{\sum (\ln \Delta h_i)(\ln Q_i) - (\sum \ln \Delta h_i)(\sum \ln Q_i)/n}{\sum (\ln \Delta h_i)^2 - (\sum \ln \Delta h_i)^2/n}$$

$$a = e^{\frac{(\sum \ln Q_i)}{n} - \frac{(b \sum \ln \Delta h_i)}{n}}$$

Donc le coefficient de correction r sera donc :

$$r^2 = \frac{[\sum (\ln \Delta h_i)(\ln Q_i) - (\sum \ln \Delta h_i)(\sum \ln Q_i)]^2}{[\sum (\ln \Delta h_i)^2 - \frac{(\sum \ln \Delta h_i)^2}{n}][\sum (\ln Q_i)^2 - \frac{(\sum \ln Q_i)^2}{n}]}$$

• calcul des coefficients a et b:

A.N:

$$b = \frac{-26,6033 + 19,9979 \cdot 9,3576/6}{75,3599 - (19,9979)^2/6} = 0,52662$$

$$a = e \frac{9,3576}{6} - \frac{0,52662 \cdot 19,9979}{6} = 0,0363407$$

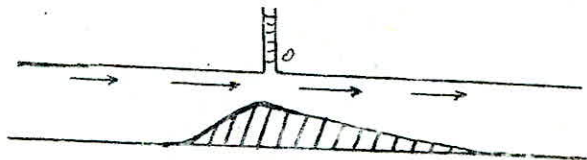
d'où :

$$Q = 0,03634 \Delta h^{0,52662}$$

voir tableau
~1 et 2.~

REMARQUE

Dans le débit mètre à section rétrécie en forme de segment, les filets de courant passant à proximité de la prise de pression ne sont pas déviés de leurs direction primitive et restent rectilignes : ce qui exclue la formation des tourbillons pouvant affecter la valeur de la pression indiquées par le manomètre branché en O sur le tube (fig. b).



fig(b)

Ce qui nous amène à ne prendre qu'une seule prise de pression dans la section rétrécie dans la partie où les filets de courant sont rectilignes et non perturbés.

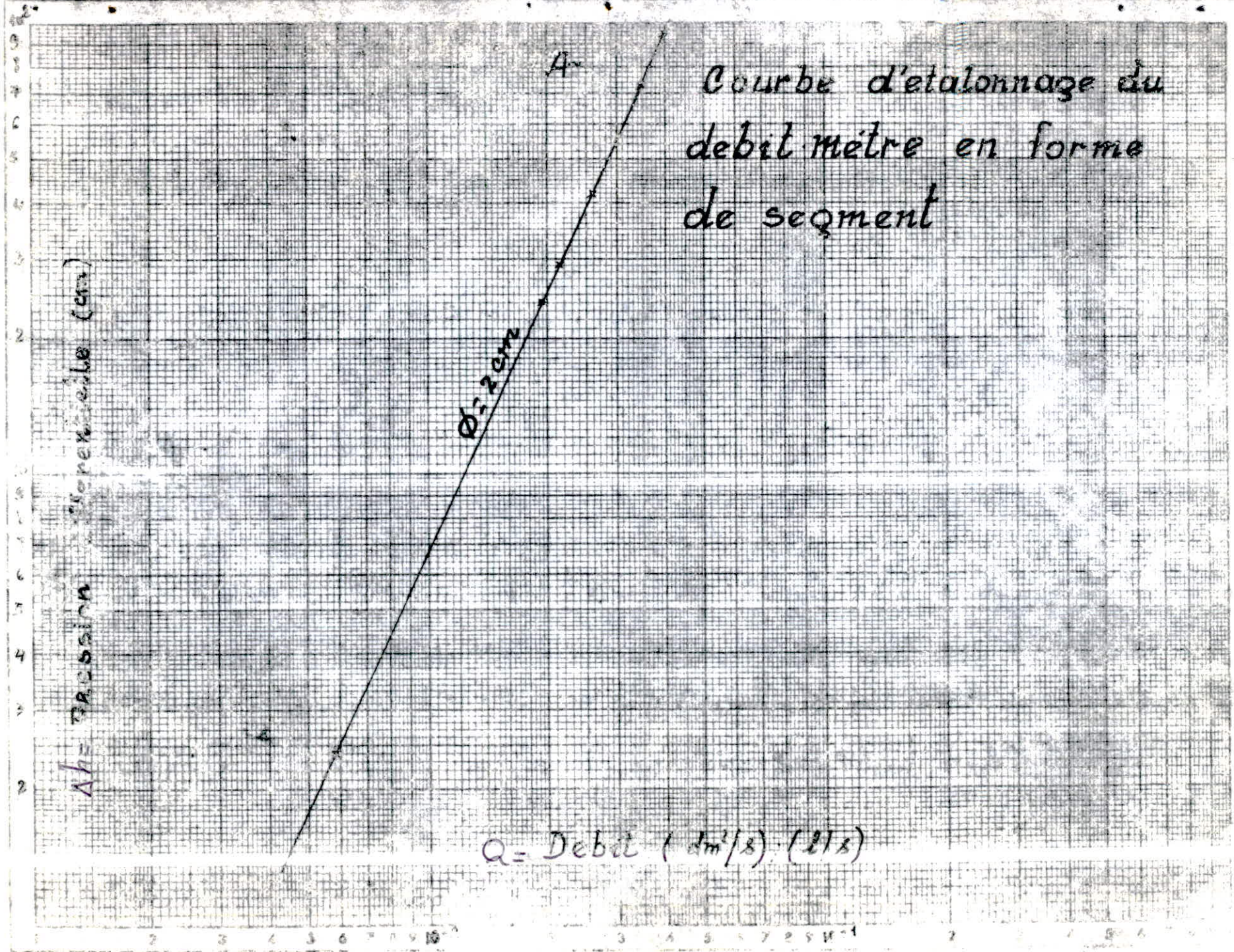
Tableau d'étalonnage du débit mètre à segment

N° Exp	Temps (s)	h_1 (cm)	h_2 (cm)	$\Delta h = h_1 - h_2$	V (l)	débit Q (l/s)
1	482	50,8	48,4	2,4	29,54	0,0592
	495	"	"	"	28,55	0,0577
	515	"	"	"	28,85	0,0560
2	147	57,9	34,4	23,4	28,60	0,1946
	150	"	"	"	28,82	0,1921
	155	"	"	"	29,47	0,1901
3	136	64,1	32,3	28,8	28,94	0,2123
	135	"	"	"	28,67	0,2124
	138	"	"	"	29,18	0,2114
4	110	69,6	27,8	41,8	29,60	0,2600
	118	"	"	"	29,08	0,2596
	115	"	"	"	29,76	0,2583
5	83	86,4	11,8	74,6	29,19	0,3517
	85	"	"	"	29,82	0,3509
	84	"	"	"	29,43	0,3510
6	73	99,4	3,4	96,0	29,30	0,4014
	72	"	"	"	28,92	0,4017
	71	"	"	"	28,90	0,4056

~ 2 ~

Tableau des résultats de mesures

N° EXP	Q _i (l/s)	Q _{im} (l/s)	Ln(Δh _i)	LnQ _{im}	LnQ _{im} · LnΔh _i	(LnΔh _i) ²	(LnQ _{im})
1	0,0592 0,0577 0,0560	0,0576	0,8755	-2,8542	-2,4989	0,7665	8,1465
2	0,1946 0,1921 0,1901	0,1923	3,1527	-6487	-5,1979	9,9395	2,7192
3	0,2128 0,2124 0,2114	0,2122	3,3604	-1,5502	-5,2093	11,2923	2,4035
4	0,2600 0,2596 0,2588	0,2595	3,7329	-1,3490	-5,0857	13,9345	1,8199
5	0,3517 0,3508 0,3510	0,3512	4,3121	-1,0464	-4,5122	18,5942	1,0550
6	0,4074 0,4017 0,4056	0,4029	4,5643	-0,9091	-4,1494	20,8328	0,8265
Σ =			19,9979	-9,3576	-26,6033	75,3599	17,0090



C O N C L U S I O N

Le dépouillement des essais effectués sur le dispositifs de mesures des débits donne, dans un système de coordonnées à division logarithmique, des points parfaitement alignés ayant une inclinaison rigoureusement égal à deux, ce qui montre que ce type de débit mètre donne des résultats précis (c'est à dire dans tous les cas, pour une même pression différentielle on aura le même débit).

Nous attribuons cette haute qualité de ce nouveau débit mètre à l'absence totale de tout élément perturbateur (eau morte, phénomène de décollement, tourbillon) le long de la ligne de courant en contact avec les deux prises de pressions.

voir (courbe ~A~)

CH: II: DESCRIPTION DE L'APPAREILLAGE

I. MODELE REDUIT : Il est composé :

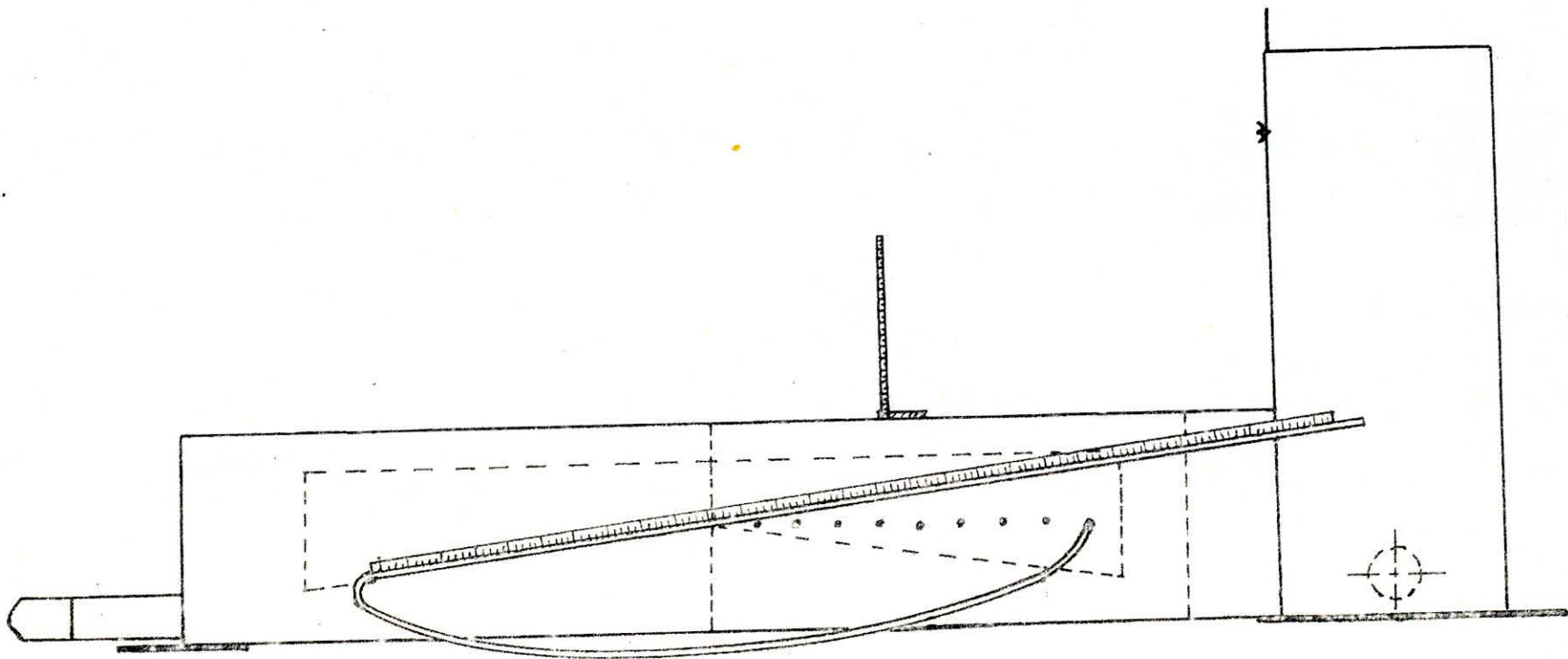
- d'un réservoir d'alimentation muni :

- . D'un tube venant à partir d'un bassin à niveau constant ou d'un débit mètre à segment.
- . D'un orifice triangulaire qui peut être obturé par une vanne coulissante.
- . D'un tranquilisateur
- . D'un manomètre permettant les lectures au 1/10
- . D'un tube à l'aval permettant le changement de régime
- . D'un limnimètre à pointe qui donne les lectures des hauteurs critiques
- . D'un seuil diédrique constitué d'une plaque solide et fixe pour éviter les fuites et le suintement
- . Ce seuil est constitué par l'intersection de 2 tronçons de canal diédrique ayant :
 - . leur plan de symétrie commun en position vertical
 - . leurs angles d'ouverture $\varphi' = \varphi'' = 90^\circ$
 - . Leurs pentes géométriques J'_0 descendante et J_0 ascendante ($J'_0 = J_0$).

