

16 4/87
الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي
25X
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

المكتبة الوطنية للتقنية
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique

DEPARTEMENT : GENIE HYDRAULIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'Etat

SUJET

Etude de Possibilité de Réalisations de Travaux Pratiques sur Canal Prismatique à Pente Variable

Proposé par :

Mr A. PIMINOV

Etudié par :

Mr B. BOUZIANE

Mr S. BENABBES Sedr

Dirigé par :

Mr A. PIMINOV

Mr N.E. NEBBACHE

PROMOTION : JANVIER 1987

E.N.P. 10, Avenue Hacén Badi - EL-HARRACH — ALGER

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم والبحث العلمي
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
المدرسة الوطنية للتكنولوجيا
BIBLIOTHEQUE — المكتبة
Ecole Nationale Polytechnique
DEPARTEMENT : GENIE HYDRAULIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

En vue de l'obtention d'un diplôme d'ingénieur d'Etat

SUJET

Etude de Possibilité de Réalisations de Travaux Pratiques sur Canal Prismatique à Pente Variable

Proposé par :

Mr A. PIMINOV

Etudié par :

Mr B. BOUZIANE

Mr S. BENABBES

Dirigé par :

Mr A. PIMINOV

Mr N.E. NEBBACHE

PROMOTION : JANVIER 1987

E.N.P. 10, Avenue Hacen Badi - EL-HARRACH — ALGER

Département: Hydraulique
Promoteur: A. PIMINOV - NEBBACHE N.E
Elève Ingénieur: B. BOUZHIANE - S. BENABBES

معلمة .. المري
رجه
بيمينوف ، نباش ناصر الدين
حميد مهندس بوزيان بن عومر ، بن عباس الصديق

الموضوع : دراسة احتمالات الاعمال التطبيقية الممكن تحقيقها على نموذج مصغر ذات مسقط مستطيل الشكل.

الملخص : موضوع هذه الأطروحة هي دراسة احتمالات لتحقيق اعمال تطبيقية تخص دراسة الجريان المياه السطحية في نموذج الجديد للقناة ومن جملة هذه التطبيقات مخبرية نعرض منها فيما يلي:

- دراسة خطوط السطوح المائية
- دراسة تطبيقية و نظرية في القفزة تامة
- بحث عن معامل التصريف عبر مصب ذات قمة عريضة

Sujet: Etude de possibilité pour la réalisation de travaux pratiques sur un canal de section rectangulaire.

Résumé: Le présent projet consiste à l'étude des possibilités de réalisation des travaux pratiques concernant les écoulements à surface libre. On associe à ce travail l'élaboration des polycopés de travaux pratiques suivants:

- Etude des courbes de remous
- Etude expérimentale du ressant
- Détermination du coefficient de débit à travers un déversoir à seuil large

Subject: The study of the possibilities to realise a preactices works in the zectangular channel

Abstract: The present project consists of the study of the possibilities of realising preactices works which the study of ecoulements on a free surface. We asociete to this project the duplicate elaboration of a preactices works about:

- the study of surface water curves
- the study hydraulic jump
- determination the coefficient of flow rate across a threshold with a thick side.

DEDICACES

Je dedie ce modeste travail en signe de respect
et de reconnaissance à :

- Mes parents pour le sacrifice qu'ils ont consenti
pour que je réussisse.
- Mes frères et sœurs.
- Ma famille. (oncles, cousins et mon beau-frère)
- A tous mes amis.

S. BENABBES

Je dedie ce modeste travail en signe de respect
et de reconnaissance à :

- la mémoire de mon cher et regretté frère Djillali
- Ma mère et mon père que j'admire et pour tous leurs
sacrifices et leurs efforts qu'ils ont déployés pour
me voir enfin réussir
- Pour tous mes frères et sœurs
- a toute ma famille
- celle qui a fait ma joie et mon bonheur durant
ces dernières années "LYNDA".
- tout l'entourage amical

B. BOUZIANE

INTRODUCTION

BUT DU TRAVAIL 2

CHAPITRE I. - DESCRIPTION DE L'INSTALLATION AVEC ACCESSOIRES

1.1 - Canal	5
1.2 - Reservoir d'alimentation	6
1.3 - Moto-pompe	7
1.4 - Debimetre	7
1.5 - SINGULARITES	8
1.6 - Vanne de réglage du debit.	9
1.7 - Tranquillisateur.	10

CHAPITRE II EXPERIENCES REALISABLES

2.1 - Etude des écoulements dans le canal pour la détermination du coefficient de CHEZ	
2.2 - Etude Experimentale du ressaut hydraulique	13
2.3 - Etude des Mouvements graduellement variés	16
2.4 - Etude des écoulements sur les seuils	21
2.4.1 - Détermination du coefficient de débit pour réservoir à paroi mince	
2.4.2 - Détermination du débit pour seuil large (Belanger, Jaeger)	25
2.5 - Etude expérimentale du canal Venturi ou Parshall	28

CHAPITRE III SIMILITUDE DYNAMIQUE

3.1. Introduction	30
3.2. Similitude dynamique.	30
3.3. Présentation des Lois de similitude (REECH-Froude, Reynolds)	32
3.4. Domaine d'applications	33
3.5. choix de la similitude pour notre étude	33

CHAPITRE IV ELABORATION DES POLYEDRES POUR LES TRAVAUX SUIVANTS

DETERMINATION DU COEFFICIENT DE DEBIT POUR SEUIL LARGE

4.1.1 But du Travail	34
4.1.2 Generalites	34
4.1.3 Description de l'écoulement et détermination de l'expression du débit	35
4.1.4 Installation expérimentale	37
4.1.5 Mode opératoire	38
4.1.6 Présentation des résultats et Formules de calculs	39
4.1.7 Conclusion	43

IV.2. ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE

4.2.1. But du travail	44
4.2.2. Ecoulement rapidement variés	44
4.2.3. Ressaut hydraulique	44
4.2.4. Equation fondamentale du ressaut	46
4.2.5. Installation expérimentale	48
4.2.6. Mode opératoire	49
4.2.7. Présentation des résultats et formules de calculs	49
4.2.8. Conclusion	54

IV.3. RECHERCHE DES COURBES DE REMOUS POUR L'AMONT D'UN DEVERSOIR A PAROI MINCE

4.3.1. But du Travail	55
4.3.2. Mouvement graduellement varié	55
4.3.3. Deversoirs utilisés	59
4.3.4. Installation expérimentale	60
4.3.5. Mode opératoire	61
4.3.6. Présentation des résultats et formules de calculs	62
4.3.7. Conclusion	73

V. CONCLUSION GENERALE 75

BIBLIOGRAPHIE 76

INTRODUCTION



les canaux à pente variable sont conçus pour l'étude des écoulements à surface libre. Ce type d'écoulement se rencontre dans l'étude des cours d'eau, des canaux de navigation ou d'irrigation et dans les installations hydrauliques associées. Ces installations permettent d'analyser l'influence de la profondeur et de la pente, par exemple, sur l'écoulement et de vérifier par l'expérience la validité des différentes relations théoriques. Les canaux à pente variable permettent aussi d'étudier les écoulements sur le transport de sédiments, ou sur l'étude de vagues avec un appareillage complémentaire.

Ce type de canal qui est un modèle réduit, présente plusieurs avantages à l'adaptation des phénomènes hydrauliques, tout en insistant sur la diversité des paramètres hydrauliques qui régissent les conditions d'écoulement dans les divers cas en pratique courante.

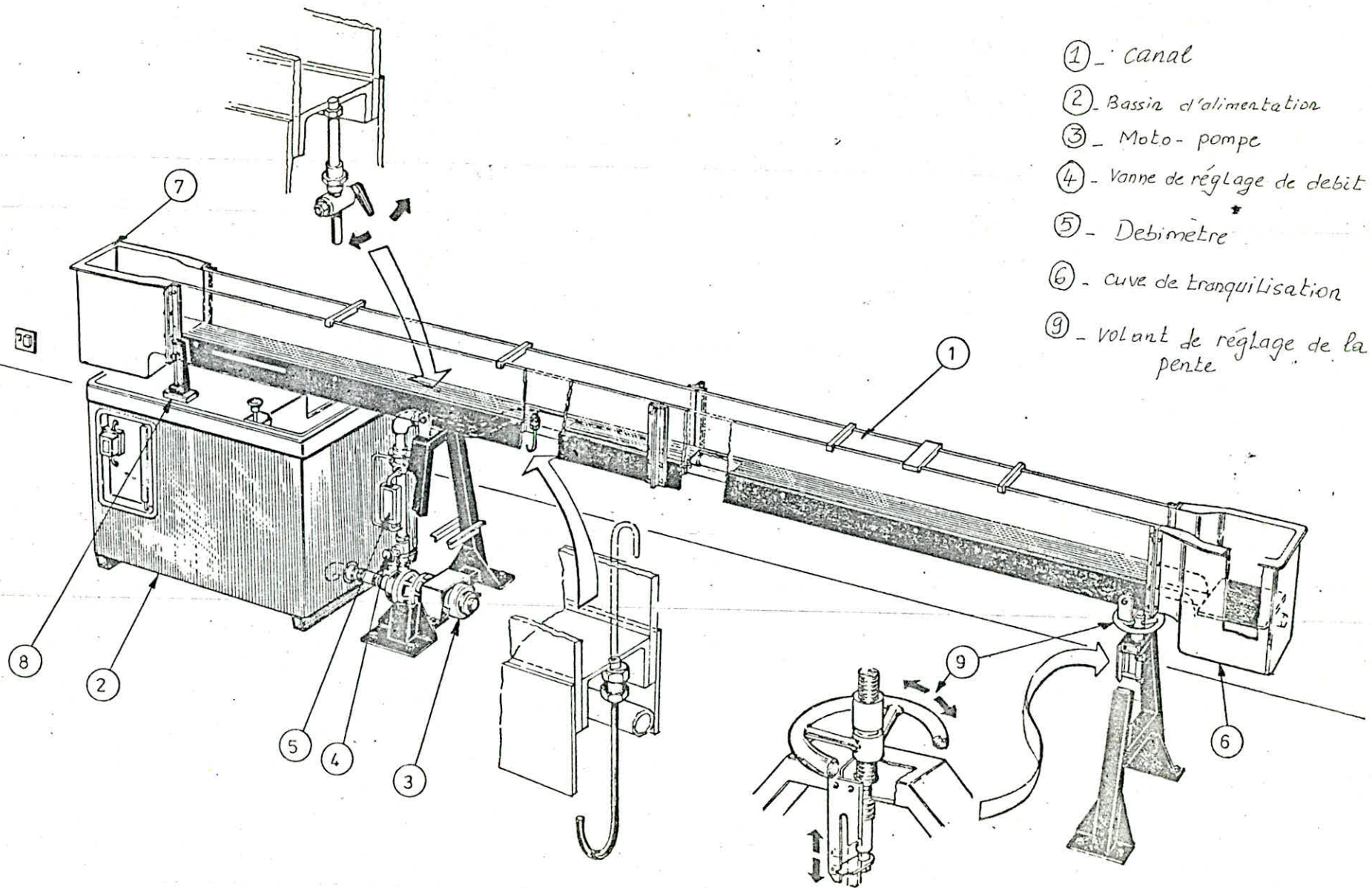
Par le biais des expérimentations le canal prismatique constitue un élément important pour l'étude de similitude dynamique. En vue d'approfondir cet ouvrage il est important d'entamer les thèmes se rapportant à l'utilisation de cet équipement à savoir :

L'écoulement uniforme et non uniforme, distinction entre mouvement torrentiel et fluvial, repercussions sur l'ensemble du courant à la suite d'introduction de singularité (vanne, déversoir, remblai) dans le canal, discrimination entre veine noyée et veine dénoyée,

détermination de débit et coefficient de débit à travers les différentes singularités existantes dans le canal, recherche des courbes de remous au niveau des obstacles. en faisant varier la pente.

But du Projet

Notre principale but durant cette étude et d'apporter le maximum d'informations indispensables pour la résolution de beaucoup de problèmes usuels qui se posent en applications, ou qu'on rencontrent dans l'étude des écoulements à surface libre. On associe à ce travail l'élaboration de polycopés de travaux pratiques au besoin des étudiants à l'usage de cet appareil. L'objet de notre étude consiste à la détermination expérimentale du coefficient de débit à travers un déversoir à seuil épais, calculer des courbes de remous d'après la méthode de Bakmeteff, étude du ressaut hydraulique,



C4 MULTI PURPOSE TEACHING FLUME.

III. DESCRIPTION DE L'INSTALLATION AVEC ACCESSOIRES

NOUS disposons d'un canal vitré en modèle réduit, Le fond du lit est à pente variable. L'écoulement à l'intérieur de l'installation fonctionne en circuit fermé c'est à dire L'eau aspirée par la pompe du réservoir d'alimentation est directement refoulée vers le canal au moyen d'une conduite fermée en P.V.C, à l'arrêt de la pompe L'eau est récupérée dans le réservoir d'alimentation.

L'installation est constituée de plusieurs accessoires contribuant tous simultanément au bon fonctionnement de cette dernière on retrouve les éléments suivants :

canal

Bassin d'alimentation

Pompe centrifuge

Débitmètre

Singularités

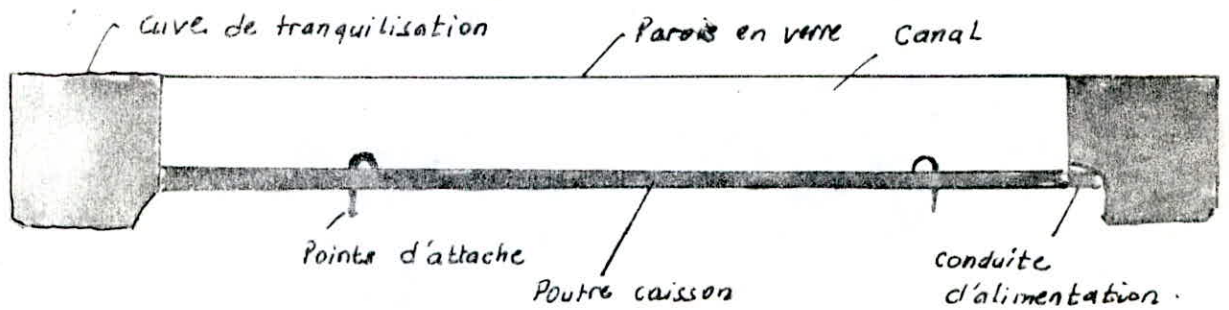
vanne de réglage de débit

tranquillisateur

Limnimètre de mesure

1.1 le Canal

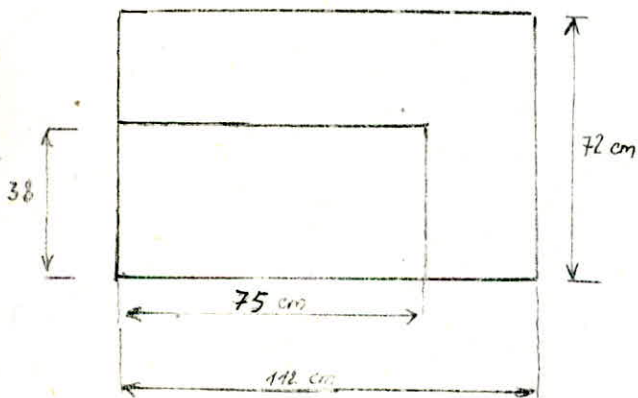
c'est la plus importante partie de l'installation. Il est supporté par une poutre caisson, de section rectangulaire en acier les entretoises verticales et les support de rails, sur lesquels sont placés les chariots de mesure, sont également de section rectangulaire. Le fond du lit est acier inoxydable. Il est supporté en deux points l'un fixe et l'autre peut remonter ou redescendre pour donner au canal une pente caractéristique (un réglage précis et gradué est prévu pour permettre d'ajuster le fond du canal). Des prises de pressions, sur le fond du canal, sont prévues à intervalles réguliers. Les glaces latérales sont supportées par des vis permettant un alignement très précis. Les parois de verre se prolongent sous le niveau du fond du canal pour permettre une observation complète du fond.