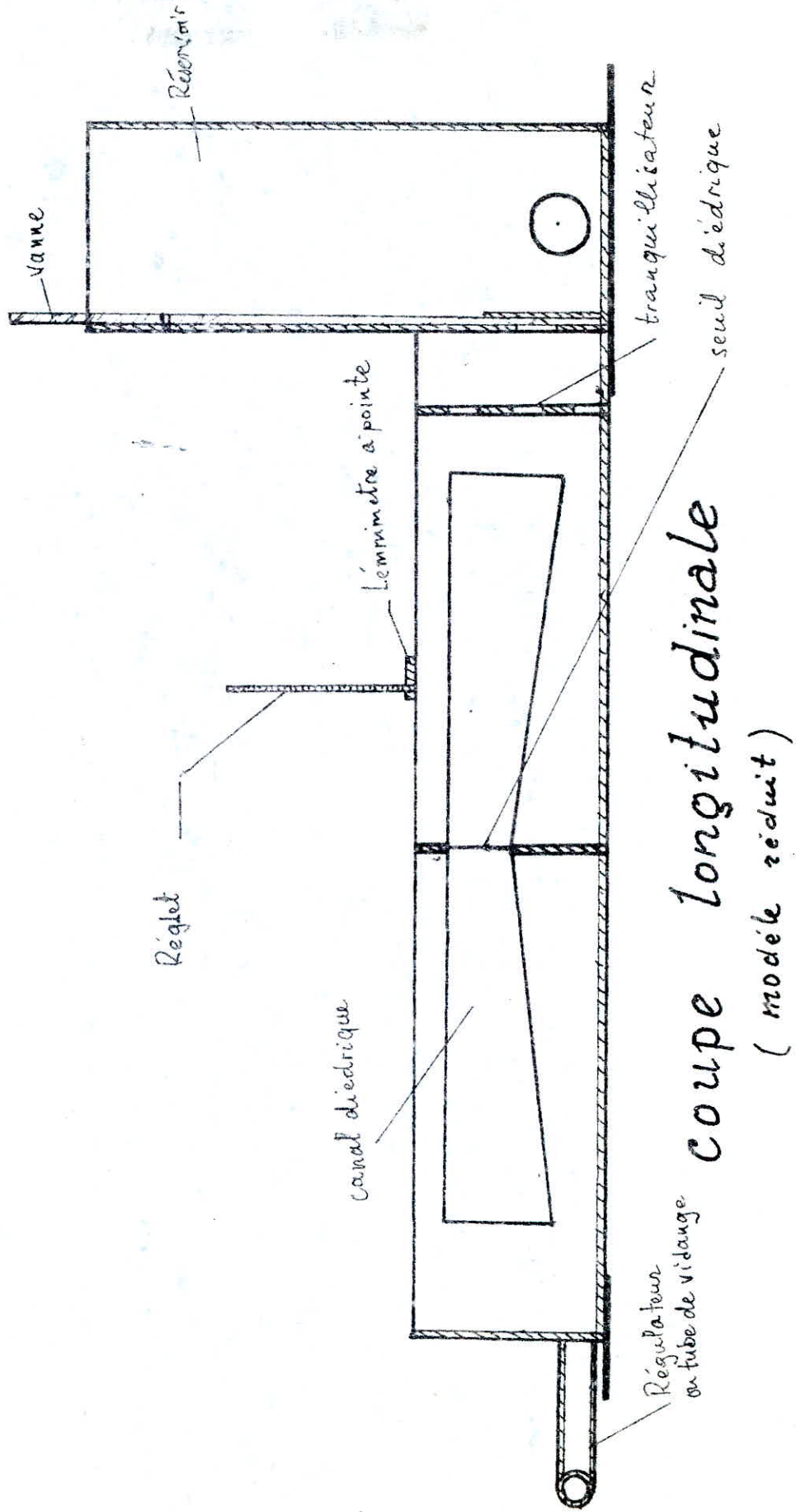
- (Dessins explicatifs (B, D, C)) -

~B~

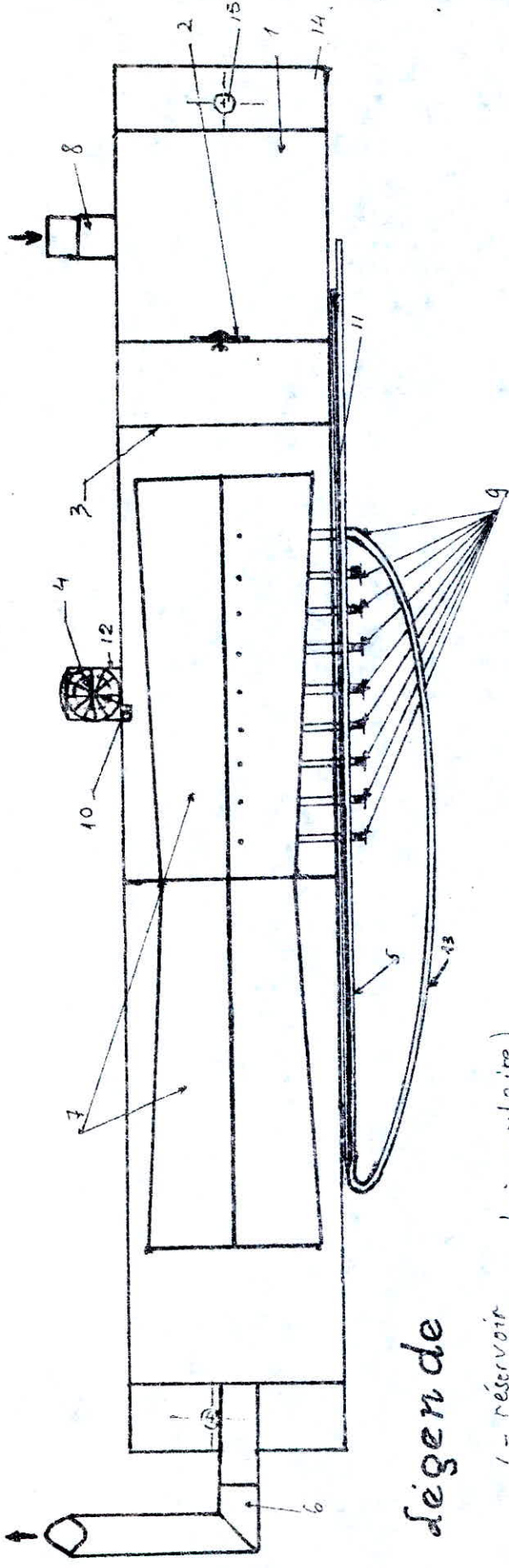
Dessin d'ensemble du Modèle Réduit



~ D ~



Vue de dessus du Modèle Réduit



légende

- 1 - réservoir
- 2 - vanne (forme triangulaire)
- 3 - tranquillisateur
- 4 - densimètre à pointe
- 5 - Micromanomètre
- 6 - tube de vidange
- 7 - canal diélectrique
- 8 - tube d'alimentation
- 9 - prises de pression
- 10 - Reglet
- 11 - Règle graduée
- 12 - bassin communicant
- 13 - tuyau de liaison
- 14 - support
- 15 - perçage pour fixation

II. BASSIN A NIVEAU CONSTANT

Il est à noter que c'est un petit bassin à niveau constant de matières plexiglas d'épaisseur = 2 mm.

- a). Ce bassin a une forme cylindrique de diamètre = 180 mm
 $h = 170$ mm
- b). Intérieurement il y a un cylindre trop plein (de $\varnothing = 90$ mm
 $h = 90$ mm) qui possède la même base (fixation avec collage)
- c). Entre ces 2 derniers cylindres qui sont en position verticale on a fixé horizontalement une plaque qui est perforée ($\varnothing = 20$ mm) pour créer un système de tranquillisateur qui lui évite les turbulences provoqués par le jet d'eau venant du tuyau d'ad-
duction. (voir dessin E)

Le tranquillisateur sert à rendre la surface libre du liquide tranquille.

Principe :

Ce petit bassin réservoir à niveau constant est tout le temps rempli à l'aide d'un tuyau d'aduction qui est relié directement à la vanne qui donne les gros débits qui nous permet pas de régler à volonté.

De ce bassin partent 2 tuyaux :

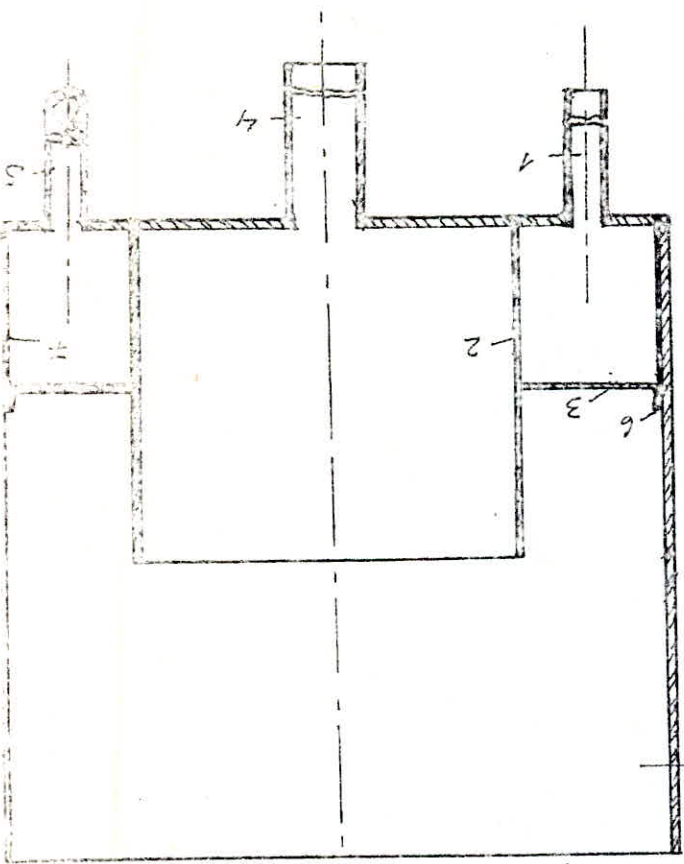
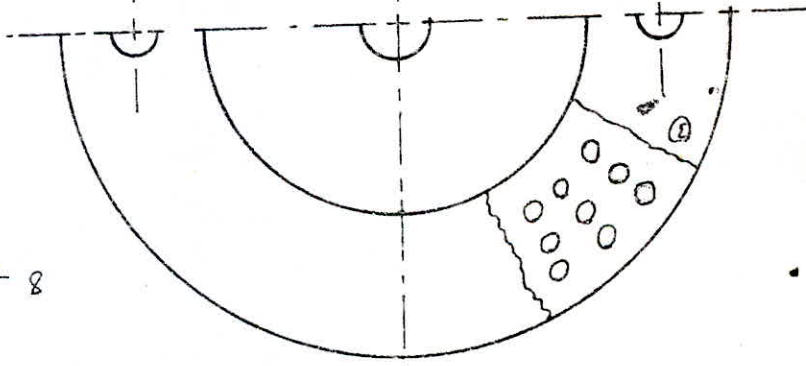
1° tuyaux d'aspiration vers le réservoir du modèle réduit qui possède une vanne coulissante afin d'alimenter le canal dié-
drique et d'assurer le régime permanent et contrôler le débit

2. Tuyau de vidange.

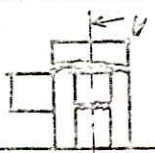
Dessin Du Bassin à Niveau Constant

- 1- tube d'adduction
- 2- trop plein
- 3- étranglement
- 4- tube de vidange
- 5- tube d'aération
- 6- butée
- 7- support
- 8- corps du bassin