1.2 Reservoir d'alimentation

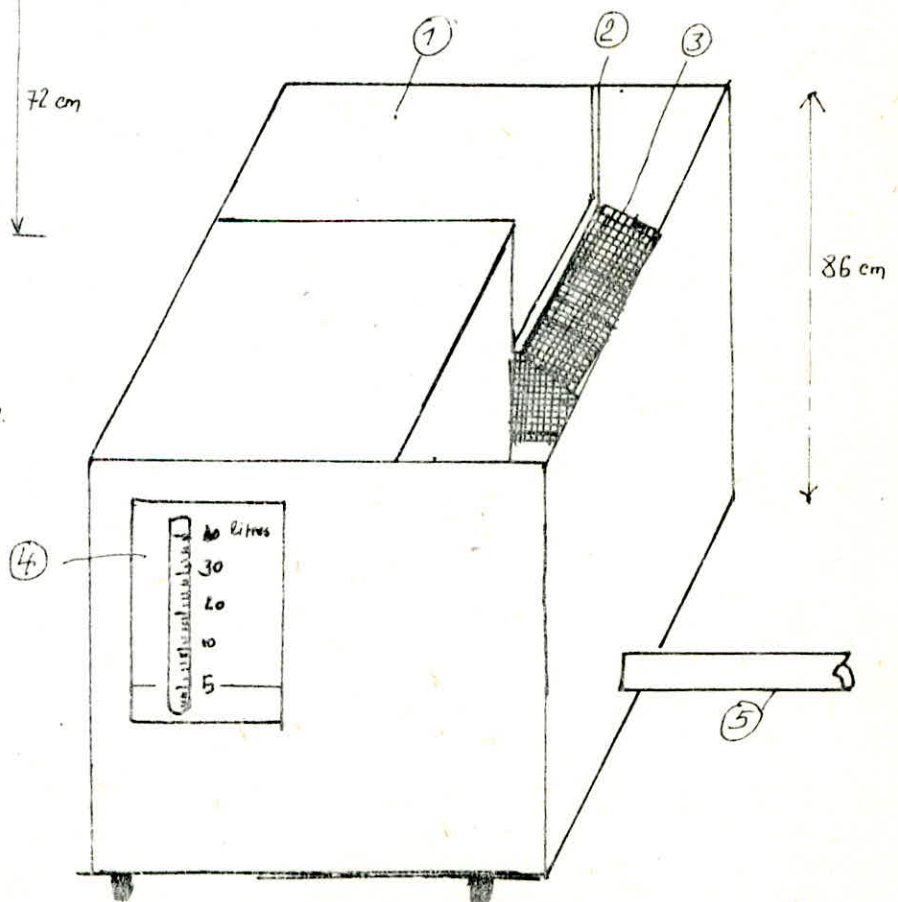
Dans certains cas, les canaux peuvent être directement alimentés par le réseau de distribution d'eau du laboratoire. Pour les installations à fonctionnement en circuit fermé, un réservoir de capacité appropriée est fourni, la partie supérieure est en forme de cuvette permettant de recueillir l'eau venant du canal.

Cette cuvette est en forme de canal rectangulaire se terminant par un déversoir (à paroi mince qu'on devra fixer); Elle est munie d'un tranquillisateur sur cette partie on pourra réaliser quelques expériences concernant les déversoirs à paroi mince. Une fois l'eau est dans la cuvette vient traverser l'orifice de vidange pour aboutir à l'intérieur du bassin (moto-pompe à l'arrêt l'eau se stocke dans cette partie). A l'aide de la jauge (piezomètre gradué) on pourra lire directement le volume d'eau accumulé dans la cuvette.



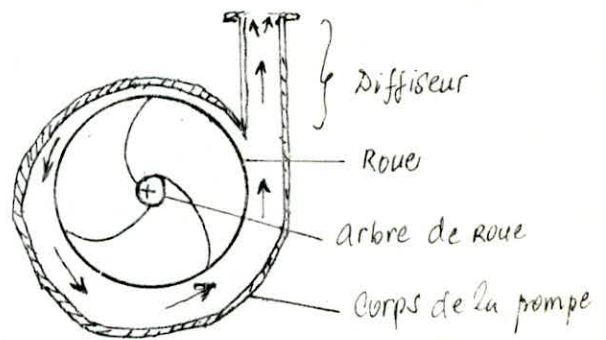
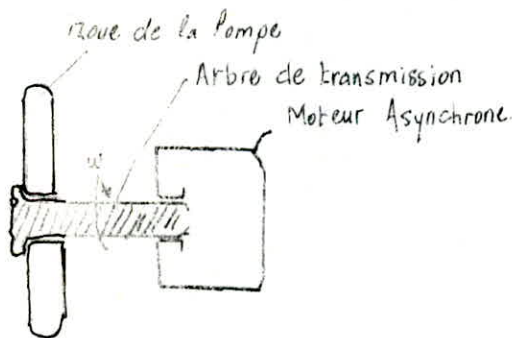
vue de dessus du Bassin.

- ① - Cuve en forme de canal rectangulaire
- ② - Emplacements des déversoirs à paroi mince
- ③ - tranquillisateur en plastique
- ④ - Piezomètre de capacité
- ⑤ - conduite d'aspiration



13 MOTO-POMPE

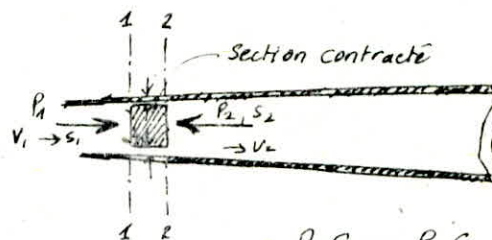
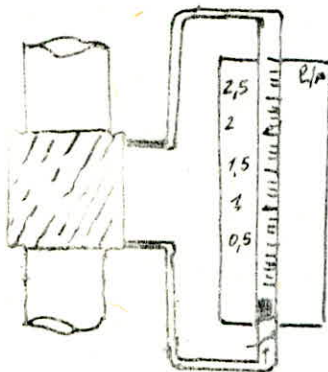
La pompe équipant l'installation est une pompe centrifuge à axe horizontale. Le moteur entraînant la pompe est alimenté par un courant électrique triphasé (380V). Son principe de fonctionnement consiste dans un premier temps à fournir au fluide une énergie de vitesse (cinétique) puis dans un second temps à transformer cette énergie en énergie de pression. Les deux éléments essentiels à ce travail sont l'impulsion et le corps de la pompe. Ce type de pompe occupe moins de place, et est constitué d'un mécanisme très simple, dépense peu d'énergie et exige peu d'entretien.



14 Debimètre (Diaphragme).

C'est un appareil de primogène de type PLATON il nous permet de lire directement le débit passant à travers la conduite après l'ouverture de la vanne. Ce debimètre est relié parallèlement à la conduite (au niveau du diaphragme) par deux piezomètres (amont, aval). Le passage de l'eau dans ces deux tubes provoque une différence de pression dans le piezomètre gradué qui fait remonter

Le piston en forme d'anneau (dans le tube conique), lorsque cet anneau s'immobilise on pourra lire alors le débit directement. Le débitmètre ne donne d'indications valable que dans une fourchette de débit maximal et minimal bien définie



$$P_1 S_1 - P_2 S_2 = G \cdot f(v)$$

- P_1 : pression au niveau de la section 1-1
- P_2 : pression au niveau de la section 2-2
- S_1 : section S_1
- S_2 : section S_2
- G : masse du piston (anneau)
- f : vitesse d'écoulement à l'intérieur de la conduite

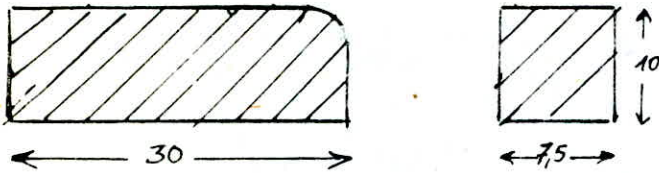
1.5 SINGULARITES

Appellées aussi deverseurs constituent des éléments indispensables à la réalisation des travaux pratiques

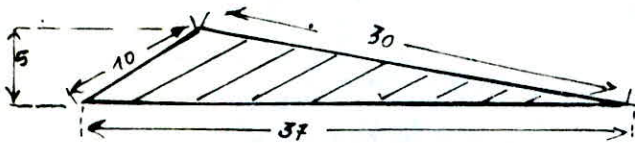
Il permettent la détermination de certains paramètres hydrauliques en écoulement à ciel découvert.

Ils sont confectionnés en matière plastique, bois, acier inoxydable; un ancrage solide est prévu dans le canal pour la fixation des obstacles. Ils peuvent être placés verticalement ou inclinés vers l'amont ou vers l'aval. La crête épaisse ou mince, il peut y avoir ou non de contraction latérale avec échancrure (rectangulaire, triangulaire)

- On dispose de singularités en bois lisses.

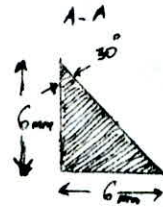
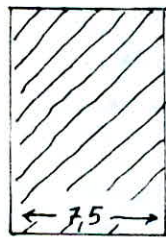
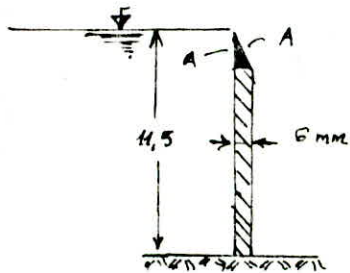


Deversoir à crête épaisse



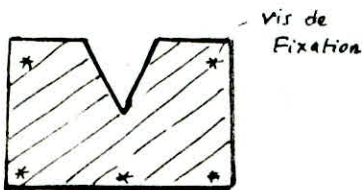
Deversoir triangulaire (seuil jaugeur)

- On dispose aussi de deversoir à paroi mince fabriqué en plastique muni de vis de fixation pouvant être fixé sur la largeur du canal ou dans la cuvette supérieure du bassin d'alimentation.

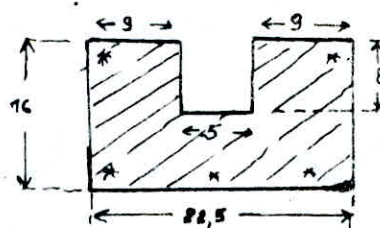


- Deversoir sans contraction latérale -

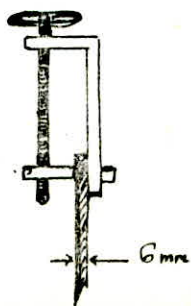
Remarque ces singularités sont munis par des joints en caoutchouc sur les parois latérales établissant une étanchéité à déquate.



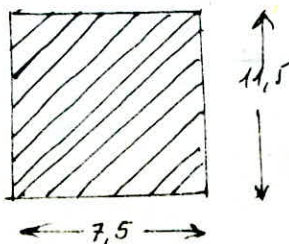
- deversoir avec échancrure triangulaire

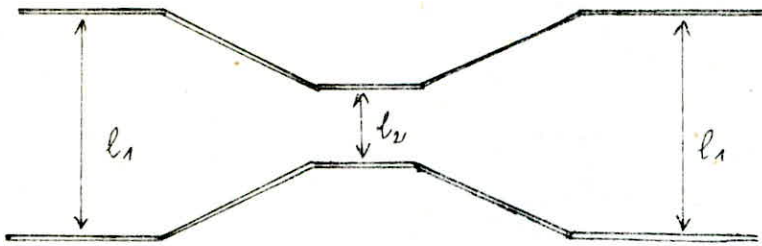


- deversoir avec échancrure rectangulaire



vanne de fond





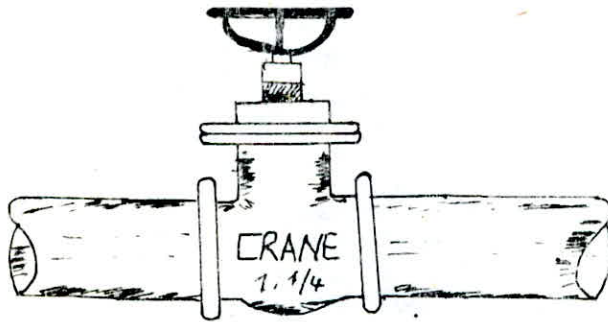
$l_2 = 05 \text{ cm.}$

$l_1 = 08 \text{ cm.}$

- réducteur de section transversale (canal venturi)

1.6 Vanne de réglage de débit

L'installation dispose d'une vanne de type CRANE 1.1/4 fabriquée en fonte ductible appelée aussi vanne robinet. Elle est incorporée dans la conduite d'aspiration¹⁰ (à l'amont de la pompe). Elle permet le réglage de débit dans la conduite en charge. En position d'ouverture totale de la vanne l'obturateur dégage complètement l'ouverture du corps. En position de fermeture totale l'écoulement à l'intérieur de la conduite est interrompu.



1.7 tranquillisateur

La cuve de tranquillisation est montée à une extrémité du canal elle est alimentée à travers une conduite d'amenée, et de grillage. Le convergent est en acier inoxydable le profil du convergent est soigneusement étudié et assure d'excellentes conditions d'écoulement dans le canal car cette cuve est remplie de billes et contient aussi un filtre à pour propriété de répartir des courants en filets parallèles.

II. EXPERIENCES REALISABLES

Dans cette partie on se propose d'énumérer quelques expériences qu'il est possible de réaliser, parmi lesquelles on peut citer :

- étude de l'écoulement dans les canaux pour la détermination des coefficients de Chezy et de Manning.
- établissement de la courbe de charge spécifique sur toute la gamme des débits pour les écoulements fluviaux, critiques et torrentiels.
- étude de la répartition des vitesses dans les canaux
- étude du ressaut hydraulique
- étude et détermination des remous
- écoulements sur les seuils, à travers les déversoirs et sous vannes
- écoulement dans un ventiré
- écoulement autour des piles de pont
- les canaux peuvent aussi être utilisés pour d'autres expériences avec l'instrumentation appropriée. Par exemple, le transport de matière, l'étude des ondes de surface, les mesures de traînée ou l'étude des caractéristiques des barrages-déversoirs.

2.1 ETUDE de l'écoulement dans les canaux pour la détermination des coefficients de Chezy et de Manning.

On peut déterminer ces coefficients uniquement en régime uniforme c'est à dire lorsque le filet du courant liquide est parallèle à la pente tout le long du canal en conservant une pente et une section transversale constante ce qui implique que la vitesse reste constante tout le long du filet liquide. Les formules fondamentales du régime uniforme établissent une relation entre la vitesse moyenne V , le rayon moyen R , la pente I du canal et sa rugosité. Elles sont de la forme établie par Chezy.

$$V = C \cdot \sqrt{RI}$$

Le coefficient C dépend des paramètres géométriques et hydrauliques de l'écoulement

Le coefficient C peut être obtenu en utilisant l'une des expressions suivantes :

formule de Manning : $C = \frac{1}{n} \cdot R^{2/3}$ n : Rugosité du canal

formule de Bazin : $C = \frac{87}{1 + Y/\sqrt{R}}$ Y : Caractéristique de la nature des parois

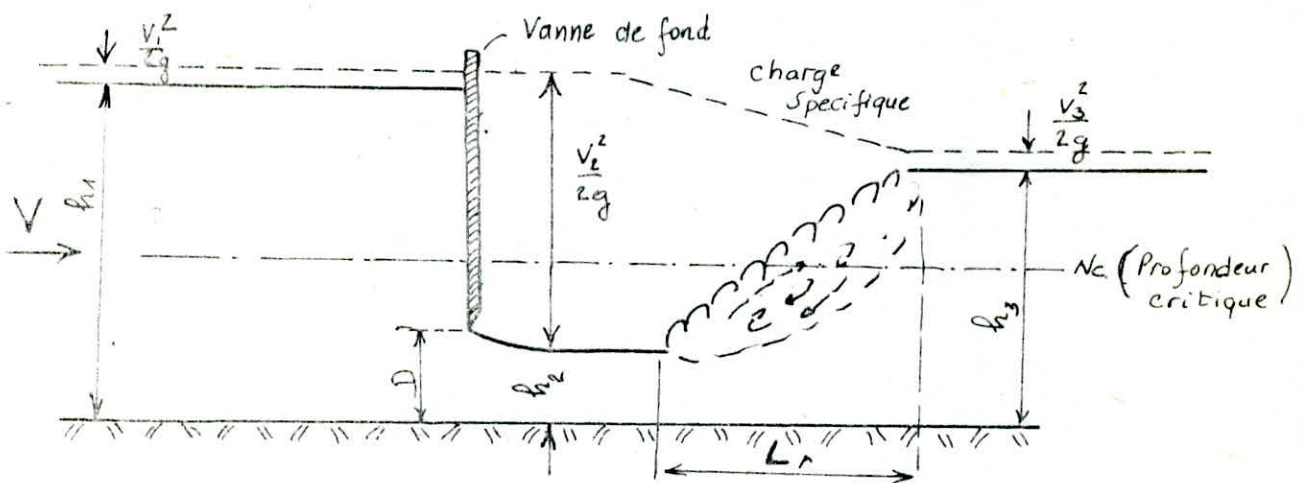
La formule de Manning est utilisée en raison de sa simplicité et elle présente l'avantage d'avoir une forme monôme qui dégage clairement l'influence des divers paramètres ce qui permet des calculs plus simples et réalisables à la règle.

2.2 ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE.

Généralités

Le ressaut hydraulique est une brusque surélévation de la surface libre d'un courant permanent occupant une position fixe dans un lit uniforme. Ce phénomène se produit lorsqu'un régime torrentiel devient fluvial dans une courte distance.

Les surfaces libres se situent nécessairement de part et d'autre du niveau critique.



$\frac{V_i^2}{2g}$: - Charges spécifiques au niveau des sections 1, 2, 3

h_1 : - hauteur à l'amont de la vanne

D : - Ouverture de la vanne

h_2 : - hauteur à l'amont du ressaut

h_3 : - hauteur à l'aval du ressaut

L_r : - longueur du ressaut

lorsque les profondeurs conjuguées (h_1, h_2) sont voisines de la profondeur critique (h_c) dans ce cas on assiste à un ressaut

On a un ressaut noyé ou inondé lorsqu'il apparaît sur le dernier un vortex superficiel évoluant. Dans ce cas la profondeur du courant est inférieure à celle du bief aval.

Relation entre profondeurs conjuguées :

Par la relation suivante on détermine la profondeur conjuguée (h_3) connaissant l'autre (h_2) et le débit unitaire (q).

$$h_3 = \frac{h_2}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8q^2}{g \cdot h_2^3}} - 1 \right]$$

Perte de charge due au ressaut

Pour le cas de notre canal (section rectangulaire) l'expression de la P.d.C est :

$$\Delta H = \left(h_2 + \frac{\alpha q^2}{2g h_2^2} \right) - \left(h_3 + \frac{\alpha q^2}{2g h_3^2} \right)$$

Longueur du ressaut

Plusieurs formules empiriques donnent la valeur de la

Longueur du ressaut (L) en fonction des autres éléments

hydrauliques du ressaut on propose quelques unes :

$$L_r = 5 h_3$$

$$L_r = 9 h_2 \left(\frac{v_1}{g h_2} - 1,57 \right)$$

$$L_r = 6 (h_3 - h_2)$$

Pour l'étude expérimentale du ressaut on se propose alors d'étudier la fonction énergie, et voir comment varie h_3 en fonction de h_2 . À l'aide du tube de Pitot on peut étudier aussi la distribution de vitesses pour le ressaut noyé et ressaut dénoyé.

On peut conclure alors que le ressaut entraînera une perte de charge appréciable et par ailleurs les vitesses à l'aval du ressaut sont très inférieures aux vitesses à l'amont. ces propriétés font utiliser le ressaut comme dissipateur d'énergie, Par exemple pour réduire la vitesse de la lame d'eau à l'aval d'une vanne de fond.

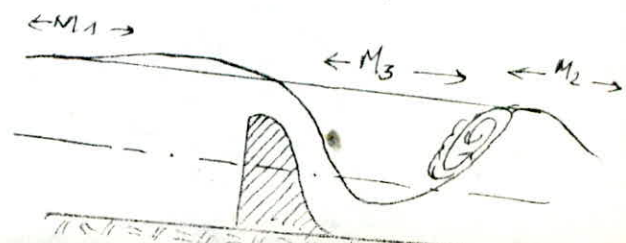
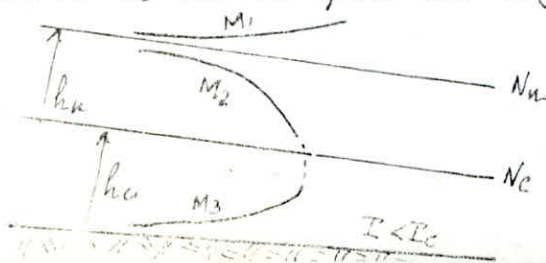
2.3 ETUDE DES MOUVEMENTS GRADUELLEMENT VARIES

Generalités :

Un mouvement graduellement varié est caractérisé par une variation progressive des divers paramètres hydrauliques le long du courant. La courbe représentant la ligne d'eau d'un tel mouvement est généralement appelée courbe de remous si h croît dans le sens de l'écoulement $\frac{\partial h}{\partial s} > 0$ et par conséquent $\frac{\partial u}{\partial s} < 0$. On a affaire à un écoulement graduellement retardé et un remous d'exhaussement. Si h décroît dans le sens de l'écoulement $\frac{\partial h}{\partial s} < 0$ et par conséquent $\frac{\partial u}{\partial s} > 0$; on a affaire à un écoulement accéléré et un remous d'abaissement nous supposons que le canal considéré est uniforme et possède seulement une singularité localisée, cette singularitérompt l'uniformité de l'écoulement et donne à celui-ci un caractère brusquement varié aux abords de la singularité et graduellement varié sur tout le reste du canal.

Formes des courbes de remous

Dans le mouvement graduellement varié les pentes et la courbure de la surface libre sont très faibles et l'on peut admettre, comme dans le régime uniforme, que la distribution des pressions suit une loi hydrostatique. nous donnons les différentes formes possibles de la courbe de remous pour les différentes valeurs de la pente du fond

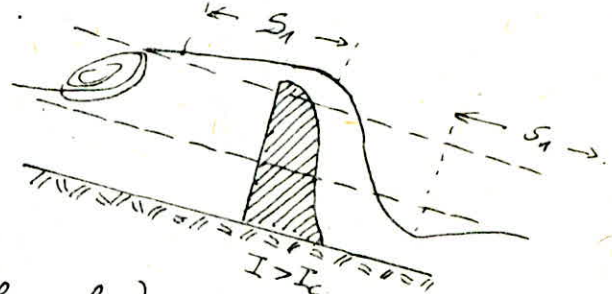
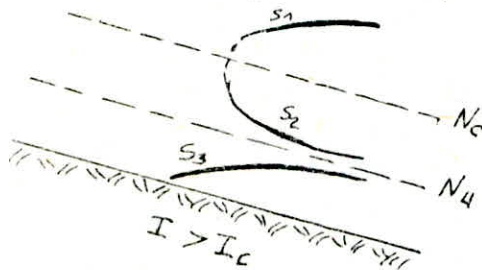


Canal lent ($I < I_c$; $h_n > h_c$) courbe M

Branche M_1 : ($h > h_n$) courbe concave ascendante on trouve cette branche dans l'amont d'un barrage, piles de pont elle tend asymptotiquement vers l'horizontale

Branche M_2 : ($h_n < h < h_c$) la courbe est convexe descendante elle tend vers la profondeur normale vers l'aval on rencontre pour certains cas de changement de pente, en amont d'un élargissement chute brusque.

Branche M_3 : ($h < h_c$) la courbe est concave ascendante on rencontre à l'amont d'un ressaut précédé d'une vanne, quand la profondeur est inférieure à la pente critique, on rencontre aussi en aval de barrage deversoir.

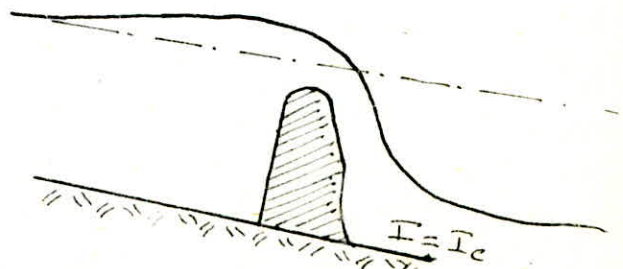
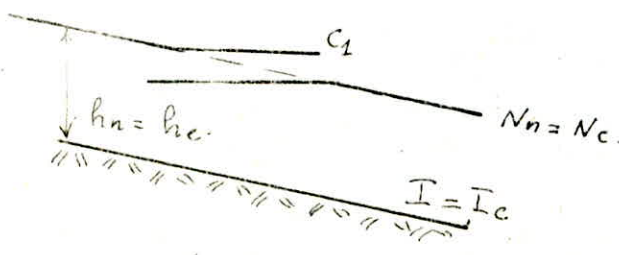


canal rapide ($I > I_c$; $h_n < h_c$) courbe S

Branche S_1 : ($h > h_c$) - La courbe est concave descendante vers l'amont elle naît perpendiculairement au niveau critique, ordinairement après un ressaut vers l'aval, elle tend asymptotiquement vers l'Horizontale on la trouve en amont de barrages et de retrecissements et au environs de certain changement de pente.

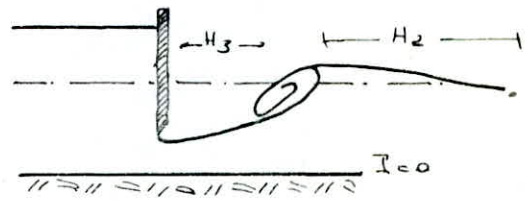
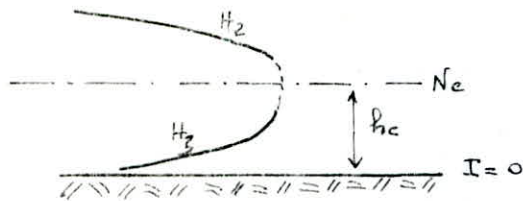
Branche S_2 : ($h_n < h < h_c$) la courbe est concave descendante vers l'amont elle naît perpendiculairement au niveau critique, vers l'aval, elle tend asymptotiquement vers le regime uniforme cette courbe est très courte du point de vue pratique c'est à dire elle tend très vite vers le regime uniforme. on retrouve dans les chutes brusques

Branche S_3 : ($h < h_n$) la courbe est convexe ascendante vers l'aval elle tend asymptotiquement vers le regime uniforme on la trouve en amont de vannes et de barrages deversoirs et dans les diminutions de pentes.



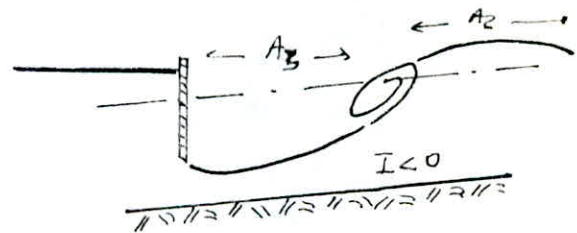
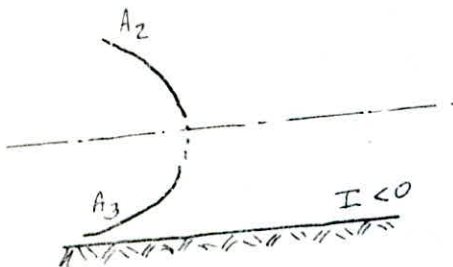
Canal Critique ($I=I_c$; $h_n=h_c$) Courbe C

Branches C_1 et C_3 : elles doivent être comprises, respectivement entre les branches M_1 et S_1 et les branches M_3 et S_3 et les branches M_3 et S_3 . Comme ces branches les unes sont concaves les autres sont convexes alors C_1 et C_3 doivent être obligatoirement horizontales. C'est établi dans ce cas on trouve C_1 dans les mêmes cas que les courbes M_1 et S_1 , la C_3 dans des cas similaires à ceux des courbes M_3 et S_3 .



Canal Horizontal ($I=0$, $h_n=\infty$)

Courbe H : Dans un canal horizontal, on ne peut pas établir le régime uniforme. Cependant on y définit la profondeur critique qui ne dépend que de la géométrie de la section et du débit. Les courbes de remous sont le cas-limite des courbes M_1 lorsque la pente tend vers 0. La branche correspondante à M_1 se déplace vers l'infini on n'obtient les branches H_2 et H_3 que pour des situations analogues à celles des branches M_2 et M_3 . La courbe H a une allure générale parabolique.



Canal en contre pente ($I<0$) Courbe

Courbe A : Comme dans le cas du canal horizontal, on ne définit pas le régime uniforme bien que la profondeur critique reste définie. La courbe A a une allure parabolique. Les deux branches A_2 et A_3 correspondantes aux branches H_2 et H_3 et se présentant de façon analogue à l'absence de la branche A_1 pour ce cas.

Calcul de La Ligne d'eau

le calcul de la ligne d'eau consiste dans l'intégration de l'équation du mouvement graduellement varié obtenue à partir de l'équation de Bernoulli qui s'écrit sous la forme différentielle.

$$\frac{dh}{ds} = \frac{1 - \frac{Q^2 L}{g S^3}}{I - i}$$

S : distance comptée le long du canal à partir d'une section initiale

h : la profondeur d'eau

Q : le débit

L : largeur en surface

S : section mouillée

I : pente du canal

i : perte de charge unitaire $i = \frac{b Q^2}{K \cdot S^2}$

$$b = \frac{1}{C^2} \text{ (Chezy)} \quad C = \frac{1}{n} \cdot K^{1/6}$$

Il existe plusieurs méthodes pour l'intégration de cette équation. pour notre canal on a choisi celle de Bakhteff car elle présente une bonne précision. comme on peut citer d'autres méthodes :

- Méthode par approximations successives
- Méthode de Bresse (canal de largeur très grande)
- Méthode graphique de Kaytchine et CHATELAIN.
- Méthode de SILBER.

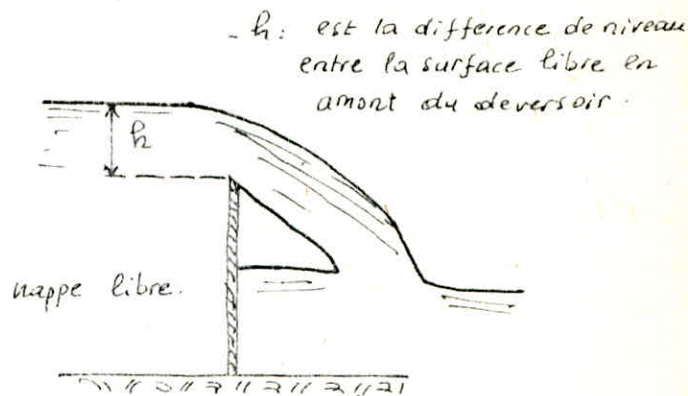
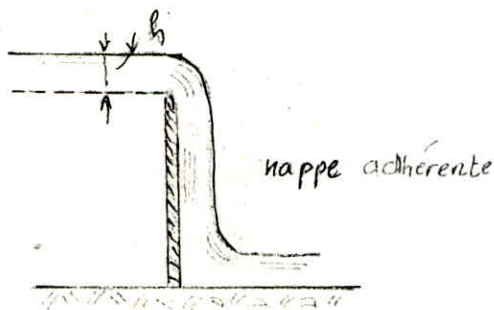
En conclusion dans cette partie de T.P on fait varier la pente du canal pour un certain débit donné, on relève les profondeurs d'eau sur plusieurs sections choisies dans le canal. par la méthode analytique en utilisant une des méthodes citées précédemment on établit une comparaison entre les graphes des lignes d'eau expérimental et théorique.

2.4. ÉCOULEMENTS SUR LES SEUILS,

Dans cette partie on propose comme étude expérimentale la détermination du coefficient de débit et détermination de débit pour toute la gamme de déversoirs dont on dispose

2.4.1 DETERMINATION DU COEFFICIENT DE DÉBIT POUR LES DEVERSOIRS A PAROI MINCE

Les déversoirs sont à paroi mince, quand les dimensions de la partie du seuil qui touche l'eau sont négligeables vis à vis de la hauteur de la nappe déversante, ou à seuil épais dans les autres cas. Cette nappe déversante peut être adhérente (empêchant introduction de l'air ^{ou} dessous d'elle) dans le cas d'une faible charge lorsque la charge augmente la nappe tend à se séparer de la paroi cependant l'air s'introduit sous la nappe déversante devienne une nappe déversante libre (aérée)



Remarque Le déversoir est muni d'un siphon pour aération de la nappe. Il est très étanche et peut être placé à l'intérieur du canal. on peut avoir déversoir avec et sans contraction, latérale

Deversoir sans contraction latérale

Construction d'un tel deversoir comporte certaines conditions :

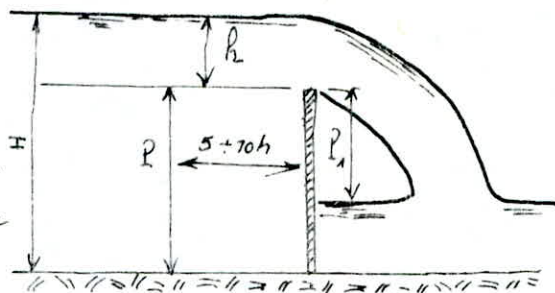
- Il faut éliminer la contraction latérale
- La crête ne doit pas être trop basse et le seuil doit être en mince Paroi.
- La longueur du canal amont doit être égale au moins à $20h$.
- On devra lire la charge à une distance au moins égale à $5h$.