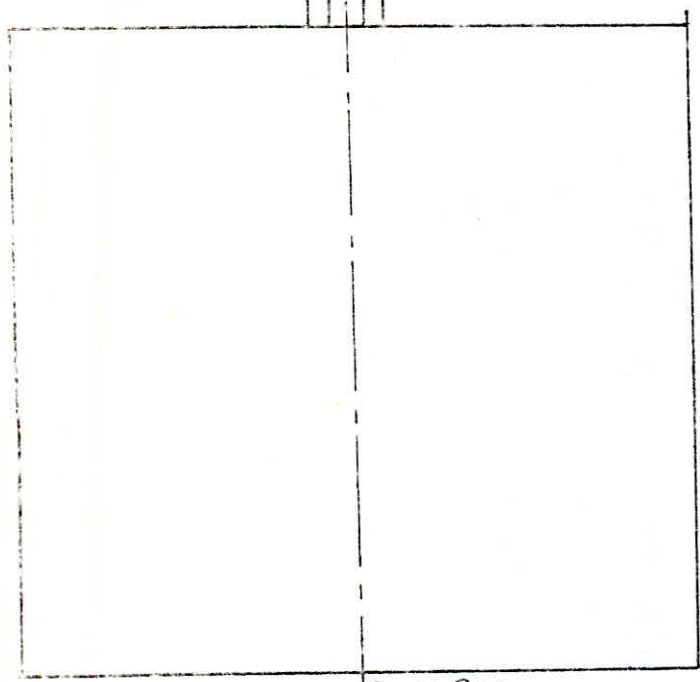
Demi vue de dessus



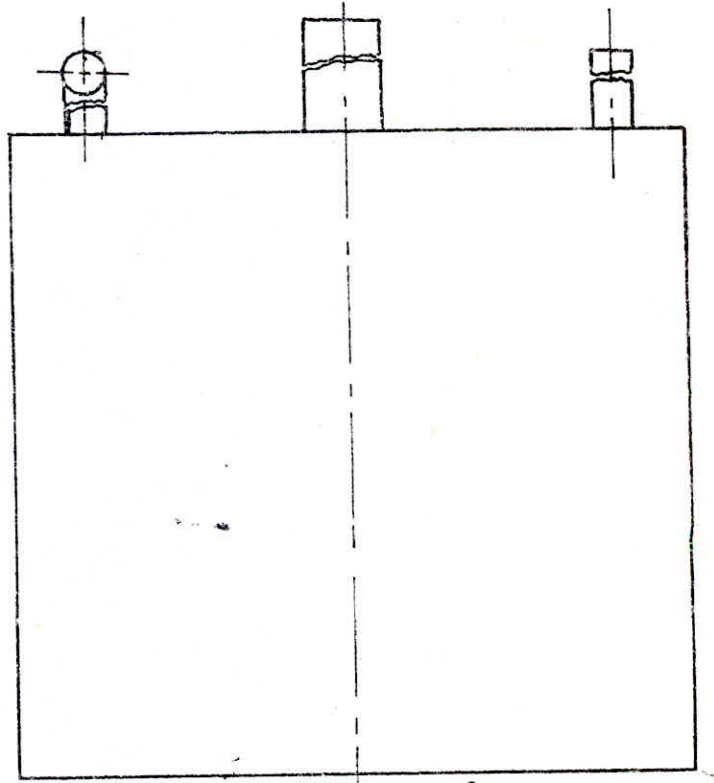
Coupe A-A



Vue de gauche



Vue de face



CH III THEORIE GENERALE DE L'APPAREIL

L'appareil est un seuil constitué par l'intersection de deux tronçons de canal diédrique ayant :

- . Un plan de symétrie commun en position verticale
- . Les angles d'ouvertures φ' et φ'' .
- . Les pentes géométriques J_0' ascendante et J_0 descendante

Si on veut que les arrêts résultant de l'intersection des deux dièdres déterminent un plan vertical et, dans ce plan un triangle isocèle ayant son angle au sommet φ , on a en posant :

$$\theta' = \arctg J_0' \quad \text{et} \quad \theta'' = \arctg J_0$$

$$\operatorname{tg} \frac{\varphi'}{2} = \frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{\cos \theta'} \quad \text{et} \quad \operatorname{tg} \frac{\varphi''}{2} = \frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{\cos \theta''}$$

Le seuil a profil vertical en triangle isocèle droit, ainsi constitué et susceptible de contrôler, dans des conditions précisées plus loin, l'écoulement fluvial à son amont et l'écoulement torrentiel se produisant à son aval.

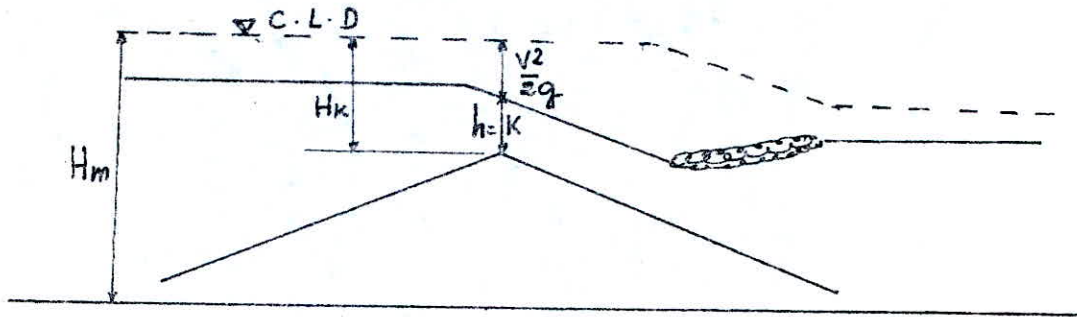
L'écoulement passant par cette section de contrôle est caractérisé par une relation bien déterminée entre le débit Q et les dimensions linéaires (comme la charge, la profondeur, la distance etc....) de la veine liquide.

I. PASSAGE DU COURANT PAR LE DIEDRE ASCENDANT ET LE SEUIL

Un obstacle placé au niveau du tube de vidange provoque des perturbations à l'amont et à l'aval de celui-ci.

En vue de trouver le moyen de classer les dites perturbations, ajoutons à la côte du seuil constitué par l'obstacle (voir profil en long représenté par la figure ci-dessous), la distance verticale est : $H_k = f(Q)$.

Représentant la charge minima (au dessus du seuil) nécessaire à ce que le débit Q puisse franchir celui-ci.



On obtient ainsi une côte limite discriminatoire ayant une importance primordiale du point de vue classement des écoulements passant par l'obstacle.

A. Dans le cas où le plan de charge primitif se trouve au dessus de la C.L.D., le régime du courant reste inchangé par rapport à son état primitif sur toute la longueur de son parcours comprenant le seuil et les tronçons situés à l'amont et à l'aval de celui-ci.

a. Si le régime primitif de l'écoulement a été fluvial, la mise en place de l'obstacle aura pour conséquence, après le rétablissement du régime permanent, un faible exhaussement de la charge et de la surface libre ainsi qu'un ralentissement de la vitesse à l'amont du seuil, mais elle n'aura pour effet pratiquement aucun changement à l'aval de celui-ci.

- b. Si le régime primitif de l'écoulement a été torrentiel, la présence de l'obstacle aura pour conséquence un abaissement de la charge, un exhaussement de la surface libre, et un ralentissement de la vitesse à l'aval du seuil mais elle n'aura pour effet aucun changement à l'amont du seuil.

Dans le cas ci-dessus considéré, où le plan de charge primitif se trouve au dessus de la C.L.D., la section du seuil ne possède pas les caractéristiques bien déterminées d'une section de contrôle. (régime critique au dessus du seuil, changement du régime : fluvial à l'amont, torrentiel à l'aval etc...).

- B. Dans le cas où le plan de charge primitif se trouve au dessous de la C.L.D. la mise en place de l'obstacle aura pour effet un changement de régime soit à l'aval, soit à l'amont du seuil, au dessus duquel le régime sera dans tous les cas critique. La section du seuil possèdera dans tous les cas les caractéristiques d'une section de contrôle (régime critique au dessus du seuil, changement du régime : fluvial à l'amont, torrentiel à l'aval.

- C. Si le régime primitif de l'écoulement a été fluvial, il n'y aura pas de changement de régime à l'amont de l'obstacle, mais l'écoulement deviendra critique au dessus du seuil et torrentiel à l'aval de celui-ci pour redevenir fluvial suite à un ressaut se produisant plus loin à l'aval.

Le plan de charge à l'amont du seuil subira un exhaussement jusqu'à atteindre la C.L.D. en y provoquant simultanément un exhaussement de la surface libre et un ralentissement de la vitesse du courant.

- d. Si le régime de l'écoulement primitif a été torrentiel, il y aura changement de régime en fluvial par un ressaut se produisant à une certaine distance à l'amont du seuil. Le plan de charge à l'amont

du seuil subira un exhaussement jusqu'à atteindre la C.L.D. provoquant simultanément un exhaussement de la surface libre et un ralentissement du courant de la tranche fluviale créé artificiellement entre le ressaut et le seuil, au dessus duquel l'écoulement deviendra critique pour se transformer aussitôt à l'aval en torrentiel et pour conserver ce régime jusqu'à l'extrémité aval de la tranche considérée. Le ressaut transformant le régime de l'écoulement à l'amont du seuil du torrentiel en fluvial se situe là où la côte de la charge primitive est égale à C.L.D. + les p.d.c. dues au ressaut et aux frottements agissant sur le tronçon fluvial artificiellement créé.

Dans ces derniers cas, où le plan de charge primitif se trouve au dessous de la C.L.D., la section du seuil satisfaisant aux conditions d'une véritable section de contrôle est caractérisée par une charge.

$$K=H = HK$$

Au dessus du seuil, correspondant à la charge minimum nécessaire au passage du débit Q au dessus du seuil.

C CARACTERISTIQUES D'UNE SECTION DE CONTROLE

a. Un écoulement en régime torrentiel est caractérisé par une vitesse supérieure à la vitesse de la propagation des perturbations. En conséquence une perturbation des conditions de l'écoulement intervenant à l'aval d'une section choisie ne peut avoir aucune influence sur le phénomène d'écoulement dans cette section.

Pour cette raison tous les écoulements en régime torrentiel sont contrôlés par les conditions à l'amont.

b. Les écoulements en régime tranquille sont caractérisés par une vitesse inférieure à celle de la propagation des perturbations de manière à ce que le phénomène d'écoulement observé dans une section

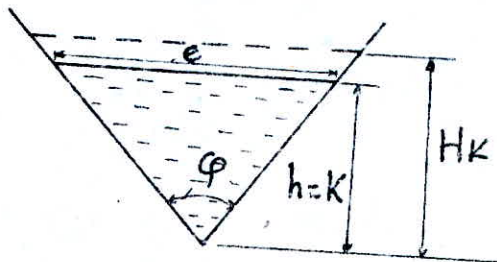
arbitrairement choisie ne reste pas exempte de l'influence des perturbations intervenant à l'aval de la dite section, autrement dit les écoulements en régime tranquille sont contrôlés par les conditions existantes à l'aval pour cette raison les calculs relatifs aux écoulements en régime tranquille sont effectués à partir des éléments existants à l'aval.

En admettant l'égalité des vitesses des lignes de courant passant par la section de contrôle on a le facteur de correction de l'énergie cinétique égal à l'unité et on tire de l'équation de BERNOULLI :

$$H_k = K + \frac{V_k^2}{2g} \quad (1)$$

c, L'objet de la présente étude est limité à l'analyse des écoulements permanents passant dans les conditions fixées, c'est à dire le régime primitif est fluvial et le plan de charge est au dessous de la C.L.D. au dessus d'un obstacle constitué par le seuil triangulaire décrit précédemment.

Dans ce cas particulier la section de contrôle est un triangle isocèles ayant son axe de symétrie vertical, sa pointe en bas, la surface libre de la veine constituant la base de ce triangle.



A_k désignant l'aire de la section mouillée au droit du seuil et V_k la vitesse moyenne dans cette même section on a :

$$A_k = K^2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

$$A_k = K^2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (2)$$

et en vertu de la continuité

$$V_k = \frac{Q}{K^2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} \quad (3)$$

on tire de (1) et (3) l'expression suivante :

$$H_k = K + \frac{Q^2}{2gh^4 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}$$

D. MINIMUM DE LA CHARGE DANS LA SECTION DE CONTROLE :

H_k ne peut avoir sa valeur minimum que si la dérivée partielle

$\frac{\partial H_k}{\partial H} = 0$ en posant le rapport $K/H_k = \alpha$
 d'où la relation $H_k = K + \frac{Q^2}{2gh^4 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}$ (1) devient :

$$H_k = \alpha H_k + \frac{Q^2}{2g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} \cdot \alpha^4 \cdot H_k^4} \quad \text{donc :}$$

$$H_k^5 = \frac{Q^2}{2g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2} \cdot \alpha^4 (1-\alpha)} \quad \text{et} \quad H_k = \sqrt[5]{\frac{Q^2}{2g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}} (\alpha^4 - \alpha)^{-1/5}} \quad (1')$$

En dérivant par rapport à K on obtient :

$$\frac{\partial H_k}{\partial K} = \sqrt[5]{\frac{Q^2}{2g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}} (\alpha^4 - \alpha)^{-6/5} (4\alpha^3 - 5\alpha^4) \left(-\frac{1}{5}\right)$$

$$\frac{\partial H_k}{\partial K} = -\frac{1}{5} \sqrt[5]{\frac{Q^2}{2g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}} \alpha^{-3} \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right)^{-6/5} (4 - 5\alpha)$$

Le minimum de la fonction (1) est conditionné par l'équation :

$$-\frac{1}{5} \sqrt[5]{\frac{Q^2}{2g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}} \alpha^{-3} \left(\frac{1}{\alpha} - 1\right)^{-6/5} (4 - 5\alpha) = 0$$

le premier facteur $-\frac{1}{5} \sqrt{\frac{Q^2}{2g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}}$, indépendant de K,

ne peut pas être nul, la conditions du minimum de la fonction (1) se réduit donc à :

$$\mathfrak{B}^{-3} \left(\frac{1}{\mathfrak{B}} - 1 \right)^{-6/5} (4 - 5 \mathfrak{B}) = 0 \quad (2)$$

les racines de l'équation (2) sont :

$$\mathfrak{B}' = 0 \quad , \quad \mathfrak{B}'' = 1 \quad , \quad \mathfrak{B}''' = 4/5$$

Il est évident que les deux premières racines ne peuvent pas donner la solution du problème car en présence d'une vitesse moyenne

$0 < v < \infty$ le rapport $\mathfrak{B} = K/H_K$ ne peut être ni 0 ni 1.