H : charge totale

h : charge deversée

P : Pente (différence de niveau du deversoir et le fond du canal)

P_1 : différence de niveau à l'aval entre niveau libre et niveau supérieur de la pelle



Formule du débit s'écrit alors

$$Q = \frac{2}{3} \cdot \mu' \cdot l \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} = \mu \cdot l \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} = 4,429 \mu \cdot l \cdot h^{3/2}$$

$$Q = \mu \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \cdot l \quad \mu' = \frac{2}{3} \mu$$

Le coefficient du débit s'écrit alors

D'après BAZIN (1848)

$$\mu = \frac{2}{3} \left(0,6075 + \frac{0,045}{h} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+P} \right)^2 \right]$$

D'après Rehbock (1912)

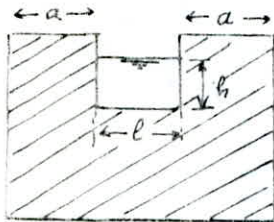
$$\mu = \frac{2}{3} \left[0,605 + \frac{1}{1050h-3} + 0,08 \frac{h}{P} \right]$$

D'après Les ingénieurs et architectes suisses (1947)

$$\mu = \frac{2}{3} \cdot 0,615 \left(1 + \frac{1}{1000h+1,6} \right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{h}{h+P} \right)^2 \right]$$

Deversoir Avec contraction latérale

Construction de tel deversoir présente les mêmes conditions avec le précédent à l'exception que ce dernier présente une contraction de longueur "a" de part et d'autre de l'échancrure



- h : charge deversée
- L : longueur réduite du deversoir
- a : contraction

Le débit donné en unité métriques par l'expression :

$$Q = \mu \cdot l \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} = 4,429 \cdot h^{3/2}$$

Le coefficient du débit d'après les ingénieurs suisses.

$$\mu = \left[0,385 + 0,024 \frac{l}{L} + \frac{2,410 - 2 \left(\frac{l}{L} \right)^2}{h + 1,6} \right] \left[1 + 0,5 \left(\frac{l}{L} \right)^4 \left(\frac{h}{h + p} \right)^2 \right]$$

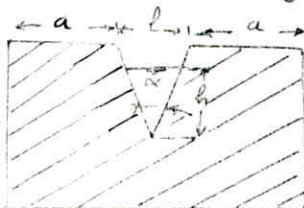
- l : largeur du deversoir
- L : longueur du canal d'alimentation en amont
- h : charge sur le seuil du deversoir
- p : différence de niveau entre le niveau entre le seuil et le fond du canal

Formule du débit d'après FRANÇOIS

$$Q = 1,83 (l - 0,2 h) \cdot h^{3/2}$$

Deversoir triangulaire

Le profil de l'échancrure est un triangle dont la bissectrice intérieure de l'angle des deux joues latérales et généralement verticale. L'angle au sommet (α) varie de 30° à 90°



$$Q = \frac{8}{15} \cdot \mu \cdot h^2 \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \sqrt{2g h}$$

la valeur de μ varie avec le rapport de $\frac{l}{h}$

l : longueur de la crête du triangle (m)

h : hauteur d'eau deversée (m)

Q = débit (m^3/s)

Si $\frac{L}{h} = 2 \Rightarrow p_1 = 0,59 \Rightarrow Q = 1,40 \cdot h^{5/2}$

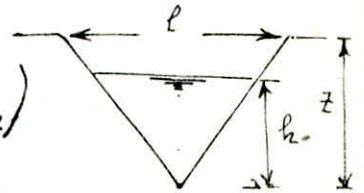
Si $\frac{L}{h} = 4 \Rightarrow p_2 = 0,62$

pour $\frac{L}{h} = 2$
 $\alpha = 90^\circ \} \Rightarrow Q = 1,40 \cdot h^{5/2}$ (Formule de Thompson).
 pour $0,057 < h < 0,18 \text{ m}$

d'après HEYNDRICKS

$$p_1 = (0,5775 + 0,214 h^{-7,25}) \left(1 + \frac{h^2}{l^2 (h+z)^2} \right)$$

l : largeur superficielle



z : hauteur de la pointe de l'échancrure au dessus du fond du canal

D'après Côté on donne la formule du débit

$$Q = \left(0,3065 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} h^{5/2} \cdot \sqrt{2g} + 0,0031 h^{5/2} \sqrt{2g} \right) \left(3,28 h \right)^{-0,0195 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}}$$

pour $\begin{cases} 28^\circ < \alpha < 90^\circ \\ 0,06 \text{ m} < h < 0,41 \text{ m} \end{cases}$

Formule de débit d'après Gourley, Crimp

$$Q = 1,32 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot h^{2,47}$$

Conclusion : pour la détermination du coefficient de débit

on doit faire varier le débit avec la vanne de réglage

on relève les hauteurs d'eau deversés à l'amont des

deversoirs on détermine alors le coefficient d'après

les formules citées ci-dessus. On compare ces résultats

avec les résultats théoriques on calcule l'erreur,

et représenter sur graphiques.

2.4.2 Détermination du débit à travers seuil épais

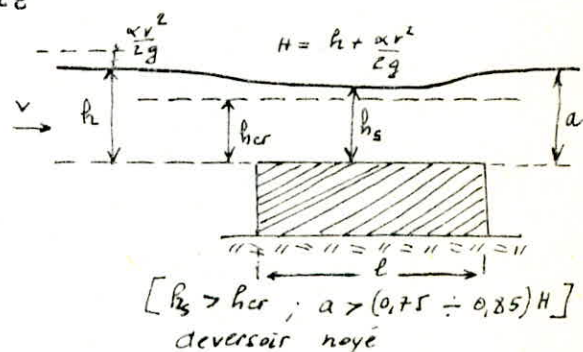
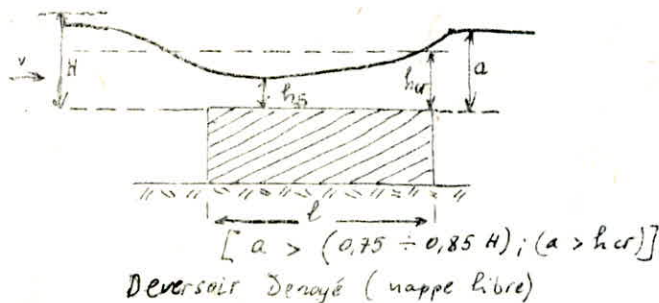
nous disposons de deux déversoirs à seuil épais le déversoir à seuil épais rectangulaire avec arrête arrondie (rectangulaire de Belanger) et seuil fangeux ou triangulaire on se propose comme travail expérimental de détermination du débit d'après le cours "déversoirs"

Déversoir crête épaisse

On dit qu'un déversoir est à seuil épais si la longueur de la crête (partie supérieure) satisfait la relation suivante :

$$l \approx (2 \div 10) h_c$$

Le seuil du déversoir est dénoyé (nappe libre) si la profondeur d'eau h_s est inférieure à la profondeur critique h_{cr} ($h_s \leq h_{cr}$) dans le cas contraire c'est l'inverse. On note que la surélévation du niveau du bief aval au dessus du seuil n'influence pas l'écoulement jusqu'à une certaine limite



Formule du débit (libre et noyé)

$$Q = V.S = \varphi \cdot b \cdot h_s \sqrt{2g(H - h_s)}$$

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} \quad \text{coefficient de vitesse}$$

h_s - la profondeur sur le seuil

expression du débit pour déversoir libre

D'après la théorie de Bélanger et Bakhtmeteff la profondeur sur le seuil (h_s) est égale à : $h_s = \frac{2}{3} H$

Q devient : $Q = 0,385 \cdot \varphi \cdot b \cdot H^{3/2}$

- expression du débit pour déversoir noyé

Dans ce cas on pose que $h_s = a$ la formule s'écrit

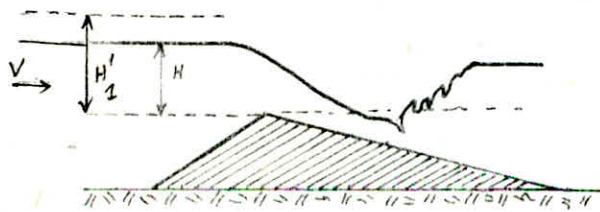
$$Q = \varphi \cdot b \cdot a \sqrt{2g \cdot (H - a)}$$

Remarque : le coefficient φ est fonction de la forme de la crête, de la hauteur du seuil (z/H)

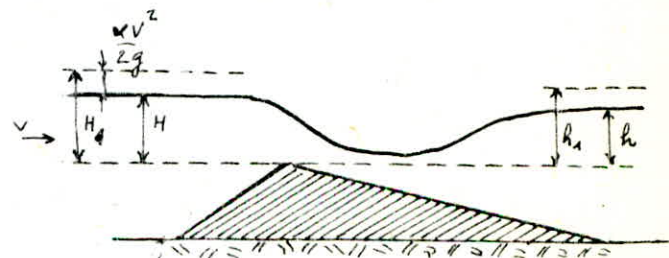
- Si l'aire de la section du courant amont est supérieure à $4 \cdot b \cdot H$ ($S_{\text{amont}} > 4 \cdot b \cdot H$) alors on peut négliger la vitesse d'approche et le calcul devient plus simple. ($H = h$)

Déversoir du type seuil jaugeur

Le seuil jaugeur est un dispositif qui se trouve à la limite entre un canal jaugeur et un seuil déversant (appelé en anglais *Spill. way*).



Déversoir Libre (dénoyé)



Déversoir noyé

Formule du débit : $Q_m = p \cdot b \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{1,5}$

p : coefficient du débit est fonction de la forme et dimensions du déversoir et de la hauteur du seuil.

formule de l'énergie totale

$$H_1 = H + \frac{v^2}{2g} = H + \frac{Q^2}{2g \cdot A^2}$$

facteur de réduction

$$f = \frac{Q}{Q_m}$$

$\left\{ \begin{array}{l} Q : \text{débit (m}^3/\text{s) mesuré sur le débitmètre} \\ Q_m : \text{débit (m}^3/\text{s) analytique} \end{array} \right.$

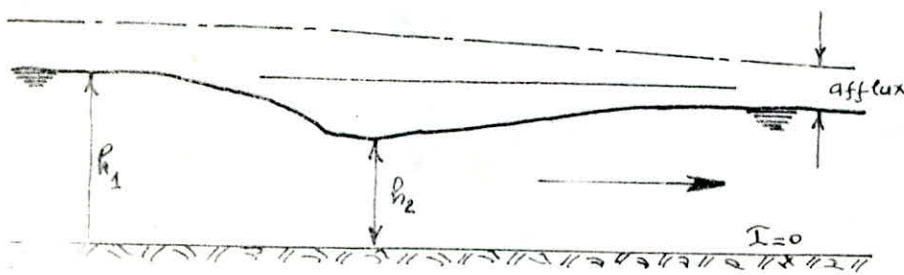
Erreur commise sur le débit en pourcentage

$$E_{rQ} = \frac{Q_m - Q}{Q_m} \cdot 100 \%$$

Conclusion : ces déversoirs sont utilisés pour l'évacuation de gros débits. Pour ces expériences on essaye de représenter graphiquement la courbe d'étalonnage de débit, correspondante à chaque déversoir, en faisant varier le débit par déversoir en fonction de la charge totale de la forme du déversoir et les conditions d'écoulement en amont et aval d'obstacles. on détermine l'erreur du débit créée par défaut de mesure.

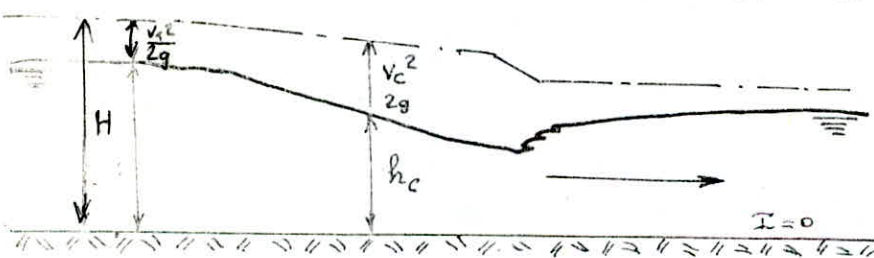
2.5 ETUDE EXPERIMENTALE DU CANAL VENTURI

le canal venturi est essentiellement constitué par une réduction de la section en un point quelconque du canal souvent appelé col dans lequel la vitesse s'accroît ce qui crée une différence de profondeur entre l'entrée de l'appareil et le col



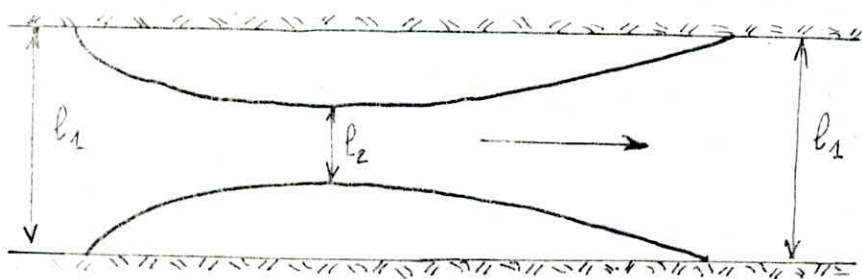
h_1 : hauteur d'eau à l'amont du col
 h_2 : hauteur d'eau au niveau du col

Écoulement noyé



h_c : hauteur critique
 H : charge totale amont

Écoulement critique



vue de dessus du col

l_1 : largeur du canal
 l_2 : largeur réduite du col

Pour l'écoulement type noyé avec $I=0$ section droite rectangulaire on applique Bernoulli :

$$h_1 + \frac{v_1^2}{2g} = h_2 + \frac{v_2^2}{2g}$$

$$v_2 = \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$$

Remarque :

la largeur du col est petite devant (l_1) du canal $\Rightarrow \frac{v_1^2}{2g} \approx 0$

$Q = v_2 l_2 h_2 = l_2 h_2 \sqrt{2g(h_1 - h_2)}$ c'est la relation fondamentale du débit avec les mesures de h_1 et h_2

On fait apparaître le régime critique au col en aura :

$$E_1 = E_2 = h_1 = \frac{3}{2} h_2$$

$$\Rightarrow h_2 = \frac{2}{3} h_1$$

on remarque que le terme $h_2 \sqrt{h_1 - h_2}$ pose des problèmes dans l'expression du débit. pour simplifier cette formule on introduit la valeur h_2 ci dessus en aura en définitive :

$$Q = 0,385 \cdot K \cdot l_1 \cdot \sqrt{2g} \cdot h_1^{1,5}$$

K : coefficient correctif inférieur à 1

Conclusion : le venturi est utilisé pour la mesure des débits des canaux notamment des canaux d'irrigation il est moins précis que le déversoir mais il présente les avantages suivants

- nécessité d'une perte de charge beaucoup plus faible
- éviter les atterrissements à l'amont.

III. Lois de similitude DYNAMIQUE.

3.1 INTRODUCTION :

Lorsque on étudie le projet d'un ouvrage hydraulique on commence par préciser l'ordre de grandeur de nos dimensions en se basant sur celles des ouvrages existants et en tenant compte de l'application à l'écoulement considéré des formules d'hydraulique.

L'idée vient d'essayer de voir "en petit" comme cela se présente en grand, c'est ce qui constitue le principe des essais sur modèles réduits qui ont pris un développement considérable en hydraulique. Les modèles réduits permettent d'effectuer aisément de nombreuses expériences, de les répéter en cas de nécessité ; Enfin les dépenses nécessitent une fraction toujours faible du montant des dépenses et des résultats fournis par le modèle permettent de réaliser des économies de temps et d'argent très importantes pour l'exécution de l'ouvrage.

3.2 Similitude dynamique

Les mouvements du liquide dans le prototype et dans le modèle réduit sont provoqués par des forces ; Pour que les deux systèmes (modèle et prototype) soient dynamiquement semblables, il est donc nécessaire que toutes les forces agissant en des points homologues du modèle et du prototype soient dans le même rapport.

Analyse des forces :

les principales forces qui interviennent en hydraulique sont les suivantes :

En élevant les deux membres de l'équation (1) au carré on a

$$\frac{V_2^2}{V_1^2} = \frac{L_2}{L_1} \quad \text{d'où} \quad \frac{V_2^2}{V_1^2} = \lambda \Rightarrow \frac{V_2^2}{L_2} = \frac{V_1^2}{L_1} \quad (2)$$

en divisant les deux membres de l'équation (2) au carré par "g"

$$\frac{V_2^2}{gL_2} = \frac{V_1^2}{gL_1} = Fr$$

La condition de similitude imposée revient donc à réaliser un écoulement caractérisé par un même nbre de Froude dans le modèle et le prototype

En combinant les similitudes géométriques, cinématique, dynamique nous obtenons les rapports de toutes les caractéristiques de l'écoulement dans le modèle et le prototype.

- Temps : $\lambda_t = \sqrt{\lambda}$

- vitesse : $\lambda_v = \sqrt{\lambda}$

- Débit : $\lambda_Q = \lambda_v \cdot \lambda^2 = \lambda^{3/2}$

- Accélérations : $\lambda_a = \frac{\lambda}{\lambda_t^2} = 1$

- Forces : $\lambda_f = \lambda_m \cdot \lambda_a = \lambda_p \cdot \lambda = \lambda$

- Puissances : $\lambda_p = \lambda_f \cdot \frac{\lambda}{\lambda_t} = \lambda_p \cdot \lambda^{1/2} = \lambda^{3/2}$

$\lambda_p = \frac{\rho_2}{\rho_1} = 1$ (car on a utilisé le même fluide dans les 2 cas)

La similitude de Reech Froude Intervient pour la plupart des écoulements à surface libre.

dans le deuxième cas on aboutit à celle de Reynolds :

$$\frac{L_2 V_2}{\nu_2} = \frac{L_1 V_1}{\nu_1} = R$$

cette condition de similitude de Reynolds revient à dire que R

caractérisant un écoulement doit être le même dans les 2 cas (Modèle et Prototype)

Les rapports caractéristiques sont :

$$\lambda = \frac{D_2}{D_1} = \frac{\mu_2 \cdot \nu_1 \cdot \rho_1}{\mu_1 \cdot \nu_2 \cdot \rho_2} = \lambda_\mu \cdot \lambda_\nu^{-1} \cdot \lambda_\rho^{-1}$$

$$\lambda_\nu = \frac{V_2}{V_1} = \frac{R \cdot \mu_2 \cdot D_2 \cdot \rho_1}{R \cdot \mu_1 \cdot D_1 \cdot \rho_2} = \lambda_\mu \cdot \lambda^{-1} \cdot \lambda_\rho^{-1} \quad (\text{vitesses})$$

$$\lambda_t = \frac{\lambda}{\lambda_\nu} = \lambda^2 \cdot \lambda_\mu^{-1} \cdot \lambda_\rho \quad (\text{temps})$$

$$\lambda_f = \lambda_\mu \cdot \lambda^2 \cdot \lambda^{-1} = \lambda_\mu^2 \cdot \lambda_\rho^{-1} \quad (\text{Forces})$$

$$\lambda_Q = \lambda_\nu \cdot \lambda^2 = \lambda_\mu^2 \cdot \lambda_\rho^{-1} \cdot \lambda \quad (\text{débit})$$

$$\lambda_a = \lambda \cdot \lambda_t^{-2} = \lambda^{-3} \cdot \lambda_\mu^2 \cdot \lambda_\rho^{-2} \quad (\text{accélération})$$

$$\lambda_p = \frac{\lambda_f}{\lambda^2} = \lambda^{-2} \cdot \lambda_\mu \cdot \lambda_\rho^{-1} \quad (\text{pressions})$$

$$\lambda_p = \lambda_f \cdot \lambda_N = \lambda_\mu^3 \cdot \lambda^{-1} \cdot \lambda_\rho^{-2} \quad (\text{puissances})$$

3.4 Domaine d'applications.

Parmi les divers domaines d'applications de ces lois de similitude nous citons :

- Ouvrage longs Découverts
- ouvrage Courts Découverts

3.5 Choix de la similitude Applicable à notre étude.

La loi de similitude applicable à notre étude est celle de Reech - Froude

on peut en effet considérer notre modèle comme ouvrage court tel que les forces dues à la viscosité sont négligeables par rapport à celles dues à l'inertie et à la pesanteur

1. But Du travail

Ces expériences ont pour but d'étudier les écoulements au dessus de singularités. On est amené à vérifier les profondeurs d'eau déterminées expérimentalement vis à vis des hauteurs d'eau déterminées sur la base de calcul analytique. Vérifier ensuite l'exactitude du coefficient de débit dans le calcul de débit par-dessus les déversoirs à crête épaisse.

2. Généralités

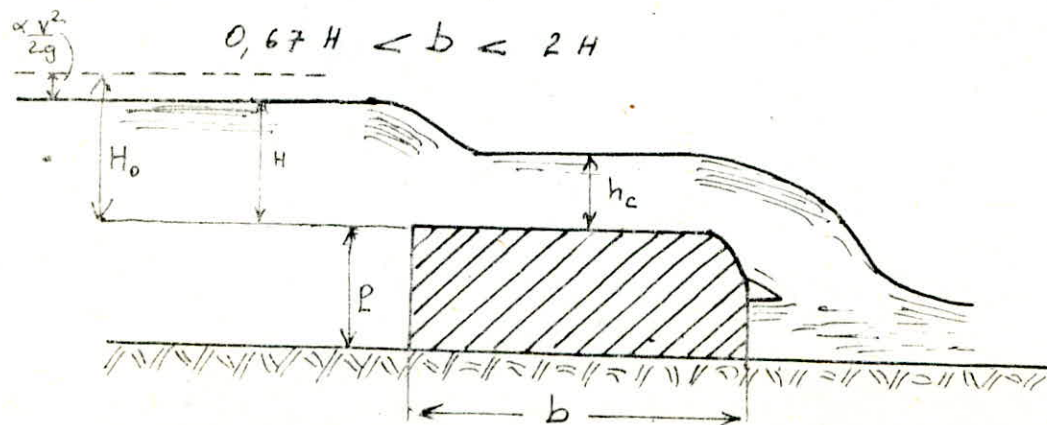
pour faire distinction entre déversoir à paroi mince à celui à paroi épaisse d'après les critères suivants:

On a un déversoir à paroi mince quand les dimensions de la partie du seuil qui touche l'eau, est négligeable vis à vis de la charge.

Dans ce cas $b \leq (0,1 \div 0,5) H$

On a un déversoir à profil pratique (rectangulaire à large seuil), quand l'épaisseur de la crête se trouve dans les limites suivantes:

$$0,67 H < b < 2 H$$



on doit préciser à ce propos que les valeurs des coefficients de débit varie sensiblement selon les divers auteurs. Pour des charges inférieures à $0,15m$ (valeur moyenne de μ), pour des charges plus uniformes, la nappe en aval n'est plus adhérente et le coefficient de débit est égale à $0,328$ environ

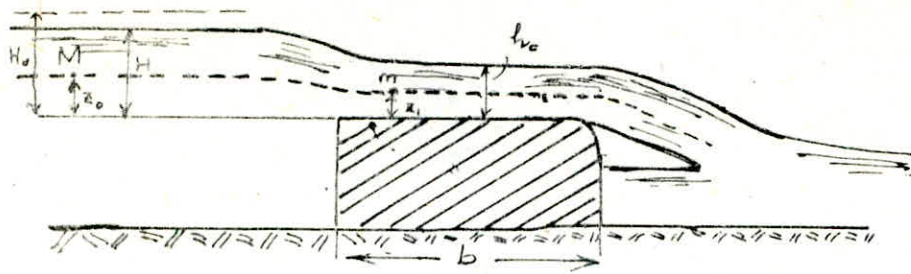
Pour des charges égales à une ou deux fois la largeur le comportement du déversoir est à peu près identique au comportement du déversoir en mince paroi.

Les coefficients précédents augmentent de 10% environ dans les cas suivants :

- L'arrête en amont est chanfreinée à 45° jusqu'à la hauteur de $0,12b$
- L'arrête en amont est arrondie pour un arc de cercle de rayon égale à $0,05b$

3. DESCRIPTION DE L'ÉCOULEMENT ET DÉTERMINATION DE L'EXPRESSION DU DÉBIT

A la suite de l'introduction du déversoir dans le canal la lame d'eau déversante subit une dépression (abaisssement) sur le seuil de ce dernier et prendra une forme d'écoulement régulière en filets de liquide parallèles et horizontaux une convergence de filets liquides provoque une égalisation de vitesses suivant la propriété générale des dispositifs convergents



Entre les points M et N d'un filet liquide nous appliquons le théorème de Bernoulli. avec la charge H_0 ; h : épaisseur de la charge au-dessus du déversoir : on peut écrire :

$$(M) : - H_0 - z_0 = h - z_1 + \frac{v^2}{2g} \quad ; - (N) \quad (1)$$

$$\Rightarrow H_0 - h = z_0 - z_1 + \frac{v^2}{2g} \quad (2) \quad (z_0 - z_1 \approx 0 \text{ p.d.c très faible on peut négliger})$$

$$H_0 - h = \frac{v^2}{2g} \Rightarrow v = \sqrt{2g(H_0 - h)} \quad (3)$$

$$(4) \quad Q = V \cdot A \quad \text{avec } A = l \cdot h \text{ (section rectangulaire)}$$

$$\Rightarrow Q = l \cdot h \cdot \sqrt{2g(H_0 - h)} \quad (5)$$

on introduit la notion de débit maximal pour exprimer h en fonction de H_0 $h = f(H_0)$ pour ne pas la mesurer. quand le débit sera maximal le niveau restera constant au dessus du seuil le niveau d'aval continuant à descendre il y'aura rupture hydraulique entre l'amont et l'aval autrement dit au moment ou le débit atteint sa valeur maximale le niveau d'aval devient indépendant du niveau à l'amont la fonction $Q(h)$ est maximale soit $\frac{\partial Q}{\partial h} = 0$ avec l et H_0 valeurs constantes

on reprend l'équation (5)

$$Q = l \cdot h \cdot \sqrt{2g(H_0 - h)}$$

$$\frac{Q}{h_c} = L \cdot \sqrt{2g} \cdot (H_0 - h_c)^{1/2}$$

$$\frac{\partial Q}{\partial h_c} = 0 \quad (\text{debit maximale}).$$

$$\Rightarrow \frac{\partial (\sqrt{2g} \cdot (H_0 - h_c)^{1/2})}{\partial h_c} = 0$$

$$\text{il vient : } h_c = \frac{2}{3} H_0 \quad (6)$$

on introduit l'équation (6) dans l'équation (1) en aura alors

$$Q = \frac{2}{3} L \cdot H_0 \cdot \sqrt{2g \left(H_0 - \frac{2}{3} H_0 \right)} = \frac{2}{3} L \cdot H_0 \cdot \sqrt{\frac{2}{3} g H_0}$$

L'expression du debit sera en definitive :

$$Q = 0,385 \cdot L \cdot H_0 \sqrt{2g H_0}$$

4. Installation Experimentale

- L'installation experimentale comporte plusieurs accessoires rassembles en un seul lot, disposés de façon adéquate. Ils contribuent tous au bon fonctionnement des travaux experimentaux. L'installation dispose de :
 - canal vitrée réalisée en verre et à fond en acier inoxydable de longueur 2,50m et de 0,08m de largeur
 - d'un bassin d'alimentation en acier inoxydable munit d'une jauge de capacité
 - un groupe moto-pompe refoulant l'eau dans le canal.
 - un debimètre de type platon donnant les valeurs de debit en (l/s)
 - Une vanne (robinet) pour le réglage de debit
 - Deversoir à seuil epais en bois dur dont les parois sont très lisses
 - limnimètre à pointe servant à relever les mesures des hauteurs d'eau
- L'ensemble de ces éléments assurent un écoulement à circuit fermé. Qu'on représente sur un schéma d'ensemble.

5. MODE OPERATOIRE

1. Fixer solidement le deversoir à l'intérieur du canal à environ 1,00m de l'entrée amont du canal (2^{ème} ancrage)
2. Actionner le groupe moto-pompe vérifier l'emploi de débitmètre (purger l'air à l'intérieur du piezomètre à l'aide de vis. d'entrée et sortie) on attend un moment à ce que le régime permanent soit établi
3. Vérifier l'étanchéité du deversoir avec les parois du canal.
4. à l'aide du limnimètre on relève les mesures de la charge H_0 à l'amont du deversoir à une distance au moins égale à $2,5 H_0$ vers l'amont de celui-ci.
et on relève aussi la charge h_c au dessus du seuil du deversoir
5. Effectuer au maximum 12 expériences en effectuant les mêmes opérations on obturont la vanne de réglage de débit
6. Relever les valeurs de débit correspondant à chaque ouverture de la vanne dans le débitmètre
7. on dresse le tableau de mesure (T_1)
8. on dresse le tableau de calcul donnant les valeurs de p , l'erreur de mesure sur les profondeurs d'eau et le débit. (T_2)

6. Formule de Calcul et Présentation des résultats

étant donné H_0 d'après les expériences on pourra déterminer le débit d'après la formule suivante

$$Q = \mu \cdot l \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2}$$

$$H_0 = H + \frac{\alpha v^2}{2g} \quad \text{la charge à l'amont}$$

$$h_c = \frac{2}{3} H_0$$

le coefficient de débit pour déversoir à crête épaisse est donné par Bazin entre 0,37 et 0,39 le débit devient alors :

$$Q = 0,385 \cdot l \cdot H_0 \sqrt{2g H_0}$$

Remarque : En fait le coefficient de débit est déterminé en tenant compte de l'épaisseur b du seuil et de la vitesse de l'eau à l'amont. $\mu' = K \cdot \mu$ avec $\mu = 0,43$

$$K = 0,70 + 0,185 \frac{H}{b} \quad \left(\frac{H}{b} = 1 \right)$$

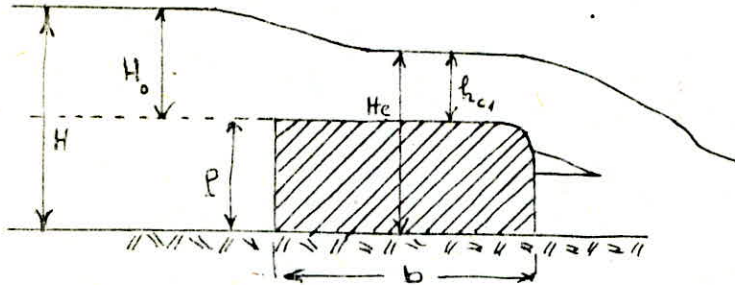
$$\mu' = K \cdot \mu = 0,885 \cdot 0,43 = 0,385 \quad (\text{identique à la formule d'en haut})$$

En outre l'arrête de notre déversoir est arrondie à l'amont du seuil à un quart de cercle d'0,05 de rayon alors on multiplie ce coefficient par (1,12 ÷ 1,14) il vient alors

$$\mu'' = \mu' \cdot 1,12 = 0,385 \cdot 1,12 = 0,42$$

$$\boxed{\mu'' = 0,42} \quad \text{coefficient de débit théorique.}$$

7. TABEAU DE MESURE (T1)



termes constants

$$\begin{cases} P = 10 \text{ cm} & (\text{hauteur du déversoir}) \\ l = 8 \text{ cm} & (\text{largeur du canal}) \end{cases}$$

$$\begin{cases} H_0 = H - P & [cm] \\ h_{c1} = H_c - P & [cm] \end{cases}$$

n° d'expérience	H (cm)	Q (l/s)	H _c (cm)	h _{c1} cm	H ₀ (cm)
1	17,35	2,80	14,72	4,72	7,35
2	16,86	2,65	14,32	4,32	6,86
3	16,56	2,46	14,11	4,11	6,56
4	16,18	2,14	13,95	3,95	6,18
5	15,74	1,98	13,69	3,69	5,74
6	15,4	1,84	13,18	3,18	5,4
7	14,87	1,59	12,94	3,94	4,87
8	14,63	1,45	12,90	2,9	4,63
9	13,77	1,05	12,48	2,48	3,77
10	13,66	1,02	12,15	2,15	3,66
11	13,0	0,74	11,84	1,84	3,0
12	12,64	0,66	11,57	1,57	2,64

Erreur commise sur Q en pourcentage (%).

$$E_r Q = \frac{Q_{calculé} - Q_{mesuré}}{Q_{calculé}} \cdot 100$$

Erreur commise sur h_c en pourcentage (%)

$$E_r h_c = \frac{h_{c, calculé} - h_{c, mesuré}}{h_{c, calculé}} \cdot 100$$

Coefficient p . mesuré sera déterminé par la formule simplifiée suivante :

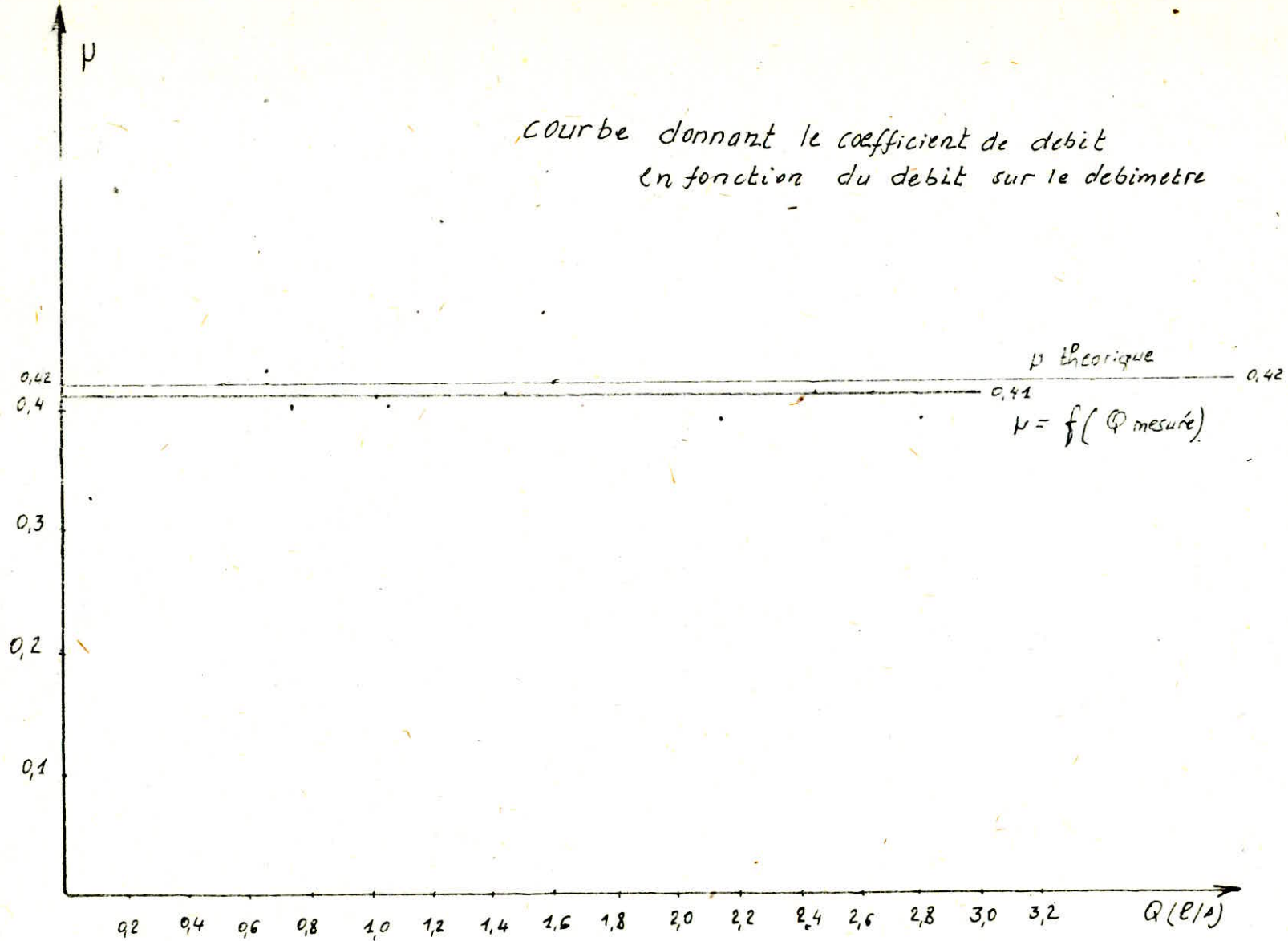
$$Q_{mes} = \mu \cdot l \cdot \sqrt{2g} \cdot H_0^{3/2} \Rightarrow p = \frac{Q_{mesuré}}{H_0^{1,5}} \cdot \frac{1}{l \cdot \sqrt{2g}}$$

$$p = 2,82 \cdot \frac{Q_{mesuré}}{H_0^{1,5}} ; h_{c2} = \frac{2}{3} H_0$$

Tableau de calcul $T_{(2)}$

no d'expérience.	$Q_{calculé}$	h_{c2}	$E_r Q$ en %	$E_r h_c$ en %	$p_{mesuré}$
1	3,0	4,9	6,66	3,67	0,396
2	2,7	4,57	1,85	5,47	0,415
3	2,52	4,37	2,38	5,95	0,413
4	2,30	4,12	6,95	4,12	0,393
5	2,06	3,82	3,88	2,4	0,410
6	1,88	3,6	2,12	11,6	0,413
7	1,61	3,246	1,24	9,25	0,417
8	1,50	3,08	3,33	5,84	0,410
9	1,1	2,51	4,5	1,31	0,404