Il est par contre confirmé par l'expérience que la troisième racine est à retenir et que le minimum de la fonction (1) correspond à la valeur suivante :

$$\mathfrak{B} = \frac{4}{5}$$

E : profondeur et vitesse critiques :

En substituant cette valeur de \mathfrak{B} en (1') il vient :

$$H_K = \frac{5}{4} \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}} \quad (2')$$

et la profondeur dans la section de contrôle est :

$$K = \mathfrak{B} \cdot H_K = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}} \quad (3)$$

on a aussi :

$$H = h + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad \text{et} \quad \frac{dH}{dh} = 0$$

$$1 - \frac{Q^2}{gA^3} \frac{dA}{dh} = 0 \quad \text{or} \quad dA = e dh \Rightarrow \frac{Q^2 \cdot e}{gA^3} = 1 \quad - 20$$

condition de criticité :

$$\frac{Q^2 \cdot e}{g \cdot A^3} = 1 = \frac{Q^2 \cdot 2h \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{g h^6 \operatorname{tg}^3 \frac{\varphi}{2}} \Rightarrow h = K = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}}$$

$$H_K = K + \frac{A_K}{2eK} = K + \frac{K^2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{4K \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} = \frac{5}{4} K$$

en inversant on tire de (3) :

$$Q^2 = \frac{g}{2} K^5 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}$$

d'où :

$$Q = \sqrt{\frac{1}{2} g} \cdot K^{5/2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = 2,21 \cdot K^{2,5} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (3')$$

ou encore :

$$Q = \sqrt{\frac{1}{2} g} (0,8 H_K)^{5/2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} = 1,27 H_K^{2,5} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (2'')$$

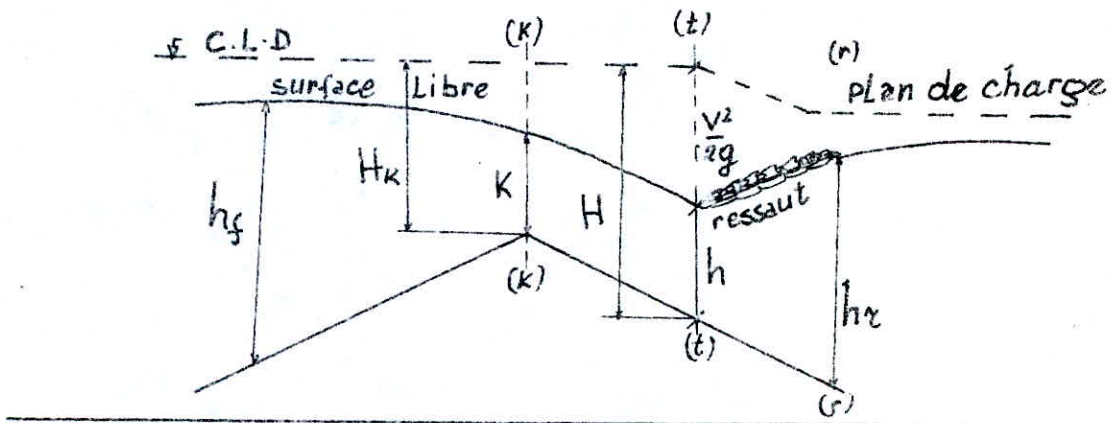
La vitesse moyenne dans la section de contrôle est :

$$V_K = \frac{Q}{A_K} = \frac{\sqrt{\frac{1}{2} g} \cdot K^{5/2} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}{K^2 \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} = \sqrt{\frac{g}{2} K} = 1,98 \sqrt{H_K} \quad (4)$$

Dans le cas où la section de contrôle est suivie par un déversement libre nous tombons dans le cas des déversoirs triangulaires.

II ETUDE DE L'ÉCOULEMENT DANS LE CANAL DIÉDRIQUE SUCCEDANT A LA SECTION DE CONTRÔLE.

A. Examinons le comportement du courant qui, après avoir franchi le seuil, continue son chemin dans le canal diédrique à l'aval de celui-ci. Ce canal ayant une pente géométrique J_0 conserve son profil en travers (suivant un plan vertical perpendiculaire au plan de symétrie du canal) constant sur toute sa longueur. Le régime de l'écoulement, critique dans la section de contrôle, devient dans ce canal aussitôt torrentiel et continue en accélérant plus ou moins rapidement suivant la pente géométrique J_0 .



En raison de la courte distance et de la rugosité très faible des parois du dièdre on admet que les pertes de charge linéaire intervenant sur le tronçon entre la section de contrôle et la section (t) arbitrairement choisie sont négligeables ; c'est à dire que le plan de charge reste horizontal sur toute la longueur de cette portion de tronçon. Sa distance verticale par rapport au fond du canal dans la section (t), située à une distance L à l'aval de la section (k) est $H = H_k + J_0 L$.

En designant par h la profondeur dans la section (t) la veine liquide passant par cette dernière est caractérisée par l'équation :

$$H = h + \frac{Q^2}{2gh^4 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}$$

en tenant compte de (3) il vient que :

$$H = h + \frac{K^5}{4h^4} \quad (5)$$

en éliminant Q , g et $\operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$ entre cette dernière équation et

$$h = k = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{g \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}}$$

on tire :

$$H = \frac{K^5}{4h^4} \quad (6)$$

en introduisant les par : dim : on obtient :

$$H_x = \frac{H}{K} \quad (7) \quad \text{et} \quad h_x = \frac{h}{K} \quad (8)$$

on obtient de (6) l'équation suivante :

$$H_x = h_x + \frac{1}{4h_x^4} \quad (9)$$

La fonction (9) représentée graphiquement dans le système de coordonnées logarithmique de la figure ou , montre que la valeur $H_x = 1,25$ conjuguée de $H_x = 1$, qui représente le minimum de la dite fonction, c'est à dire :

$$H_{x\min} = 1,25 \quad \text{d'où l'on conclut que : } H_{\min} = H_k$$

Dans la section (t) on a :

$$H > H_k \quad \text{et} \quad h < K \Rightarrow v > v_k$$

Ainsi il est démontré que le régime de l'écoulement, le long du tronçon (k)-(t) est torrentiel. Pour cette raison les symboles des grandeurs caractéristiques de la section initiale du ressort seront distinguées par l'indice "t".

2 INDEPENDANCE DE L'ÉCOULEMENT VIS À VIS DU PLAN DE CHARGE AVAL

D'une manière générale la vitesse de propagation des perturbations possibles dans un canal étant égal à V_k aucune des perturbations se manifestant sur le tronçon situé à l'aval de l'ouvrage ne peut influencer les caractéristiques (niveau de surface, vitesse etc...) du courant à l'amont de celui-ci tant qu'un tronçon en régime torrentiel rest intercalé entre les tronçons de cours d'eau à l'amont et à l'aval de l'ouvrage. Dans de telles conditions le débit qui passe l'ouvrage ne dépend que du plan de charge à l'amont de celui-ci, la plan de charge à l'aval de celui-ci n'ayant aucune influence sur le débit qui est parfaitement déterminé par le seul plan de charge à l'amont. Cette propriété commune de tous les débits mètres à libre déversement où à ressaut est appelée : SEMIMODULAIRE.

Selon cette terminologie le débit passant par un ouvrage modulaire n'est nullement influencé par le plan de charge du courant qui manifeste, soit à l'amont, soit à l'aval de celui-ci et ne dépend que des caractéristiques de l'ouvrage même : par exemple le siphon modulaire, l'orifice modulaire etc...) par contre le débit passant par un ouvrage semimodulaire est fonction non seulement des caractéristiques de ce dernier, mais aussi de la charge à l'amont.

III ÉTUDE DE L'ÉCOULEMENT DANS LA ZONE DE TRANSITION CONSECUTIVE AU TRONÇON TORRENTIEL CI DESSUS ANALYSE ET CONSTITUANT LA LIAISON AVEC LE COURANT A L'AVAL DE L'OUVRAGE.

A. INFLUENCE DU PROFIL TERMINAL.

Considérons l'intersection fictive du plan d'eau à l'aval de

l'ouvrage par la surface libre du courant en régime torrentiel se produisant à l'aval de la section de contrôle.

Trois sont à envisager :

1. Cette intersection fictive est située à l'aval de l'extrémité du canal et le raccordement se fait en réalité par une chute.
2. Elle se trouve à l'amont de la dite extrémité, le raccordement réel se fait alors par l'intermédiaire d'un ressaut.
3. Cas limite ; l'intersection fictive se situe au droit de l'extrémité du dièdre, le raccordement réel se confond alors avec le raccordement fictif.

B. LE RESSAUT EN CANAL DIÉDRIQUE.

Nous nous plaçons dans le deuxième cas dans lequel le changement de régime se fait par un ressaut hydraulique régi par la loi de l'équilibre hydrodynamique. Cet équilibre s'exprime par la théorie des quantités de mouvements. En désignant par lt la pression moyenne, par vt la vitesse moyenne et At l'aire de la section mouillée au droit du début du ressaut et par Pr , Vr et Ar les éléments analogues valables au droit de la fin du ressaut on a en admettant que le facteur de correction des quantités de mouvement est égal à l'unité.

$$Pt At - Pr Ar = \rho Q (Vr - vt)$$

En désignant par ht la profondeur initiale et par hr la profondeur finale du ressaut, on tire de cette dernière équation :

$$\bar{\omega} \frac{ht^3}{3} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \frac{\bar{\omega}}{g} \cdot \frac{Q^2}{ht^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}} = \bar{\omega} \frac{hr^3}{3} \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2} + \frac{\bar{\omega}}{g} \cdot \frac{Q^2}{hr^2 \cdot \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}}$$

en divisant par $\bar{\omega} \operatorname{tg} \frac{\varphi}{2}$ et en éliminant Q entre cette dernière équation et $h = K$ on obtient :

$$\frac{ht^3}{3} + \frac{K^5}{2ht^2} = \frac{hr^3}{3} + \frac{K^5}{2hr^2} \quad (10)$$

en posant :

$$h_{rx} = \frac{h_r}{k} \quad (11)$$

et en divisant (10) par $k^3/6$ on peut écrire :

$$2 h_{tx}^3 + 3 h_{tx}^{-2} = Z = 2 h_{rx}^3 + 3 h_{rx}^{-2} \quad (12)$$

Il est bien évident que la fonction :

(12a) $Z = 2 h_{rx}^3 + 3 h_{rx}^{-2}$ est identique à la fonction

(12b) $Z = 2 h_{tx}^3 + 3 h_{tx}^{-2}$

En les représentant sur un système de coordonnées à division logarithmique voir (abaque 19)

On peut constater qu'à chaque valeur de Z correspondent deux valeurs différentes de ht et hr dont l'une est inférieure à 1 et l'autre est supérieure à 1

En régime torrentiel : $h = ht < k$ donc : $h_{tx} < 1$

En régime fluvial : $h = hr > k$ donc : $h_{rx} > 1$

Pour cette raison il est logique de l'admettre avec la tranche croissante de la courbe, représentant (12) avec ses ordonnées inférieures à 1 correspond aux valeurs de h_{tx} tandis que la tranche croissante avec ses ordonnées supérieures à 1 correspond aux valeurs de h_{rx} .

Cette hypothèse est par ailleurs bien confirmée par l'expérience, montrant que la valeur

$$ht = h_{tx} \cdot k$$

donne effectivement la profondeur dans la section initiale du ressaut et que la valeur :

$$hr = h_{rx} \cdot k$$

donne effectivement la profondeur dans la section finale du ressaut engendré par une charge :

$$H = H_x \cdot k$$

C. La perte de charge due au ressaut :

$$\Delta H = h_t - h_r + \frac{V_t^2 - V_r^2}{2g} \quad (13)$$

En vertu de la continuité et en application de $V_k = \frac{Q}{k^2 \cdot \text{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}$ l'équation (13) s'écrit :

$$\Delta H = h_t - h_r + \frac{Q^2}{2g \text{tg}^2 \frac{\varphi}{2}} \left(\frac{1}{h_t^4} - \frac{1}{h_r^4} \right) \quad (14)$$

En introduisant le paramètre adimensionnel de la perte de charge due au ressaut :

$$\Delta H_x = \frac{\Delta H}{K}$$

et en tenant compte de $h=k \cdot \sqrt[5]{\frac{2Q}{g \text{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}}$ après division par k on obtient :

$$\Delta H_x = h_{tx} - h_{rx} + \frac{1}{4} (h_{tx}^{-4} - h_{rx}^{-4}) \quad (15)$$

DETERMINATION COMPLETE DU PROBLEME ET SOLUTION GRAPHIQUE.

Dans notre équation (15) le paramètre ΔH_x apparait comme une fonction de deux variables : h_{tx} et h_{rx} mais en réalité h_{rx} n'est pas indépendant de h_{tx} , la valeur de ce dernier définissant la seule valeur y conjuguée du premier.

En conclusion on peut énoncer que ΔH_x est bien déterminé par la seule valeur de h_{tx} . Ceci est valable aussi pour les autres para dimensionnels comme H_x et h_{rx} et de même pour les paramètres composés.

$$\Phi = 1000 \left(1 - \frac{\Delta H_x}{H_x - 1,25} \right) \quad (16)$$

$$\Gamma = \frac{H_x - \Delta H_x - 1,25}{htx} \quad (17)$$

$$\Omega = \frac{htx}{H_x - 1,25} \quad (18)$$

Chacun des susdits paramètres est représenté en fonction de htx dans le système de coordonnées à division logarithmique de l'abaque 19a. Il suffit de connaître la valeur d'un seul pour en tirer, par lecture directe dans l'abaque, la valeur de chacun des autres.

Si le débit Q est connu, la valeur de la profondeur critique est déterminée par l'équation :

$$h = K = \sqrt[5]{\frac{2 Q^2}{g t g^2 \frac{\Phi}{2}}} \quad \text{et :}$$

si l'un des 4 éléments linéaires : H , H_t , h_r ou ΔH est donné, alors tous les autres sont déterminés par les équations suivantes :

$$\begin{aligned} H &= Hx.k & ht &= htx.k \\ h_r &= hrx.k & \Delta H &= \Delta Hx.k \end{aligned}$$

Ceci revient à dire que le phénomène du ressaut hydraulique en canal diédrique est bien déterminé si le débit Q et l'un des éléments H , ht , h_r ou ΔH sont connus.

Le représentation graphique dans le même système de coordonnées permet la détermination rapide de la profondeur critique k , grâce à la division logarithmique du système des coordonnées toutes les opérations à effectuer en application des formules H , ht , h_r et ΔH peuvent être exécutées par simple superposition ou retranchement des longueurs figuratives.

Par exemple si pour un débit Q connu, la perte de charge ΔH est fixée à priori, on lit la valeur k de la profondeur critique dans l'abaque.

La longueur figurative de $\Delta H_x = \Delta H/K$ est obtenue par retranchement graphique, on repère dans l'abaque les valeurs y correspondantes de H , ht , hr et on obtient par addition graphique les longueurs figuratives de H , h , hr .

D POSITION DU PROFIL INITIAL DU RESSAUT .

En admettant encore que les pertes de charges linéaires soient infiniment petites, la position du profil initial du ressaut est déterminée par le point d'intersection de la ligne du fond et de l'horizontale situées à une profondeur H , au dessous du plan des charges totales à l'amont du seuil. Pour un même débit la position de ce point varie en fonction de l'accroissement de la charge $H_m - H$ occasionnée par le seuil. Au fur et à mesure que l'on fait monter le niveau du liquide en écoulement à l'aval de l'ouvrage, le décroissement de la différence $H_m - H$ entraîne un déplacement du début du ressaut vers la section de contrôle et par voie de conséquence un raccourcissement du tronçon de courant en régime torrentiel assurant la semimodularité du fonctionnement de l'appareil.

Théoriquement la longueur de ce tronçon ne se réduit à zéro qu'au moment où le niveau aval croissant atteint le niveau amont soit lorsque la différence de charge $H_m - H$ devient égale à zéro.

Ceci signifierait que les perturbations se manifestant à l'aval de l'ouvrage n'auraient aucune influence sur l'écoulement de l'eau à l'amont de celui-ci, tant que ce plan de charge à l'aval de l'ouvrage n'atteint pas un niveau égal à celui du plan de charge amont.

Autrement dit qu'il suffirait que le plan de charge coïncide sur toute la longueur de l'ouvrage avec la C.L.D., assurant que le régime devient critique au dessus du seuil, la longueur du tronçon en régime torrentiel et les dimensions du ressaut consécutif se réduisant à l'infinitésimal. Dans cette hypothèse la limite de la semimodularité correspond à :

$$\Delta H_x = 0, \quad H_x = 1,25, \quad h_{tx} = 1, \quad h_{rx} = 1$$

L'expérience montre que la réalité est quand même un peu moins propice. Les pertes de charges autres que celle due au ressaut, bien

que faibles, ne sont tout de même pas entièrement nulles. Ainsi la valeur du paramètre de la perte de charge correspondant à la limite de la semimodularité est dans tous les cas :

$$\Delta H_x = 0, H_x = 1,25, h_{tx} = 1 \text{ et } h_{rx} = 1$$

L'expérience montre que la réalité est quant même un peu moins favorable. Les pertes de charges autres que celle due au ressaut, bien que faibles, ne sont tout de même pas entièrement nulles. Ainsi la valeur du paramètre de la perte de charge correspondant à la limite de la semimodularité est dans tous les cas :

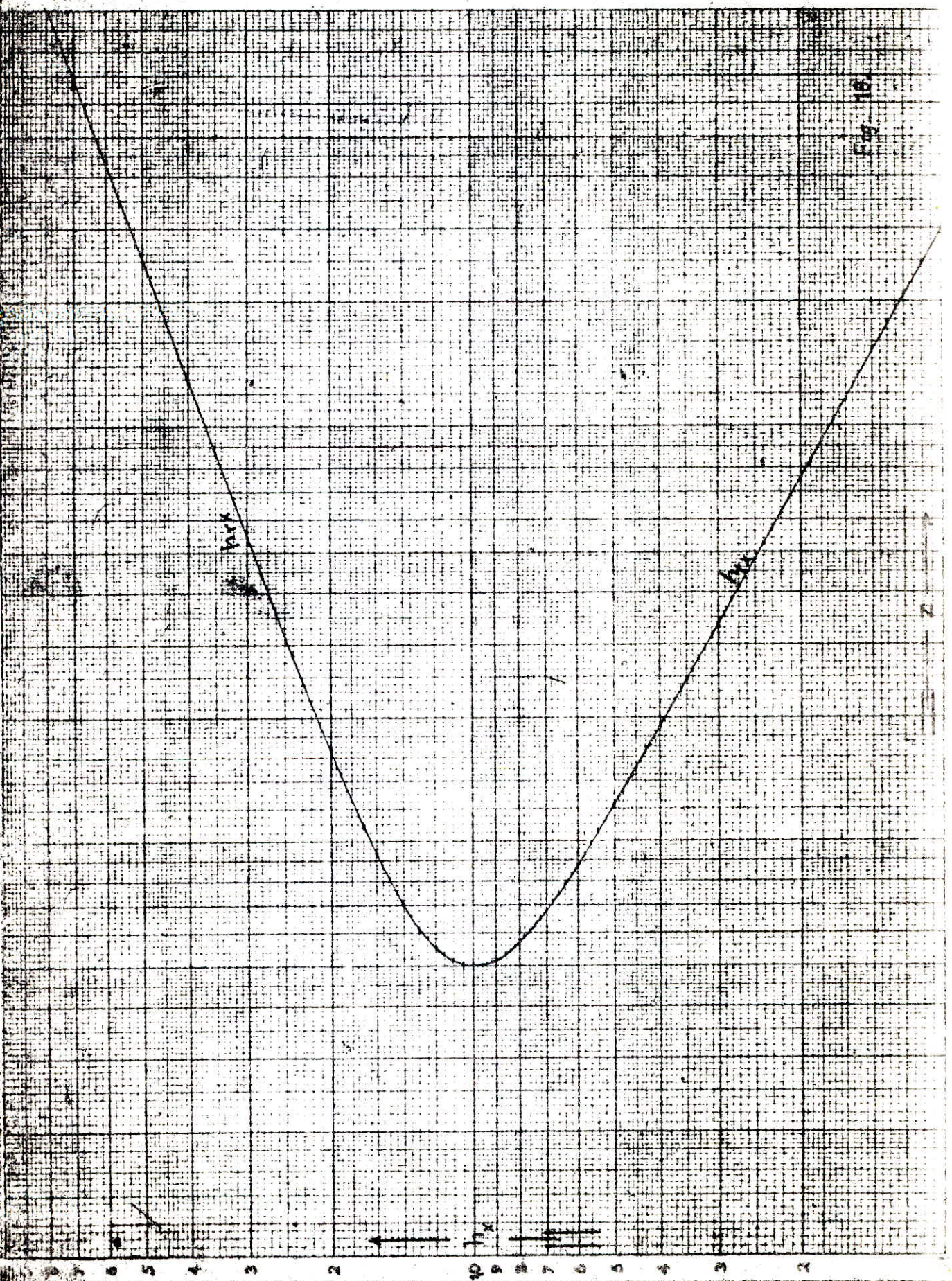
$$\Delta H_x \text{ lim} > 0$$

La limite de la semimodularité, pour le même seuil diédrique est en réalité toujours conditionnée par les mêmes valeurs limites.

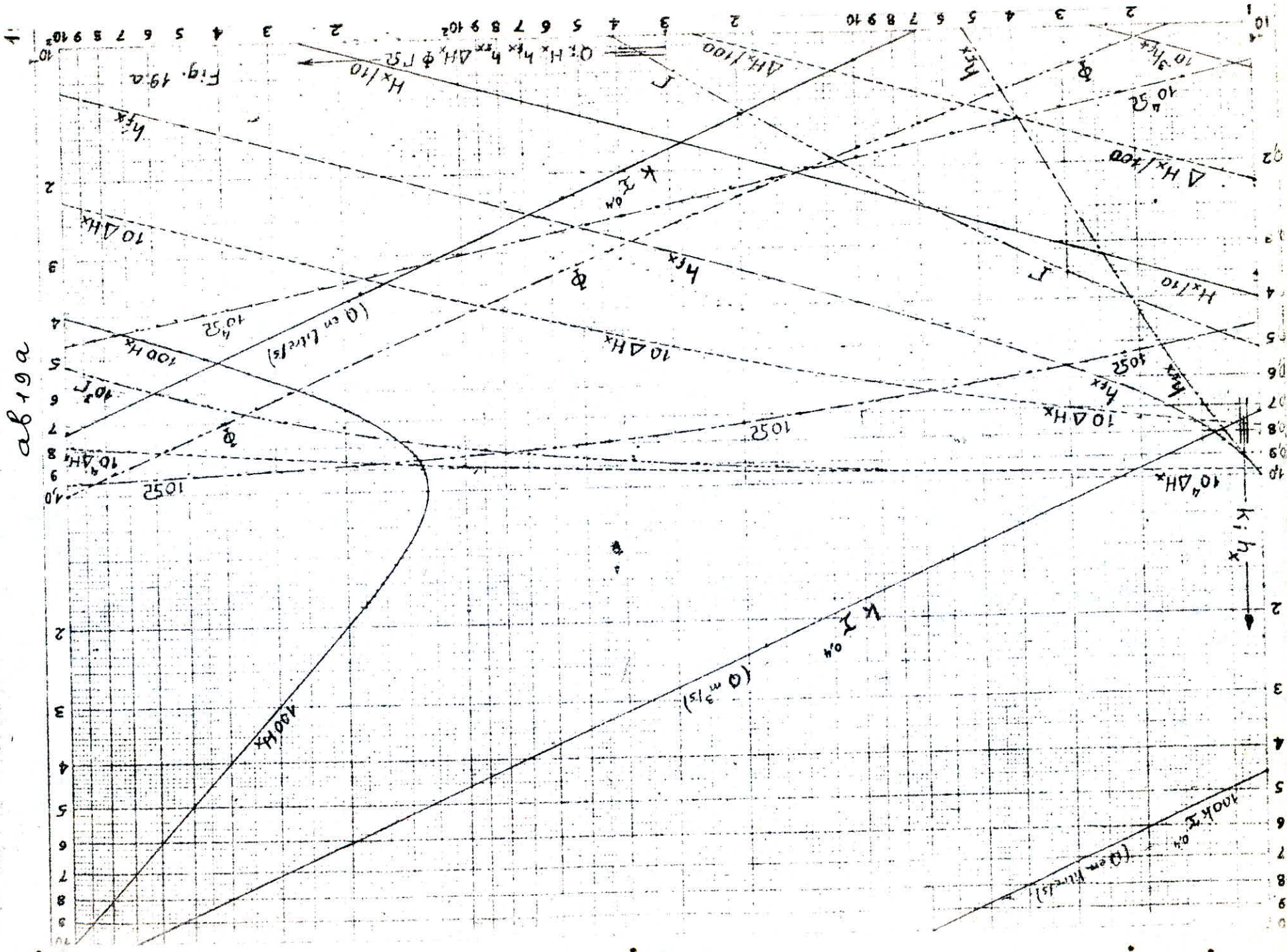
$h_{tx} \text{ lim.}$, $h_{rx} \text{ lim.}$, $H_x \text{ lim.}$ et $\Delta H_x \text{ lim.}$ quelque soit la valeur du débit Q franchissant le seuil. Ainsi on peut énoncer que pour tout appareil de ce type ayant les angles φ' , φ'' et les pentes géométriques J'_0 et J_0 identiques on a donc :