-42-



échelle { - verticale 1 : 5
- horizontale 1 : 20

Suite du Tableau 2 (T₂)

10	1,05	2,44	2,85	11,8	0,410
11	0,78	2	5,12	8,00	0,401
12	0,64	1,76	3,12	10,8	0,433

7 Conclusion

après plusieurs mesures faites, on a constaté que les résultats sont assez bons du fait qu'ils correspondent aux résultats théoriques.

$\mu = 0,41 \rightarrow$ coefficient expérimental

$\mu = 0,42 \rightarrow$ Coefficient théorique

L'erreur commise sur μ est en Pourcentage :

$$E_p = \frac{\mu_{th} - \mu_{exp}}{\mu_{th}} \cdot 100 = \frac{0,42 - 0,41}{0,42} \cdot 100$$

$$E_{r\mu} = 2,38 \%$$

cette erreur ^{est} admissible

(1) BUT DU TRAVAIL

La détermination expérimentale des paramètres du ressaut :
 hauteur conjuguées, longueur du ressaut, perte d'énergie dans
 le ressaut, comparaison avec les résultats théoriques.

Représentation graphique de la fonction du ressaut, $h = f(\theta)$

Représentation graphique de la fonction énergie du ressaut $h = f(E)$

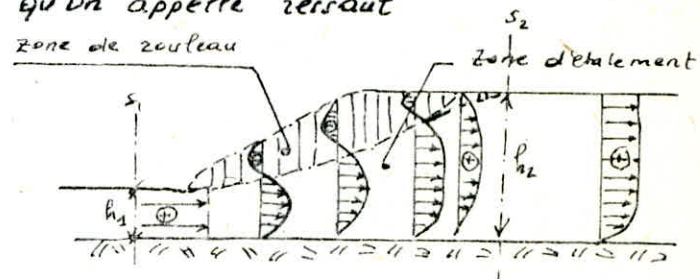
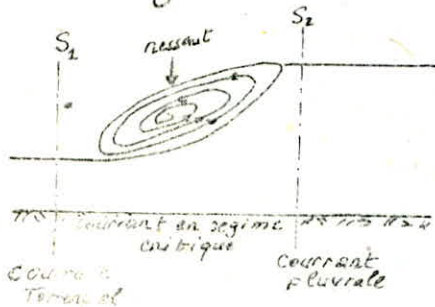
(2) ÉCOULEMENT RAPIDEMENT VARIÉ

Un écoulement est dit rapidement varié lorsque les courbures
 des lignes de courant et de la surface libre ne sont plus
 négligeables et lorsque la vitesse varie rapidement d'une section à l'autre.
 Il n'est plus possible dans ce cas d'admettre que les vitesses restent
 constantes et parallèles à une direction fixe dans une même section,
 et que la répartition des pressions est hydrostatique ($z + \frac{p}{w} = \text{cte}$)

La notion de charge dans une section perd tout intérêt.

(3) RESSAUT HYDRAULIQUE

Le passage de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial
 par une élévation brusque du niveau ou l'écoulement du niveau cesse
 d'être graduellement varié et qu'on appelle ressaut.



On prend pour origine du ressaut une telle section du courant torrentiel en amont du ressaut dans laquelle elle existe encore l'épure de repartition des vitesses correspondant à l'écoulement du liquide graduellement varié (s_2)

On prend la section pour l'extrémité du ressaut dans laquelle se termine en général l'accroissement des profondeurs et la repartition des vitesses du courant fluviale diffère peu de celle correspondant à l'écoulement graduellement varié on distingue deux zones :

— Zone d'étalement : animée de mouvement de translation à brusque élargissement en verticale.

— Zone de rouleau : animée de mouvement rotatif d'un courant saturé d'air.

Les profondeurs dans les sections (1) et (2) limitant le ressaut sont appelées profondeurs conjuguées. La grandeur $a = h_2 - h_1$ est appelée hauteur du ressaut. La distance entre les sections (1) et (2) est appelée longueur du ressaut. on distingue les types de ressaut suivants :

Ressaut parfait : on rencontre pour canal à pente uniforme et à rugosité ordinaire, on observe clairement les 2 zones

Ressaut ondulé : ce ressaut se présente sous forme d'ondes tendant à s'amortir vers l'aval. ($a < y'$) (fig 1)

Ressaut à remous : surgit à l'entrée d'obstacles en forme de gradin et présente un remous due à l'étranglement en longueur caractérisé aussi par le jet de transit (fig 2)

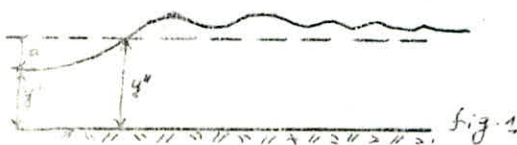


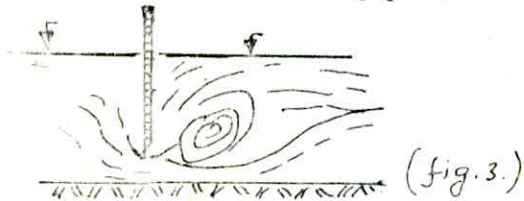
fig 1



fig 2

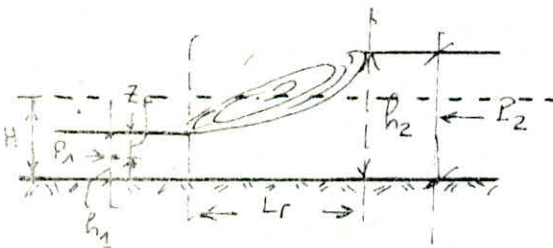
Ressaut noyé : ce type de ressaut surgit uniquement en étouffement par dessous la vanne et à zone superficielle développé. (fig 3)

Ressaut non noyé (ou superficielle) : ce ressaut à un rouleau de fond qui est caractérisé par une répartition particulière des vitesses en section différente de celle du ressaut parfo (fig. 4)



(4) EQUATION FONDAMENTALE DU RESSAUT

on prend par hypothèses : radier est horizontale, frottement sur le fond négligeable ; alors l'équation de quantité de mouvement sera :
(on considère ressaut sous la vanne).



$$P_2 - P_1 = \rho Q (\beta v_2 - \beta v_1)$$

$$\phi_i = S_i \cdot Z_{ci} \cdot \bar{w}$$

avec Z_c - distance du centre de gravité de la section considérée à la surface libre

$$S_1 \cdot Z_{c1} + \frac{\rho \cdot Q^2}{g \cdot S_1} = S_2 \cdot Z_{c2} + \frac{\rho \cdot Q^2}{g \cdot S_2}$$

$$\Theta = S_i \cdot Z_{ci} + \frac{\rho \cdot Q^2}{g \cdot S_i} \dots \text{c'est l'expression de la fonction profondeur du ressaut}$$

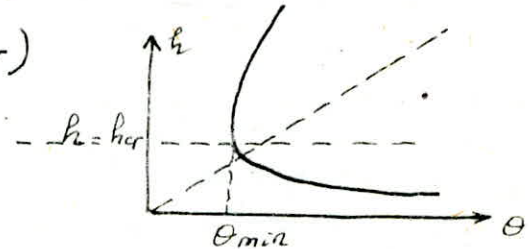
dans le cas général $\Theta = f(\text{forme du canal}, Q, h)$

Par exemple ; section est rectangulaire

$$S = B \cdot H ; \quad Z_c = \frac{h}{2} \quad \text{si } q = \frac{Q}{B}$$

$$\Theta_1 = \frac{\Theta}{B} = \frac{h_1^2}{2} + \frac{\beta q^2}{g \cdot h_1}$$

Comme on montre l'analyse la fonction Θ a la minimum pour $h_1 = h_{cr}$ ($h_1 = h_2 = h_{cr}$)



ainsi l'équation du ressaut

$$\Theta(h_1) = \Theta(h_2)$$

Par exemple on donne le débit et une profondeur d'eau alors il facile de déterminer l'autre profondeur conjuguée

$$\frac{h_1^2}{2} + \frac{q^2}{g \cdot h_1} = \frac{h_2^2}{2} + \frac{q^2}{g \cdot h_2}$$

$$\Rightarrow h_2^2 + h_1 h_2 - \frac{2 q^2}{g \cdot h_1} = 0$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8 q^2}{g \cdot h_1^3}} - 1 \right] \quad \text{ou} \quad h_1 = \frac{h_2}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{8 q^2}{g \cdot h_2^3}} - 1 \right]$$

$$h_2 = \frac{h_1}{2} \left[\sqrt{1 + 8 \left(\frac{h_{cr}}{h_1} \right)^3} - 1 \right]$$

Longueur du ressaut

problème de détermination de la longueur n'est pas encore résolu théoriquement

$$L = (4 \div 5) (h_2 - h_1) \quad \text{formule expérimentale}$$

Pour canal rectangulaire

$$L = 2,5 (1,9 h_2 - h_1) \quad \text{formule de Pavlovski}$$

$$L = \left(8 - 0,5 \frac{h_2}{h_1} \right) (h_2 - h_1) \quad \text{formule générale}$$

Longueur en aval du ressaut L_{avr}

$$L_{avr} = (2,5 \div 3) L_{ressaut}$$

Pentes d'énergie dans un ressaut

$$h_p = E_1 - E_2 = \left(h_1 + \frac{\alpha v_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{\alpha v_2^2}{2g} \right)$$

Pour Les canaux rectangulaires

$$h_p = \frac{(h_2 - h_1)^3}{4 \cdot h_1 \cdot h_2}$$

(5) Installation EXPERIMENTALE

L'installation expérimentale comporte les accessoires suivants :

- Canal : est en forme rectangulaire le fond du canal est élaboré en une poutre caisson Les parois latérales en verres
- Bassin d'alimentation : est construit en acier inoxydable est jaugé, la partie supérieure est en forme de cuvette
- Groupe Moto-pompe : est à axe verticale alimenté en courant triphasé (380V) alternatif refoulant l'eau dans le canal
- Débitmètre : de type platon est à diaphragme à deux Piezomètres amont et aval l'anneau se déplaçant par différences de pression pour indiquer le débit véhiculé
- Vanne de réglage de débit : pour maximiser ou minimiser le débit
- Curve de tranquillisation : répartissant des courants parallèles
- Limnimètre : pour effectuer les mesures des hauteurs d'eau
- Vanne de fond : obstacle introduit dans le canal pour créer le ressaut.

- (1) - Fixer la vanne de fond dans la mi-longueur du
- (2) - Actionner le groupe Moto - pompe est vérification de l'époque de la vanne

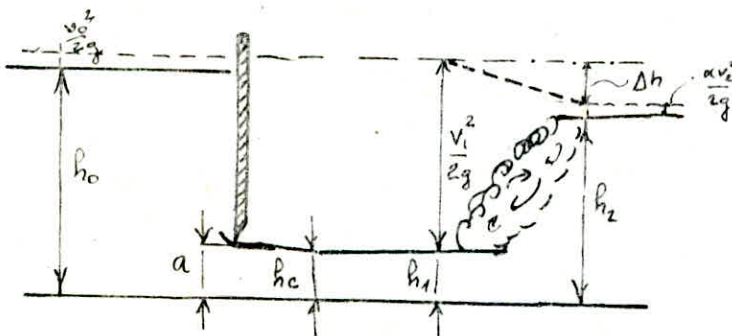
Remarque : on a constaté que la vanne n'est pas étanche il faudra introduire des joints transversal entre la vanne et le canal.

- (3) - Relever les hauteurs conjuguées du ressaut sa longueur la hauteur d'eau à l'amont de la vanne le débit dans le débitmètre, correspondant à chaque ouverture de la vanne robinet

- (4) - Dresser un Tableau de Mesure T_1 et le tableau de valeur donnant E, Q . (E, Q énergie et fonction du ressaut)

- (5) - Représenter sur graphique $h = f(E)$, $h = f(Q)$

- (7) Présentation des résultats et Formules de calculs



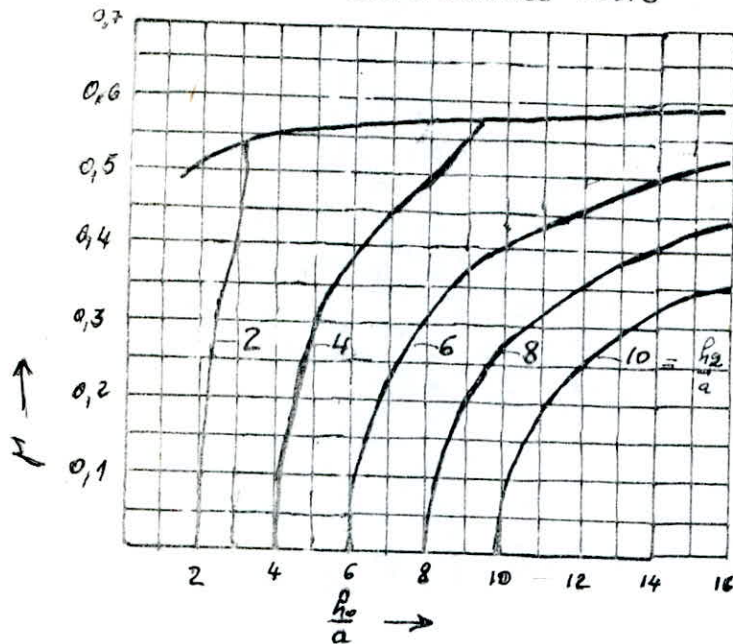
a : levée de la vanne

E' : coefficient de contraction

$$h_c = E' \cdot a \quad (\text{hauteur contractée})$$

$$Q = M \cdot a \cdot b \cdot \sqrt{2g h_0} \quad (\text{débit sous la vanne}).$$

Valuers des coefficient en fonction du rapport $\left(\frac{h_0}{a}\right)$
Deversement libre



Coefficient de debit de vannes verticales

Valuer du coefficient de contraction verticale en
ecoulement sous la vanne :

$\frac{a}{h_0}$	0,10	0,15	0,20	0,25	0,30	0,35	0,40	0,45	0,50	0,55
ϵ'	0,615	0,618	0,620	0,622	0,625	0,628	0,630	0,638	0,645	0,650

Tableau de mesure T_1 $a = 0,3 \text{ cm}$.