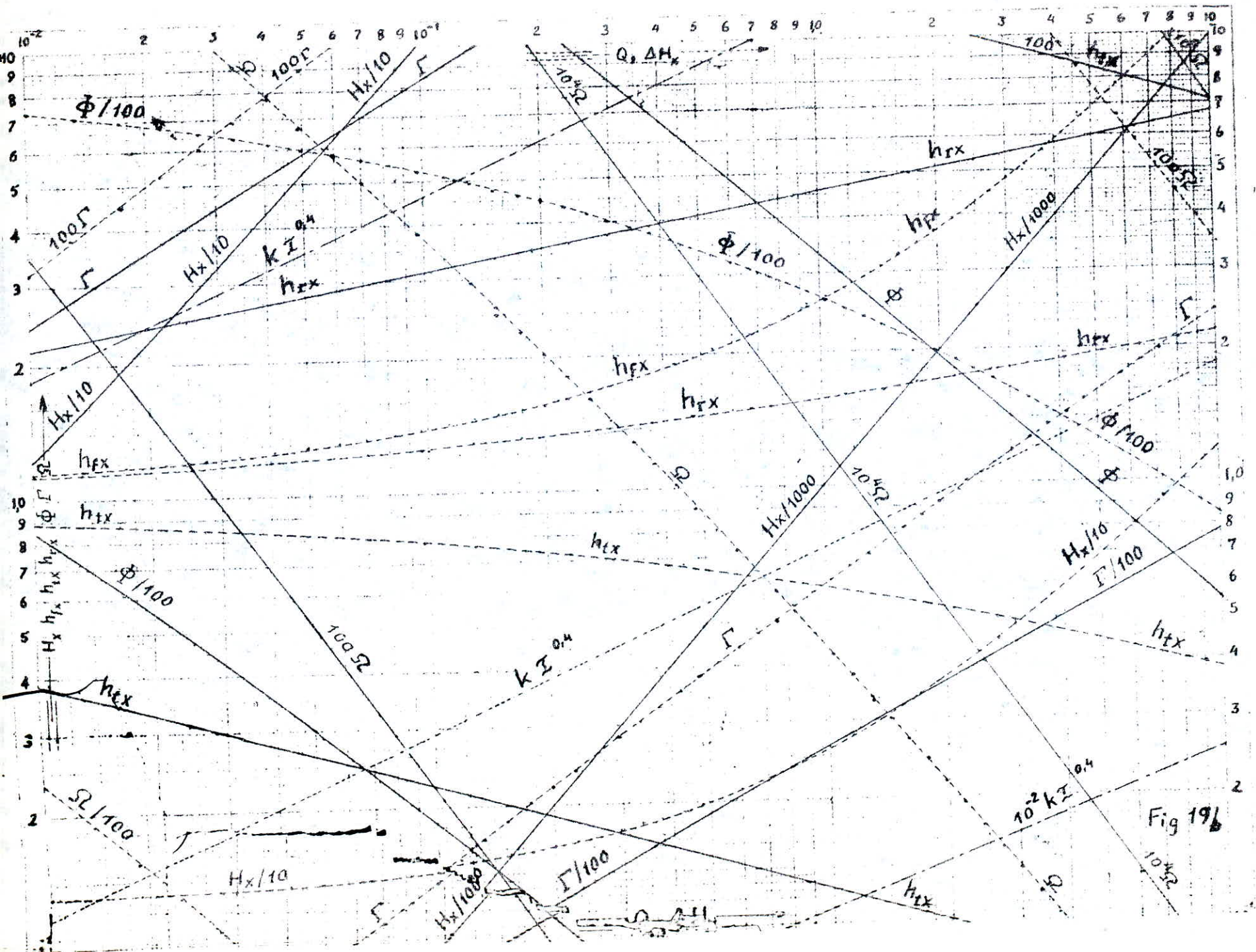
$$h_{tx} \text{ lim} = \text{cte}, h_{rx} \text{ lim} = \text{cte}, H_x \text{ lim} = \text{cte}, \\ \Delta H_x \text{ lim} = \text{cte}.$$

Donc l'écoulement passant par le seuil restant toujours semblable à soi même quelque soit le débit passant en régime critique par la section de contrôle.



ab 19a





-33-
 28106

c. Avantages de l'appareil conçu.

Ce fait est très important car en lui réside tout l'intérêt de l'appareil : il sera toujours possible de construire sur le principe du canal triangulaire un appareil permettant, avec la même précision, la mesure de débits allant de 2 cl/s au débit maximum que l'on se sera fixé.

Au contraire pour effectuer avec la même précision la mesure des débits compris dans la même précision la mesure des débits compris dans la gamme avec un autre débit-mètre on sera amené à utiliser une série d'appareils.

En effet le rapport entre les deux mesures extrêmes que peut effectuer un même appareil est théoriquement infini pour le canal triangulaire alors qu'il se situe aux environs de 100 pour les appareils d'un autre type.

I-INTRODUCTION :

Pour l'étude de projet d'un ouvrage, on commence tout d'abord par préciser l'ordre de grandeur de ses dimensions en se basant sur celles des ouvrages existants et notamment en tenant compte de l'application à l'écoulement considéré des formules théoriques ou empiriques. Dont les principales sont étudiées dans le présent traité.

En hydraulique et dans d'autres branches de la mécanique des fluides il y a eu un développement considérable qui constitue le principe des essais sur modèles réduits.

Il est à noter que ces modèles permettent d'effectuer aisément de nombreuses expériences aux laboratoires et avec une précision importante.

Ces expériences peuvent être répétées en cas de nécessité en faisant varier dans tel ou tel sens ainsi que les paramètres du problème (systématiquement avec les différents débits, différentes profondeurs d'eau, différentes pressions et de différentes formes de l'ouvrage etc...).

Donc par conséquent les résultats obtenus sur le modèle doivent être transposés dans l'écoulement naturel en vraie grandeur (qu'on appelle le prototype).

Il est évident que si le modèle est géométriquement semblable au prototype, les dimensions linéaires homologues du modèle et du prototype étant dans le rapport λ (échelle du modèle),

On a dans ce modèle les caractéristiques de l'écoulement (vitesses, débits, pression etc...) qui sont réduits par rapport à celle du prototype suivant les différents rapports ($\lambda_t, \lambda_v, \lambda_q, \lambda_p$, etc...).

Si ces rapports ne changent pas après avoir modifié les conditions d'écoulement (débit, pression, tirant d'eau etc...)

les rapport doivent être connus en fonction de l'échelle λ . Si on constate que ces conditions sont réalisées on remarque que dans le modèle il y a un écoulement semblable à l'écoulement réel dans le prototype et finalement les résultats obtenus sur le modèle peuvent être transposable dans la réalité (sur prototype).

Il est pris en considération que la réalisation de ces conditions résulte de l'application des lois de la similitude.

REMARQUE

La théorie mathématique et les données expérimentales ont fourni des solutions pratiques à plusieurs problèmes d'hydraulique. A l'heure actuelle, on ne conçoit et on ne construit de structures hydrauliques importantes qu'après avoir fait des études de modèle approfondies.

L'application de l'analyse dimensionnelle et de similitude hydraulique permet à l'ingénieur d'organiser et de simplifier les expériences et d'en analyser le résultat.

A. MODELE REDUITS

Les modèles réduits permettent de prévoir les débits qui s'écoulent dans les grands ouvrages hydrauliques, lorsqu'il n'est pas possible de les calculer directement. Ils constituent un auxiliaire précieux dans bien des cas où aucun autre procédé ne peut les remplacer.

B. QUELQUES DEFINITIONS DES PROPRIETES PHYSIQUES DES FLUIDES

a. Tension superficielle

Si on prend une molécule à la surface libre d'un liquide ou à la surface de séparation de deux liquides n'est plus soumise à l'action de forces symétriques, puisqu'elle n'est plus entourée symétriquement par d'autres molécules de même nature.

Ainsi, la résultante des forces moléculaires n'est plus nulle. Elle provoque la tension superficielle dont la direction est normale à la surface séparation.

b. Coefficient de viscosité cinématique

C'est le rapport du coefficient de viscosité dynamique μ à la masse spécifique ρ :

$$\nu = \frac{\mu}{\rho}$$

les dimensions sont : $L^2 T^{-1}$ par exemple m^2/s en C.G.S. l'unité est le stockes (cm^2/s).

c. Poids spécifique \bar{W}

Le poids spécifique \bar{W} d'une substance est le poids de l'unité de volume de la substance, pour les liquides, on peut considérer que \bar{W} est constant au cours des variations de pression intervenant dans la pratique courante de la température de l'eau à $4^\circ C$

$$\bar{W} = 1000 \text{ kg/m}^3 \text{ avec dimensions } F \cdot L^{-3}$$

d. Masse spécifique ρ

C'est la masse contenue dans l'unité de volume, le poids spécifique et la masse spécifique sont liés par la relation fondamentale $\bar{W} = \rho g$

dimensions ML^{-3} ou $FL^{-4} T^2$

dans le système G.C.S. ρ de l'eau est $1g/cm^3$

II. RAPPELS DE SIMILITUDES :

Si on prend un système quelconque, il existe des conditions initiales tirant certaines valeurs telles que le débit, la vitesse, la pression etc....):

Si un mouvement M_1 est défini par L_1, V_1, H_1 .

Un mouvement M_2 est défini par L_2, V_2, H_2 .

Pour qu'il y ait similitude mécanique il faut que ces valeurs satisfassent aux conditions énoncées.

III. LOIS DE SIMILITUDES

a. Similitude géométrique :

Nous l'avons déjà défini en introduisant l'échelle du modèle qui est le rapport des dimensions linéaires homologues du modèle L_2 et du prototype (L_1) soit : $\lambda = \frac{L_2}{L_1}$

b. Similitude cinématique

La similitude cinématique exige que les vitesses et les accélérations soient dans un rapport défini et constant en tous les points correspondants des deux écoulements soit :

- . t_1 : le temps mis à parcourir la distance L_1 dans le prototype
- . t_2 : le temps mis à parcourir la distance L_2 homologue de L_1 dans le modèle.

- λ L'échelle du modèle	$\lambda = \frac{L_2}{L_1}$
- λ_t : l'échelle des temps	$\lambda_t = \frac{t_2}{t_1}$
- λ_v ; l'échelle des vitesses	$\lambda_v = \frac{V_2}{V_1}$

- λ_γ : l'échelle des accélérations $\lambda_\gamma = \frac{\delta_2}{\delta_1}$

on trouve facilement les relations suivantes :

$$v_1 = \frac{L_1}{t_1} \qquad v_2 = \frac{L_2}{t_2}$$

en divisant membre par membre on aura :

$$\lambda_v = \frac{v_2}{v_1} = \frac{L_2}{L_1} \times \frac{t_1}{t_2} = \frac{\lambda}{\lambda t}$$

de même pour les accélérations :

$$\delta_1 = \frac{L_1}{t_1^2} \qquad \delta_2 = \frac{L_2}{t_2^2}$$

divisons membre par membre on aura :

$$\lambda_\gamma = \frac{\delta_2}{\delta_1} = \frac{L_2}{L_1} \left(\frac{t_1}{t_2} \right)^2 = \frac{\lambda}{\lambda^2 t}$$

On remarque donc que le choix de l'échelle des temps λt impose celle des vitesses $\lambda_v = \frac{\lambda}{\lambda t}$ et celle des accélérations : $\lambda_\gamma = \frac{\lambda}{\lambda^2 t}$
c: similitude dynamique

les mouvements du fluide dans le prototype et dans le modèle sont provoqués par les forces. Pour que les deux système (modèles et prototype) soit dynamiquement semblables, il est donc nécessaire que les forces agissant en des points homologues du modèle et du prototype soient dans un rapport fixe et déterminé.

Il en découle que l'existence d'une similitude dynamique stricte et 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 de réaliser sauf si l'échelle du modèle $\lambda = 1$.

Mais cela ne veut pas dire que l'expérimentation est impossible 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 ($M < 0,7$) des liquides.