N° EXPERIENCE	$h_0 \text{ (cm)}$	$h_1 \text{ (cm)}$	$h_2 \text{ (cm)}$	$L \text{ (cm)}$	$Q_{\text{debitmètre}} \text{ (l/s)}$
1	19,03	2,48	8,39	23	2,3
2	16,55	2,35	7,86	19	2,1
3	14,12	2,18	7,22	18	1,95
4	12,18	2,14	6,51	17	1,8
5	10,00	2,08	5,54	13	1,6
6	07,51	2,04	5,25	10	1,4
7	05,58	1,91	4,46	09	1,2

Tableau de calcul T_2

N° Experience	h (m)	θ (m)	E (m)
1	0,0839	0,00356	0,090
2	0,0786	0,00313	0,086
3	0,0722	0,00265	0,081
4	0,0651	0,00216	0,076
5	0,0556	0,00160	0,070
6	0,0525	0,00142	0,069
7	0,0443	0,0010	0,068

on maintient Q constant on faisant varier h on remplit les colonnes θ , E d'après les formules de calculs suivantes :

$$\theta = \frac{h^2}{2} + \frac{\alpha Q^2}{g \cdot h} \quad q: \text{debit unitaire (m}^2/\text{s)}$$

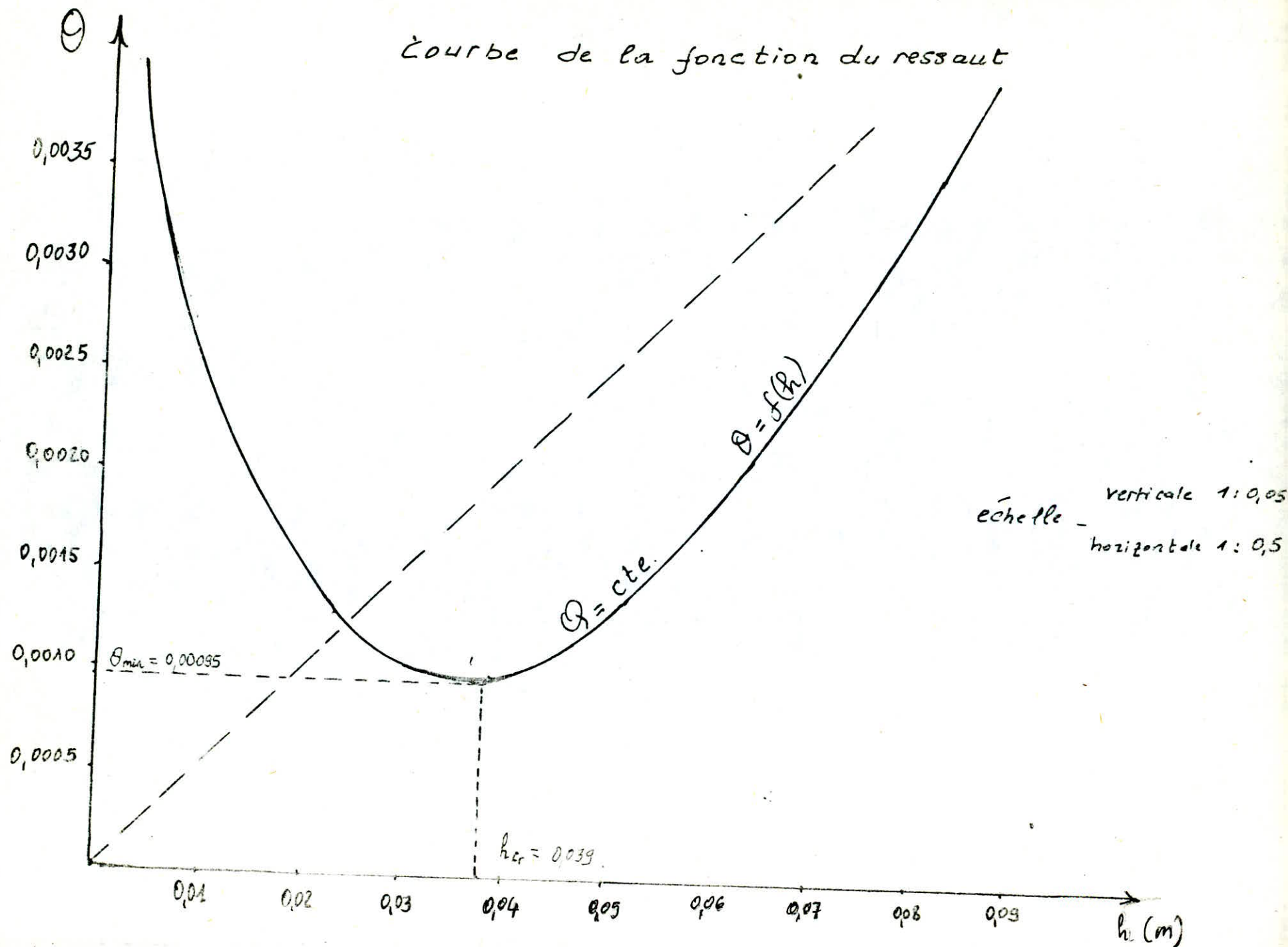
$$E = h + \frac{\alpha v^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2 \cdot g \cdot h^2}$$

$$Q = 2,3 \text{ l/s} \quad \text{avec } b = 0,08 \text{ m} \Rightarrow q = 0,02875 \text{ m}^2/\text{s}$$

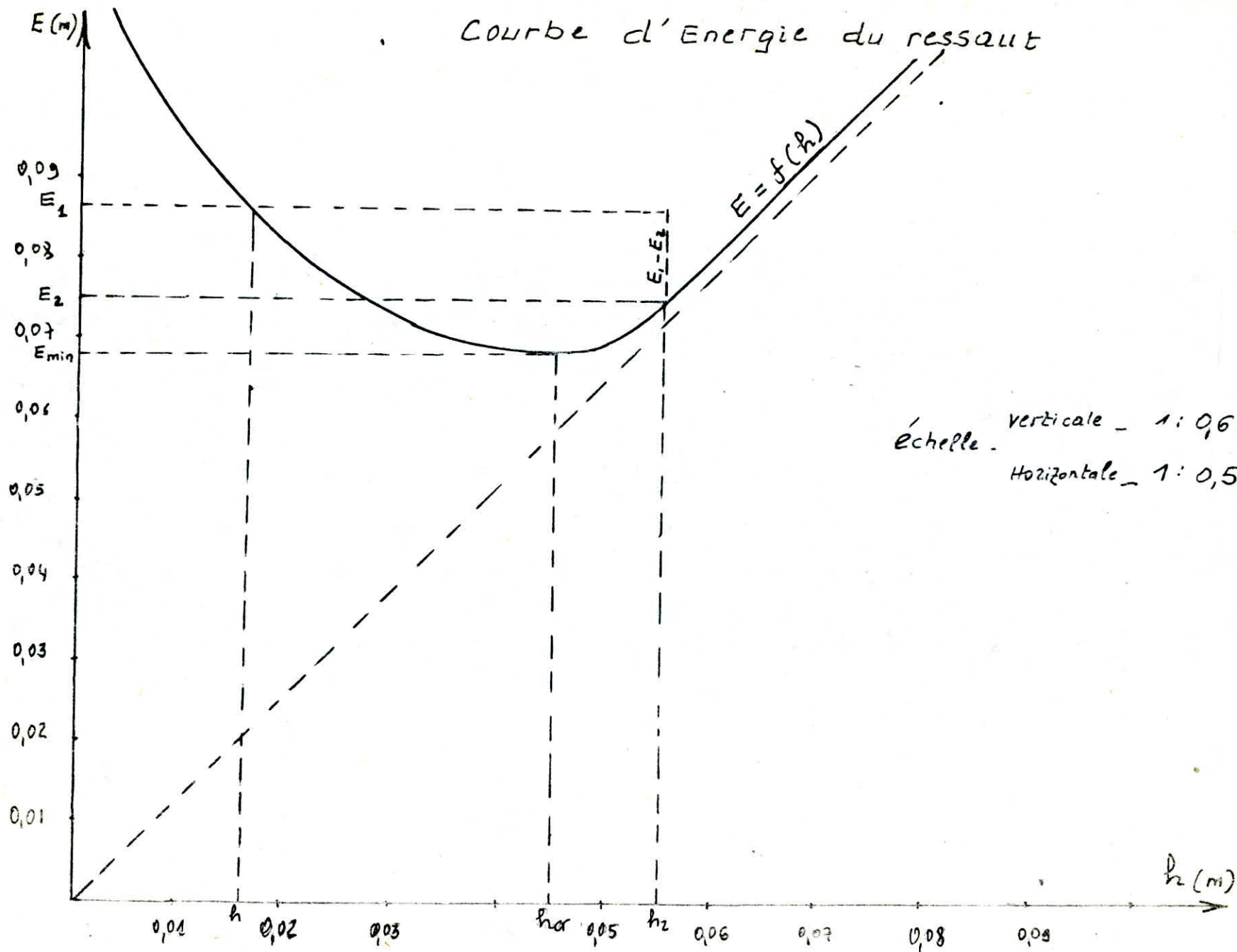
$$h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}} = \sqrt[3]{\frac{(0,02875)^2}{9,81}} = 0,0438 \text{ m}$$

$$h_{cr} = 0,0438$$

Courbe de la fonction du ressaut



Courbe d'Energie du ressaut



§ 8. Conclusion

L'étude expérimentale du ressaut en canal uniforme de section rectangulaire et de pente négligeable fournit un bon exemple d'utilisation des courbes $\Theta = f(h)$ et $E = f(h)$ pour un débit donné

On remarque que d'après la courbe $\Theta = f(h)$ on peut déterminer graphiquement l'une des hauteurs conjuguées en connaissant l'autre. On constate en particulier que les deux profondeurs conjuguées varient toujours en sens inverse l'une par rapport à l'autre. du graphique $E = f(h)$ on pourra déterminer la perte de charge due au ressaut en mesurant sur la courbe la différence des ordonnées des points d'abscisse h_1 et h_2 . $(E(h_1) - E(h_2))$.

§. 1

BUT DU TRAVAIL

La détermination expérimentale des lignes d'eau à la suite de variation de la pente du lit du canal, vérification avec les lignes d'eau établies sur la base de calcul analytique (classique) par la méthode de Bakhmetteff.

Vérification des débits à l'aide du débitmètre de l'installation avec les débits déterminés expérimentalement par l'emploi du déversoir à paroi mince.

représentation graphique des courbes de remous d'après les données expérimentales et théoriques.

§. 2 MOUVEMENT Graduellement varié (Généralités)

Le régime uniforme apparaît dans les canaux où la pente du radier et la pente de la surface libre sont uniformes, la profondeur de l'eau et la vitesse moyenne sont de ce fait constants sur toute la longueur du canal.

Le régime non-uniforme apparaît dès qu'une des conditions nécessaires au régime uniforme n'est plus respectée, c'est à dire lorsque la profondeur du canal ou la pente de la surface libre ne sont plus constantes sur toute la longueur du canal.

Le régime fluvial apparaît lorsque la profondeur du canal est supérieure à la profondeur critique tandis que le régime torrentiel apparaît dès que la profondeur du canal est inférieure à la profondeur critique.

Rappelons qu'un mouvement est graduellement varié lorsque les paramètres (section, profondeur) hydrauliques se modifient d'une manière progressive le long du courant. La courbe représentant la ligne d'eau d'un tel mouvement est souvent appelée courbe de remous. le remous en un point est la différence ($h - h_n$) entre la profondeur normale du régime uniforme pour le débit considéré. Il y a remous d'exhaussement lorsque la ligne d'eau est au dessus du niveau normale du régime et remous d'abaissement dans le cas contraire. nous raisonnerons pour un canal rectangulaire de longueur 2,50m possédant deux singularités rompant l'uniformité de l'écoulement et donnant à celui-ci un caractère brusquement varié

Propriétés de la Ligne d'eau

L'étude de la ligne d'eau d'un courant graduellement varié se fera à partir de l'équation différentielle de cette ligne :

$$\frac{dh}{dx} = I \frac{1 - \frac{J}{I}}{1 - \frac{Q^2 L}{g R^3}}$$

{

R : section mouillée
 I : pente du canal
 Q : débit
 x : abscisse d'une section choisie
 h : hauteur maximale de la section

} termes des

Dans cette expression S, L, J sont en fonctions de h J est donné par la relation suivante :

$$J = \frac{b Q^2}{R^2 \Omega^2}$$

Les courbes résultantes de cette équation sont données en fonction de

la pente du lit du canal (I_c : pente critique)

$$I > 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{classe F pour } I < I_c \quad (h_n > h_c) \rightarrow \text{fig 1 régime Fluvial} \\ \text{classe T pour } I > I_c \quad (h_n < h_c) \rightarrow \text{fig 2 " torrentiel} \\ \text{classe C pour } I = I_c \quad (h_n = h_c) \rightarrow \text{fig 3 " critique} \end{array} \right.$$

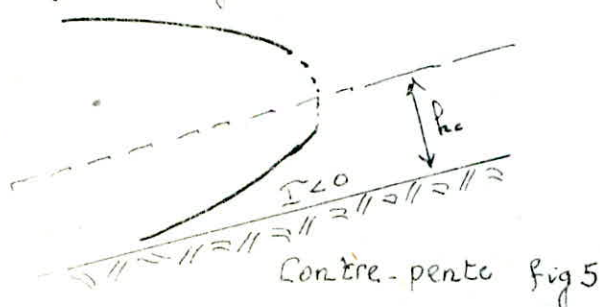
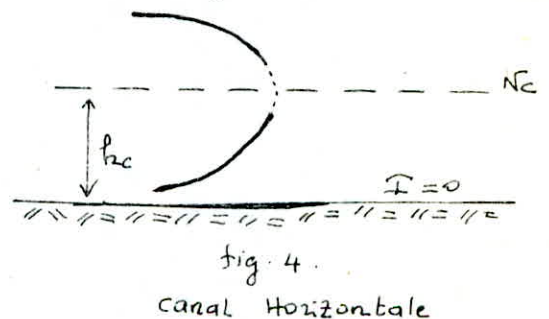
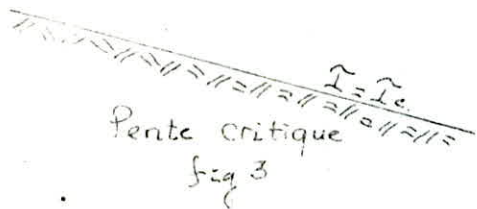
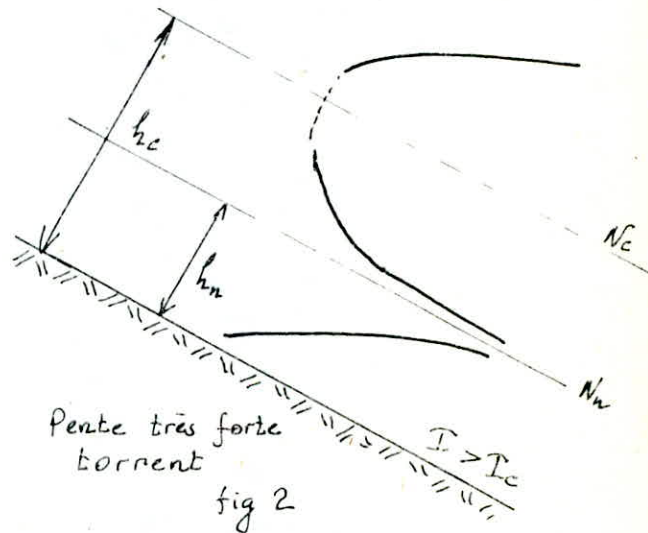
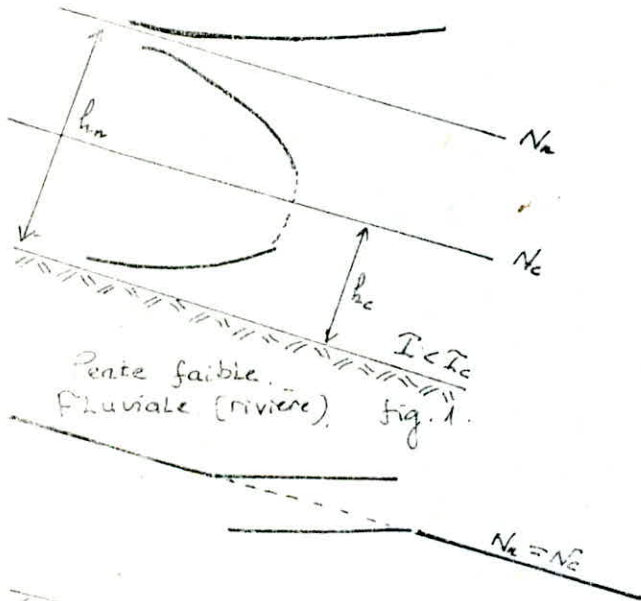
et

$$I \leq 0 \quad \left\{ \begin{array}{l} \text{classe H} \rightarrow I = 0 \quad (h_n = \infty) \text{ canal horizontal fig. 4} \\ \text{classe A} \rightarrow I < 0 \quad (h_n = \infty) \text{ canal ascendant fig. 5} \end{array} \right.$$

On continue a considerer comme des données le debit Q et la pente I et la rugosité du lit du canal, Les variables sont l'abscisse x et la profondeur h , le second membre est une fonction de h

$$s - s_0 = \int_{h_0}^h f(h) \cdot dh.$$

on pourra effectuer cette integration Uniquement avec quelques cas simples, méthode de Bresse (canal de section rectangulaire de largeur très grande et profondeur peu variable). on pourra aussi procéder par d'autres methodes (graphique, Bakmeteff, Silber Pavlovsky...)