1. Forces de pression

Les forces (PA) de M_2 sont multipliées par :

$$\lambda_p \cdot \lambda^2 = \lambda_f \text{ pression}$$

2. Forces d'inertie :

Les forces d'inertie de M_2 sont multipliées par :

$$\begin{aligned} M_f &= \rho v \gamma \quad (\rho v = \text{masse}) \\ &= \lambda_p \cdot \lambda^3 \cdot \lambda \gamma = \lambda_f \lambda^4 \lambda_t^{-2} \end{aligned}$$

3. Forces de viscosité

$$df = \mu \frac{dv}{dn} ds = \rho v \frac{dv}{dn} ds$$

$$\lambda_f \text{ viscosité} = \lambda_f \cdot \lambda \nu \cdot \lambda_t^{-1} \cdot \lambda^2$$

4. Pesanteur :

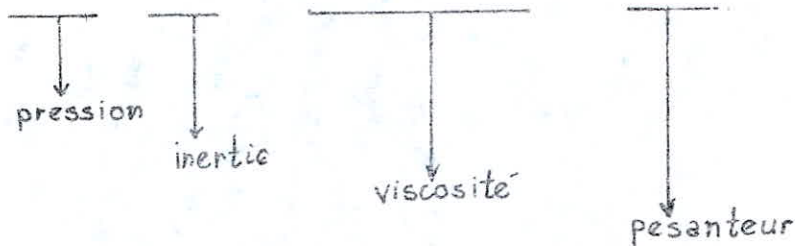
$$\lambda_f \cdot \lambda^3 \cdot \lambda g = \lambda_f \cdot \lambda^3$$

a. Cas où les forces dues à la viscosité sont négligeables par rapport aux forces dues à la pesanteur :

on a similitude si :

$$\lambda_p \cdot \lambda^2 = \lambda_f \cdot \lambda^4 \cdot \lambda_t^{-2} = \lambda_f \cdot \lambda \nu \cdot \lambda^2$$

$$\Rightarrow \frac{\lambda_p}{\lambda_p \lambda} = \lambda \lambda_t^{-2} = \lambda \rho \cdot \lambda^{-1} \cdot \lambda_t^{-1} = 1 \quad (1)$$



La viscosité étant négligeable de (1) on tire :

$$\frac{\lambda_p}{\lambda_p \lambda} = \lambda \cdot \lambda_t^{-2} = 1 \Rightarrow \begin{cases} \lambda_p = \lambda \cdot \lambda_p \\ \lambda_t = \sqrt{\lambda} = \lambda^{1/2} \end{cases}$$

Ce phénomène est particulier aux écoulements très turbulents, l'agitation tourbillonnaire masque l'influence de la viscosité du fluide, les forces d'inertie sont proportionnelles au carré de la vitesse :

$$\text{INERTIE : } \frac{F_2}{F_1} = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{V_2}{V_1} \right)^2 \frac{r_1}{r_2}$$

PESANTEUR :

$$\lambda_{f \text{ pesanteur}} = \lambda_p \cdot \lambda^3 \cdot \lambda g = \lambda_p \cdot \lambda^3 \text{ on doit avoir}$$

$$\lambda_{fi} = \lambda_{f \text{ pesanteur}}$$

$$\lambda_p \cdot \lambda^3 = \lambda_p \cdot \lambda^4 \cdot \lambda_t^{-2} \Rightarrow \lambda_t^{-2} \cdot \lambda = 1$$

$$\lambda = \lambda_t^{-2} \cdot \lambda^2 \cdot \lambda_v = \frac{\lambda}{\lambda_t} = \sqrt{\lambda} = \lambda^{1/2}$$

. Similitude de froude :

Pour notre cas la viscosité est négligeable ainsi que le nombre de FROUDE.

$$\lambda_v = \sqrt{\lambda} = \lambda^{1/2} \text{ et } \lambda \sqrt{\lambda} = \lambda^0$$

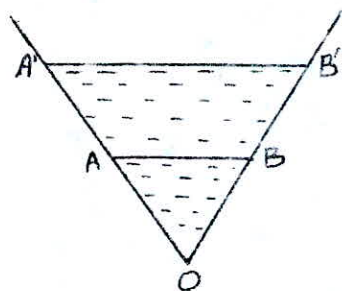
$$\Rightarrow \lambda^0 = \lambda^{3/2}$$

SIMILITUDE DYNAMIQUE DES ECOULEMENTS PASSANT PAR L'APPAREIL

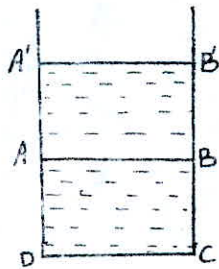
Les susdites circonstances offrent de très grands avantages pour l'expérimentation des seuils diédriques théoriquement il suffirait d'un seul essai, avec un seul débit, pour en déduire, en application de la similitude de REYNOLDS, les caractéristiques réelles, valables pour toute la gamme des débits de toute une série d'appareils de mesure, ayant les mêmes angles φ' et φ'' et les mêmes pentes géométriques J'_0 et J_0 .

La précision relative des mesures de débit reste la même pour les faibles et pour les forts débits à condition que la précision relative obtenue dans la mesure de la dimension linéaire de contrôle (Hk ou k) reste inchangée.

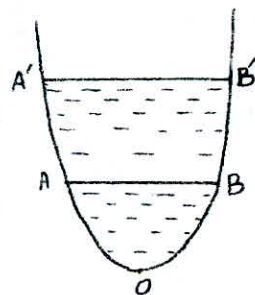
Les profils représentés ci-dessous montrent que le phénomène de similitude entre deux ou plus de deux écoulements de différents débits ne peut exister qu'un profil triangulaire.



$AOB \sim A'OB$



$ABCD \sim A'B'CD$



$AOB \sim A'OB'$

IV-PRODUITS SANS DIMENSIONS

- . Nombre de FROUDE
- . Nombre de REYNOLDS
- . Nombre de WEBER
- . Nombre de NEWTON

On a vu que suivant les conditions d'écoulement un tel ou tel produit sans dimensions est négligé mais il faut prendre des précautions.

Pour notre projet le nombre de WEBER néglige les gros débits mais pas les faibles débits. Dans ce cas on veut le déterminer à partir d'une certaine limite.

Ce nombre exprime le rapport de 2 forces celles dues à l'inertie et celles dues à la tension superficielle σ .

$$W = \frac{\rho \cdot K \cdot V^2}{\sigma}$$

En conclusion :

Pour notre projet l'écoulement est régi par la loi de REYNOLDS, pour les faibles débits de cette loi n'existe plus, il y a le nombre de WEBER qui intervient.

calcul du nombre de Reynolds et WEBER

on a : $Re = \frac{V_k \cdot D_k}{\nu}$ et $W = \frac{\rho \cdot k \cdot V_k^2}{\sigma}$

Pour le Reynolds on a :

$D = \frac{4A}{P}$, A : section mouillée
P : perimetre mouillé

Pour $\varphi = 90^\circ$ on a : $\tan \frac{\varphi}{2} = \frac{\frac{e}{2}}{k} = \frac{e}{2k} \Rightarrow e = 2k \tan \frac{\varphi}{2}$
pour une section mouillée on a :

$A = \frac{1}{2} \cdot k \cdot \frac{e}{2} = \frac{k \cdot e}{4}$ d'où : $A = 2 \left(\frac{k \cdot e}{4} \right)$

$A = \frac{k}{2} \cdot 2k \tan \frac{\varphi}{2} = k^2 \cdot \tan \frac{\varphi}{2}$

pour le perimetre mouillé on a :

$P = 2 \cdot \frac{e}{2 \sin \frac{\varphi}{2}} = \frac{e}{\sin \frac{\varphi}{2}} = \frac{2k \tan \frac{\varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}} = 2,83 \cdot k$

donc : $Re = \frac{1,413 \cdot k \cdot V_k}{\nu}$

Pour une temperature de $16^\circ C$ ma par interpolation :

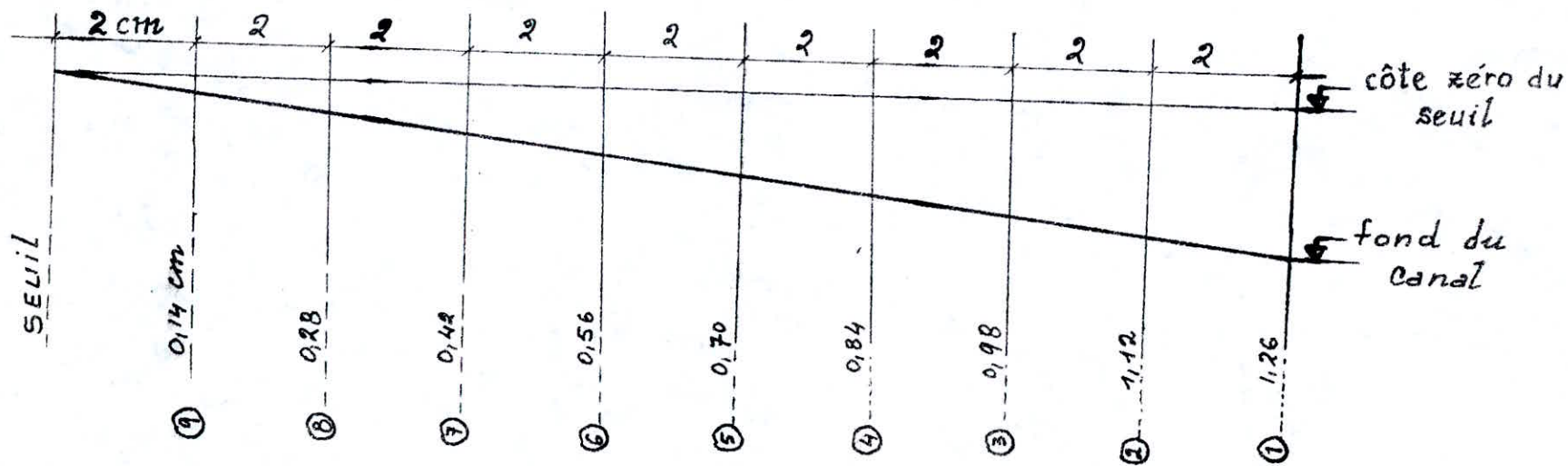
$\rho = 101,85 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ et $\sigma = 0,00751 \text{ kg/m}$

$W = \frac{\rho \cdot k \cdot V_k^2}{\sigma}$

~ 3 ~

N° EXP	$H_k(m) \cdot 10^{-2}$	V(l)	t(s)	Q(m³/s) · 10 ⁻³
1	2,56	2,0	15	0,133333
2	2,20	1	22	0,090909
3	2,12	1	24	0,083333
4	1,90	1	31	0,064516
5	1,77	1	37	0,054054
6	1,60	1	46	0,043478
7	1,38	1	63	0,031746
8	1,21	1	77	0,025974
9	1,11	1	91	0,021978
10	0,85	1,0	77	0,012987
11	0,59	0,5	78	0,006410
12	0,35	0,5	194	0,002577

côtes des prises de pression
par rapport au fond du canal



~ 6 ~

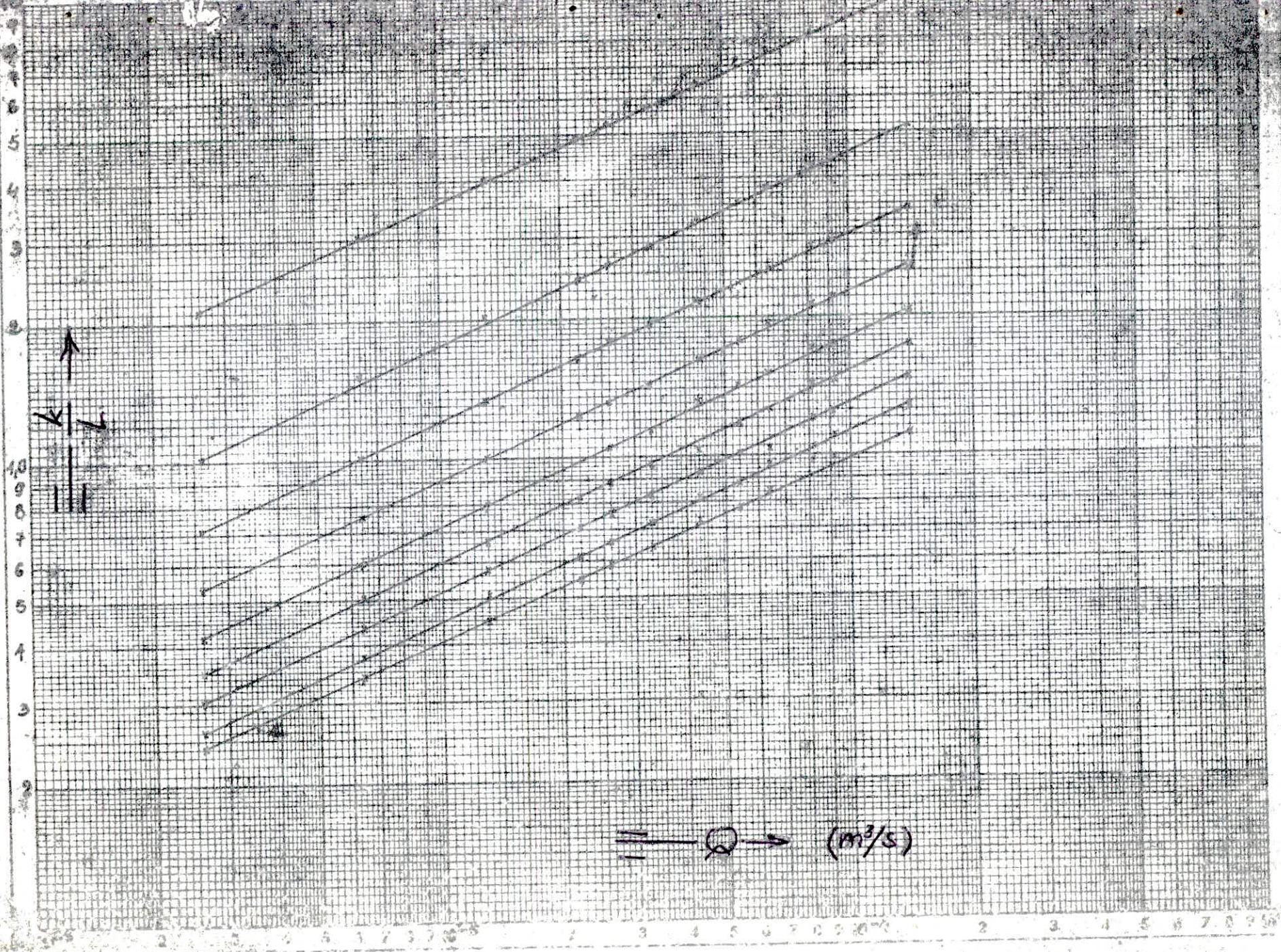
$Q(m^3/s) \cdot 10^3$	k/L_1	k/L_2	k/L_3	k/L_4	k/L_5	k/L_6	k/L_7	k/L_8	k/L_9
0,133333	0,114	0,128	0,147	0,171	0,205	0,256	0,342	0,513	1,030
0,090909	0,098	0,110	0,126	0,147	0,176	0,220	0,294	0,440	0,880
0,08333	0,095	0,106	0,121	0,142	0,170	0,213	0,284	0,425	0,850
0,064516	0,085	0,096	0,109	0,128	0,153	0,192	0,256	0,384	0,767
0,054054	0,079	0,089	0,102	0,119	0,143	0,179	0,238	0,357	0,715
0,043478	0,073	0,082	0,094	0,109	0,131	0,164	0,218	0,328	0,655
0,031746	0,064	0,072	0,083	0,096	0,116	0,144	0,193	0,289	0,578
0,025974	0,059	0,067	0,076	0,089	0,107	0,133	0,178	0,267	0,533
0,021978	0,055	0,062	0,071	0,083	0,099	0,125	0,166	0,249	0,499
0,012987	0,045	0,051	0,058	0,067	0,081	0,101	0,135	0,202	0,404
0,006410	0,034	0,038	0,044	0,051	0,061	0,076	0,102	0,152	0,305
0,002577	0,024	0,026	0,030	0,035	0,042	0,053	0,071	0,106	0,212

15

50-

$\frac{k}{L}$

$\rightarrow (m^3/s)$



~ 4 ~
 Résultats des essais
 sur petit modèle

$Q(\text{m}^3/\text{s}) \cdot 10^{-3}$	$Q^{0,4}$	$K(\text{m}) \cdot 10^{-2}$	$1,25 K(\text{m}) \cdot 10^{-2}$
0,133333	0,447	2,051	2,564
0,090909	0,383	1,760	2,200
0,083333	0,370	1,700	2,125
0,064516	0,334	1,534	1,918
0,054054	0,311	1,429	1,786
0,043478	0,285	1,310	1,638
0,031746	0,252	1,155	1,444
0,025974	0,232	1,066	1,332
0,021978	0,217	0,997	1,246
0,012987	0,176	0,808	1,010
0,006410	0,133	0,609	0,761
0,002577	0,092	0,423	0,529

250

$Q(m^3/s) \cdot 10^{-3}$	$k (m) \cdot 10^{-2}$	$k^2 (m^2) \cdot 10^{-4}$	$1,25k(m) \cdot 10^{-2}$	$V_k(m/s)$	$\frac{H_k}{W_k}$	$R (10^2)$	$\frac{W}{V}$
0,133333	2,051	4,207	2,564	0,317	1,0	91,9	27,82
0,090909	1,760	3,098	2,200	0,293	1,0	72,9	20,53
0,083333	1,700	2,890	2,125	0,288	1,0	69,2	19,14
0,064516	1,534	2,353	1,918	0,274	1,0	59,4	15,60
0,054054	1,429	2,042	1,786	0,265	1,0	53,5	13,57
0,043478	1,340	1,716	1,638	0,253	1,02	46,8	11,37
0,031746	1,155	1,334	1,444	0,238	1,05	38,8	08,93
0,025974	1,065	1,136	1,332	0,229	1,10	34,4	07,52
0,021978	0,997	0,994	1,246	0,221	1,12	31,1	06,63
0,012987	0,808	0,653	1,010	0,199	1,19	22,7	04,38
0,006410	0,609	0,371	0,761	0,173	1,31	14,5	02,48
0,002577	0,423	0,179	0,529	0,144	1,52	08,6	01,21

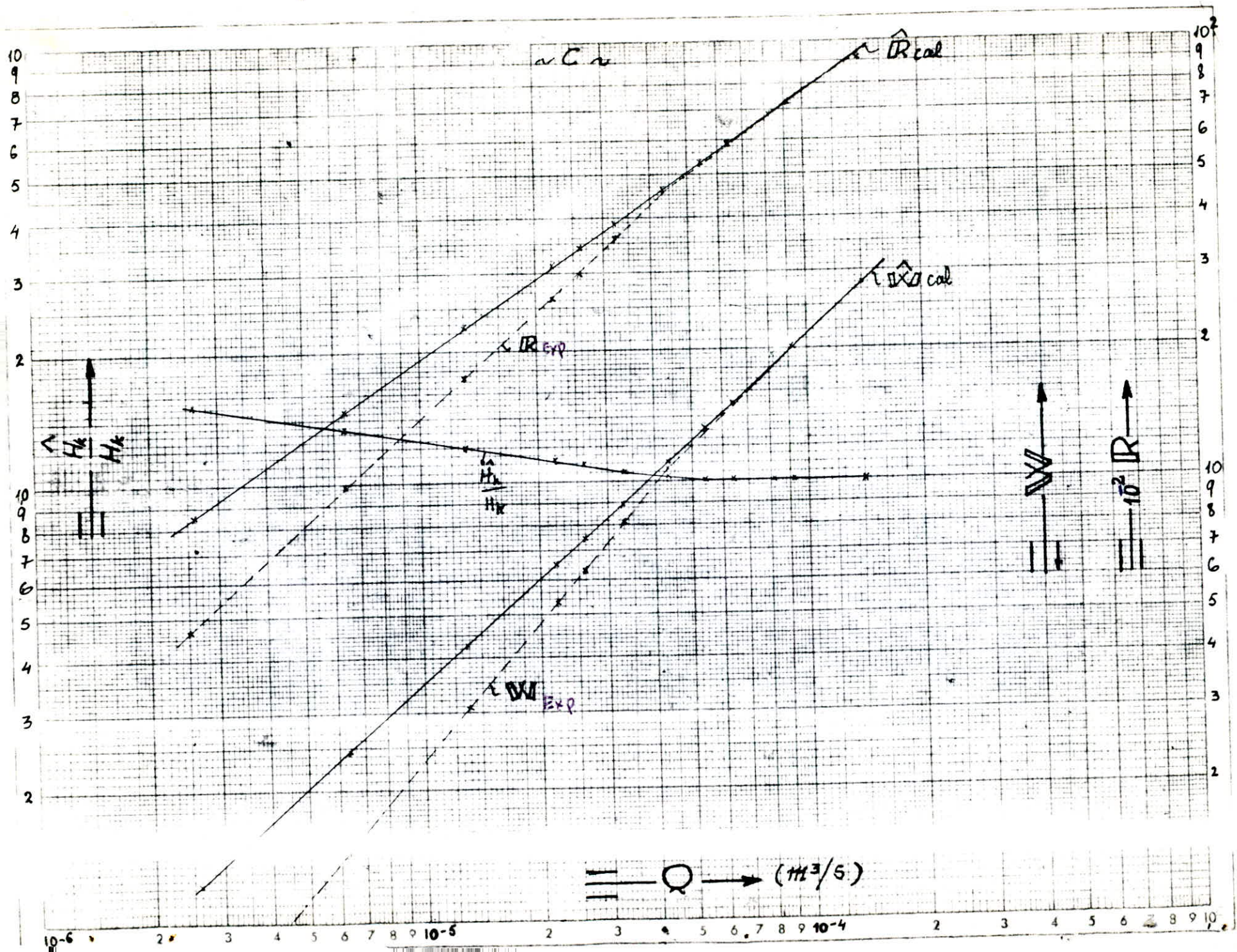
152

n *f* *v*

$Q_{EXP} \cdot 10^{-3}$ (m ³ /s)	$H_{K EXP} (10^2 m)$	$k_{EXP} (10^{-2} m)$	$k^2_{EXP} (10^{-4} m^2)$	$V_{K EXP}$ (m/s)	$V^2_{K EXP}$ (m ² /s ²)	(10 ²)R	W
0,133169	2,56	2,048	4,194	0,318	0,101	92,02	28,05
0,091171	2,20	1,760	3,098	0,294	0,086	73,11	20,53
0,083108	2,12	1,696	2,876	0,289	0,084	69,26	19,32
0,064035	1,91	1,528	2,335	0,274	0,075	59,16	15,54
0,053685	1,78	1,424	2,028	0,265	0,070	53,32	13,52
0,041125	1,60	1,280	1,638	0,251	0,063	45,40	10,94
0,028412	1,38	1,104	1,219	0,233	0,054	36,35	8,08
0,020453	1,21	0,968	0,937	0,218	0,047	29,82	6,24
0,016486	1,11	0,888	0,789	0,209	0,044	26,22	5,26
0,008460	0,85	0,680	0,462	0,183	0,033	17,58	3,04
0,003254	0,58	0,464	0,215	0,151	0,023	09,90	1,45
0,000920	0,35	0,280	0,078	0,118	0,014	04,67	0,53

Débit mètre diédrique

- *LBLA (RCL^{hf}₂₁ - RCL^J₁₄ × RCL^L₁₅) × .8 = y^x 5 × 4,9 × RCL^I₀₂ x² = √x STO^(Q) 19 R/S
- 031 *LBL*A'(RCL^Q₁₉ E ÷ ((RCL^Q₁₉ × .999999) E - (RCL^Q₁₉ × 1,000001) E) × RCL^Q₁₉ ×
- 072 .000002) SUM 19 *|x| - .000001 = *x>>L*A'RCL^Q₁₉ R/S
- 097 *LBLE STO^Q₀₁ (RCL^{hf}₂₁ + (RCL^Q₀₁ ÷ RCL^I₀₂ ÷ RCL^{hf}₂₁ x²) x² ÷ 19,6 - 1,25 × (RCL^Q₀₁
- 131 x² ÷ 4,9 ÷ RCL^I₀₂ x²) y^x .2 - RCL^J₁₄ × RCL^L₁₅) INVSBR
- 152 *LBLB RCL^Q₀₁ x² ÷ 4,9 ÷ RCL^I₀₂ x² = y^x .2 × 5 ÷ 4 + RCL^J₁₄ × RCL^L₁₅ =
- 180 STO^(hf)₁₃ R/S
- 183 *LBL*B'(RCL^Q₁₃ *E' ÷ ((RCL^Q₁₃ × .999999) *E' - (RCL^Q₁₃ × 1,000001) *E') × RCL^Q₁₃ ×
- 224 .000002) SUM 13 *|x| - .000001 = *x>>L*B'RCL^{hf}₁₃ R/S
- 249 *LBL*E' STO^(hf)₂₁ (RCL^{hf}₂₁ + (RCL^Q₀₁ ÷ RCL^I₀₂ ÷ RCL^{hf}₂₁ x²) x² ÷ 19,6 - 1,25 × (RCL^Q₀₁
- 283 x² ÷ 4,9 ÷ RCL^I₀₂ x²) y^x .2 - RCL^J₁₄ × RCL^L₁₅) INVSBR
- I = ... → 02 , J = ... → 14 , L = ... → 15 , hf = ... → 21
- A ⇒ (Q) = ... ? *A' ⇒ Q̂ = ... ? ← 01
- I = ... → 02 , J = ... → 14 , L = ... → 15 , Q = ... → 01
- B ⇒ (hf) = ... ? *B' ⇒ hf̂ = ... ? ← 13
- 304 *LBLC 2 × RCL^Q₀₁ x² ÷ 9,8 ÷ RCL^I₀₂ x² = y^x .2 = STO^k 00 INVSBR
- 327 *LBLDC RCL^{hf}₂₁ ÷ RCL^k₀₀ = STO^{hf+}₃₁ R/S
- C ⇒ k = ... ? ← 00 D ⇒ hf+ = ... ? ← 31
- 339 *LBL*E' RCL₀₀ ÷ 2 = STO¹³ *B'
- *C' ⇒ ht = ... ? ← 13 D ⇒ ht+ = ... ? → 31
- Contrôle par PGM « diédre + »
- Q = ... → 01 , I = ... → 02 , ht+ = ...
- A ⇒ k = ... ? , C, E, RCL₁₃ ⇒ hf+ = ... ?



conclusion :

on peut lire sur la fig. C- toutes les valeurs calculées de $\frac{H_k}{H_k}$ rapport entre profondeur calculée dont l'hypothèse de l'influence de la tension superficielle négligeable reste constante et égale à 1 jusqu'à une valeur de $Q = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$ de débit (5 centilitre/s) correspondant à un nombre de "WEBER" $W = 11$, la valeur simultanée du nombre de REYNOLDS est $R = 4500$.
Il est à noter que la limite de la validité des formules théorique est due à l'effet simultané de la tension superficielle interprétée par la valeur du nombre de W est à l'effet de la viscosité interprétée par le nombre de R donne la valeur de $R = 4500$ est identique à la limite, séparant le régime critique du régime turbulent en transition.

BIBLIOGRAPHIE
/-----/

. COURS D'HYDRAULIQUE DE MONSIEUR G. LAPRAY

. MANUEL D'HYDRAULIQUE GENERALE - A. LANCASTRE.