Méthode de calcul de courbe de remous d'après Bakhmeteff

Bakhmeteff a introduit la notion de débitance "B" définie par

$$B^2 = A \cdot h^n \quad (1) \quad \text{avec } n: \text{exposant hydraulique et } A = \text{cte}$$

Le module de débit s'établit par :

$$K = \frac{1}{n} \frac{S^{5/3}}{P_m^{2/3}} = C \cdot h^{x/2} \quad (2) \quad \begin{array}{l} C: \text{coefficient qui est constant} \\ x: \text{exposant hydraulique} \end{array}$$

On reprend l'équation différentielle pour écoulement graduellement

$$\text{varie :} \quad \frac{dh}{ds} = i \frac{1 - \frac{7}{2}}{1 - f} \quad (3)$$

introduisons notion d'écoulement normale.

pour la profondeur normale h_n correspond K_0 module du débit qu'on représente

$$Q = K_0 \sqrt{i} \quad \text{et} \quad Q = K \sqrt{J}$$

$$\text{alors} \quad \frac{7}{2} = \left(\frac{Q}{K} \right)^2 ; \quad \left(\frac{Q}{K} \right)^2 = \left(\frac{K_0}{K} \right)^2 \quad (4)$$

$$f = \frac{\alpha \cdot Q^2 \cdot B}{g \cdot S^3} \quad \text{Transformons cette fonction}$$

$$\Rightarrow f = \frac{\alpha \cdot K_0 \cdot i}{g \cdot S} \cdot \frac{C^2 R_h}{S^2 C^2 R_h} = \frac{\alpha \cdot i \cdot C^2 \cdot B}{g \cdot P_m} \left(\frac{K_0}{K} \right)^2 = j \left(\frac{K_0}{K} \right)^2 \quad (5)$$

$$\text{avec } j = \frac{\alpha \cdot i \cdot C^2 \cdot B}{g \cdot P_m} \quad \text{avec } \left(P_m = \frac{S}{R_h} \right) \Rightarrow j = f(h).$$

$$\text{On pose } \eta = \frac{h}{h_n} \quad (\text{Profondeur relative}) \Rightarrow dh = h_n d\eta \quad (6)$$

a partir des relations 3, 4, 5, 6 l'équation de la surface libre

prend une autre forme

$$h_n \frac{d\eta}{ds} = i \frac{1 - \eta^{-x}}{1 - j \eta^{-x}} = i \frac{\eta^x - 1}{\eta^x - 1} \quad (7)$$

séparation des variables il vient :

$$\frac{i}{h_n} ds = \frac{\eta^x - 1}{\eta^x - 1} d\eta = \left(1 - 1 + \frac{\eta^x - 1}{\eta^x - 1} \right) d\eta = \left(1 + \frac{1 - j}{\eta^x - 1} \right) d\eta \quad (8)$$

Pour l'intégration de cette équation (8) il faudra choisir 2 sections voisines avec j (entre ces deux sections) constant il vient alors :

$$\frac{i(\Delta z - \Delta_1)}{h_n} = z_2 - z_1 + (1-j) \int_{z_1}^{z_2} \frac{dz}{z^x - 1}$$

Poseons $\int \frac{dz}{z^x - 1} = \phi(z) = \int_0^z \frac{dx}{1 - z^x}$

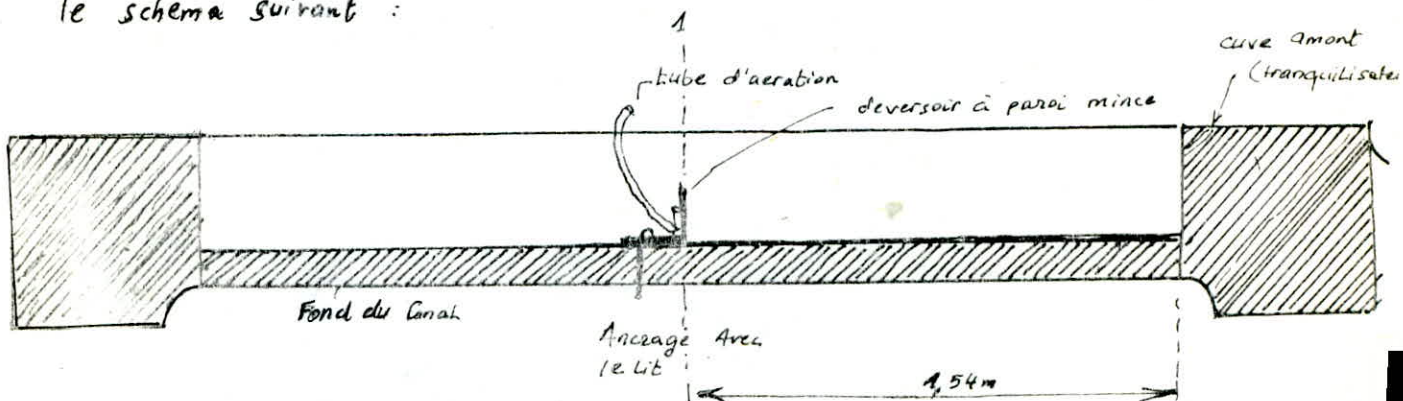
on aura alors :

$$\frac{i(\Delta z - \Delta_1)}{h_n} = z_2 - z_1 - (1-j) [\phi(z_2) - \phi(z_1)]$$

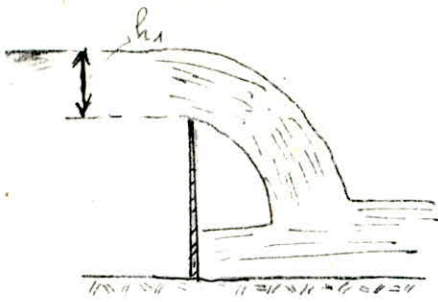
C'est l'équation de Bakhteff pour l'écoulement graduellement varié qui permet de calculer les courbes de remous

§.3 Deversoir utilisé.

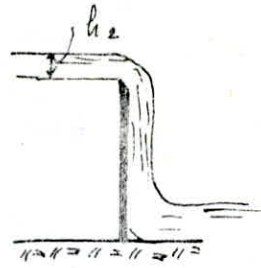
Vu que la longueur du canal est très restreinte et pour mieux distinguer la fonction du remous notre choix a conduit à utiliser deversoir à paroi mince sans contraction latérale suffisamment éloigné de l'entrée amont du canal à environ 1,54 m de la cuve en aval ce deversoir comporte un tube flexible pour aération de la nappe deversoir on s'intéresse uniquement de la ligne d'eau entre les sections 1 et 2 d'après le schéma suivant :



Au niveau de la section 1-1 on pourra avoir deux (02) types de nappes deversantes



— nappe libre —



— nappe adhérente — (absence d'air dans la nappe)

$$h_1 > h_2$$

$\begin{cases} h_2 : \text{faible charge} \\ h_1 : \text{charge forte} \end{cases}$

Remarque : — pour créer la nappe adhérente il suffit de souffler à l'intérieur du siphon et la nappe se dégage de la paroi. Les déversoirs à paroi mince est employé à provoquer un mouvement graduellement varié à l'intérieur du canal et à la détermination des débits.

Formule de débit : — $Q = \mu \cdot L \cdot \sqrt{2g} \cdot H^{3/2} = 4,429 \mu \cdot L \cdot h^{3/2}$
avec μ : coefficient de débit qu'on détermine :

— d'après Bazin : — $\mu = \frac{2}{3} \left[0,6075 + \frac{0,045}{h} \right] \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+p} \right)^2 \right]$

— d'après Rehbock : — $\mu = \frac{2}{3} \left[0,605 + \frac{1}{1050 h - 3} + 0,08 \frac{h}{P} \right]$

$\begin{cases} - P : \text{Pelle} \\ - h : \text{charge déversée} \\ - L : \text{largeur du déversoir} \end{cases}$

4_ Installation Expérimentale

Le canal de base est constitué d'une veine d'essai à paroi mince en verre; d'un bassin de tranquillisation, d'une structure portante et d'un déversoir. Les veines d'essai sont construites à partir d'éléments modulaire de 2,50 m de longueur ces éléments modulaires sont réalisés à partir d'une poutre caisson en acier. Les montants supérieurs sont aussi tirés profilés creux à section rectangulaire; leur disposition est telle qu'elle ne gêne en rien l'observation. Le lit du canal est en acier inoxydable; il est percé de nombreuses prises de pressions et comporte plusieurs points d'ancrage pour la fixation d'obstacles ou de maquettes ces solutions constructives éliminent le problème de la corrosion, l'eau n'étant en contact qu'avec

Les parois en verre et le lit en acier inoxydable les éléments modulaires de la veine d'essai sont boulonnés entre eux sur des surfaces usinées ils peuvent aussi se monter ou se démonter très facilement Les canaux sont aussi équipés d'une règle de mesure et de rails de guidage alignés avec précision pour l'utilisation d'instruments de mesure

L'installation fonctionnant en circuit fermé, un réservoir de capacité appropriée est fourni. Ce réservoir est équipé de chicanes et d'une conduite d'aspiration étudiée pour empêcher tout entraînement d'air dans le circuit le groupe Moto-pompe est alimenté par un courant alternatif de puissance adéquate le groupe est placé sous le canal et il alimente la cuve de tranquillisation par l'intermédiaire d'une conduite P.V. également disposés sous le canal elle est munie d'un débitmètre de type platon une vanne permet le réglage de débit (voir schéma)

6.5 Mode Opératoire

1. on devra fixer le déversoir à paroi mince au deuxième Ancre de l'entrée amont du canal c'est à dire à une distance de 164 cm de la cuve de tranquillisation
2. on divise la longueur à l'amont du déversoir en plusieurs sections équidistantes qu'on devra indiquer à l'aide de feutre ou crayon sur la paroi en verre du canal
3. on actionne le moto-pompe pour s'assurer de l'étanchéité du déversoir avec les parois, conserver la nappe libre à l'aide du siphon d'aération régler et purger le débitmètre maintenir une pente horizontale ($I=0$)

4. On attend à ce que le régime d'écoulement dans le canal soit permanent pour effectuer les mesures.

On fixe le canal une pente horizontale ($I=0$) on fait varier le débit à l'aide de la vanne de réglage pour laquelle on relève les hauteurs d'eau deverseé correspondante à chaque ouverture de la vanne robinet on relève aussi le débit dans le débitmètre on relève tous les paramètres et on dresse un tableau(1) de Mesure des débits et des coefficient de débits. on trace le graphe d'étalonnage de débit $h=f(Q)$.

6. on fixe le débit à 2,5 l/s sur le débitmètre et on fait varier la pente du canal pour différentes pentes (Positives, négatives) pour lesquels on relève les hauteurs d'eau sur chaque section correspondante à chaque pente du canal. on dresse les résultats de mesure sur le tableau (1).

7. faisant le calcul de la courbe de remous d'après la méthode de Bakhtmeteff dresser les résultats de calcul sur le Tableau (2) précédent.

8. Représenter les graphiques expérimentales et théoriques des lignes d'eau correspondantes à chaque ligne d'eau.

§.6 Présentation des résultats et Formule de calcul.

on détermine la pente critique I_{cr} (I_{cr}') on la calcule en associant le régime critique ou régime Uniforme par les

par les deux relations suivantes

$$\begin{cases} Q = V.S = S.C \sqrt{RI} & (\text{regime uniforme}) \\ \frac{Q^2 L}{g.S^3} = 1 & (\text{regime critique}). \end{cases}$$

en faisant eliminer le debit des 2 relations il vient :

$$I_{cr} = \frac{g.S}{C^2.R.L} = \frac{bg.S}{R.L} = \frac{bg.h_m}{R} \quad (b = \frac{1}{C^2})$$

pour section rectangulaire

$$\begin{aligned} S &= L.h \\ P &= L + 2h \end{aligned} \quad \} \quad R = \frac{S}{P}$$

$\left\{ \begin{array}{l} L : \text{Largeur du canal} \\ h : \text{charge} \\ v : \text{vitesse} \\ R : \text{rayon hydraulique} \\ C : \text{Coeff de Chezy} \end{array} \right.$

Algorithme de calcul d'après la méthode de Bakmeteff

Données :

Q - debit (m^3/s) - n : rugosité du canal. b - sa Largeur
 h_0 : Profondeur au seuil du deversoir section de controle (S_0).
 I - pente du canal.

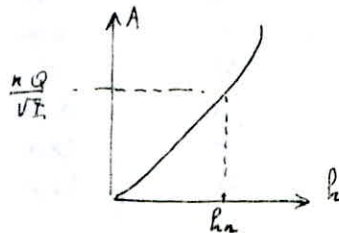
Determination : - le type de la courbe de remous, la longueur de la courbe, profondeur d'eau, construction de la courbe

Solution

* - on sachant la forme du canal debit on calcule la profondeur critique $h_{cr} = \sqrt[3]{\frac{Q}{bg}}$

* - Ayant les profondeurs de l'écoulement h_0 , h_a , h_n on pourra donner le type de la courbe h_n est déterminé de la façon suivante.

$$\frac{S^{5/3}}{P^{2/3}} = \frac{n.Q}{\sqrt{I}} \equiv A$$



determination de l'exposant hydraulique (x).

$$K = C.h^{x/2} \quad \text{avec } C = \text{cte}$$

$$K = \frac{1}{n} \frac{S^{5/3}}{P^{2/3}} \iff \frac{K_2}{K_1} = \left(\frac{S_2}{S_1}\right)^{5/3} / \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{2/3} \quad (\text{on choisit 2 sections } h_2 \text{ et } h_1)$$

on tire $x = 2 \frac{\log(k_2/k_1)}{\log(\frac{h_2}{h_1})}$

on calcul le coefficient f

$$f = \frac{\alpha \cdot i \cdot c^2}{g} \cdot \frac{b}{p}$$

avec $c = \frac{1}{n} R_h^{1/6}$, $\alpha = 1,2$

étant donné $x = \frac{h_2 - h_0}{h_2 - h_1} \Rightarrow \Phi_0$ (Table de Bakhmeteff) section "So"

Section "1" on prend h_1 (valeur voisine de h_0)

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{z_1}{x} \Rightarrow \Phi_1 \text{ (Table de Bakhmeteff)}$$

ayant les Paramètres on pourra alors déterminer la Longueur L_{1-0}

$$L_{1-0} = \frac{h_2}{L} \left[z_1 - z_0 - (1-f)(\Phi_1 - \Phi_0) \right]$$

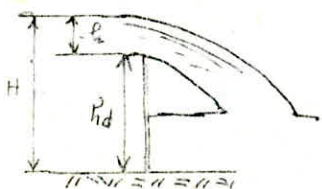
on prend ensuite section "2" $h_2 \rightarrow \frac{h_2}{x} \Rightarrow \Phi_2$ (T.B.)

$$L_{2-1} = \frac{h_2}{L} \left[z_2 - z_1 - (1-f)(\Phi_2 - \Phi_1) \right]$$

on prend plusieurs valeurs de h suffisantes dont on détermine les longueurs correspondantes afin qu'on puisse représenter la courbe $h = f(x)$

TABEAU 1

N° d'EXPERIENCE	H (cm)	h_d (cm)	h (cm)	V	Q (l/s)
1	19,75	12	7,75	0,407	2,6
2	18,50	12	7,50	0,406	2,2
3	19,45	12	7,45	0,406	1,9
4	19,10	12	7,10	0,406	1,7
5	18,70	12	6,70	0,4064	1,6
6	17,3	12	5,3	0,4057	1,35
7	17,14	12	5,14	0,4057	1,05
8	16,43	12	4,43	0,4052	0,7
9	16,28	12	4,28	0,4051	0,6



$$\begin{cases} H = h_d + h \Rightarrow h = H - h_d \\ h_d = 12 \text{ cm} \\ L = 8 \text{ cm} \\ h = h_0 + \frac{v^2}{2g} \end{cases}$$

Canal Horizontale

Pour un canal horizontale on a $h_n = \infty$ et on ne peut plus employer la profondeur normale h_n pour définir la variabilité auxillière $\eta = \frac{h_1}{h_n}$. On rapporte alors la profondeur réelle h à la profondeur critique h_c et on procède comme suit :

- on calcule la profondeur critique
- on détermine l'exposant hydraulique n suivant la méthode habituelle
- on définit les paramètres

$$S = \frac{I}{I_c} \quad \tau = \frac{h}{h_c}$$

avec I_c' : pente critique pour la profondeur h_c $\left(I_c' = \frac{b \cdot g \cdot A}{R_c \cdot e_c} \right)$

I_c : pente critique pour la profondeur h $\left(I = I_c \cdot \frac{b \cdot g \cdot A}{R \cdot e} \right)$

On calcule les relations $S_1 = \frac{I_c'}{I_{c1}}$ et $\tau_1 = \frac{h_1}{h_c}$

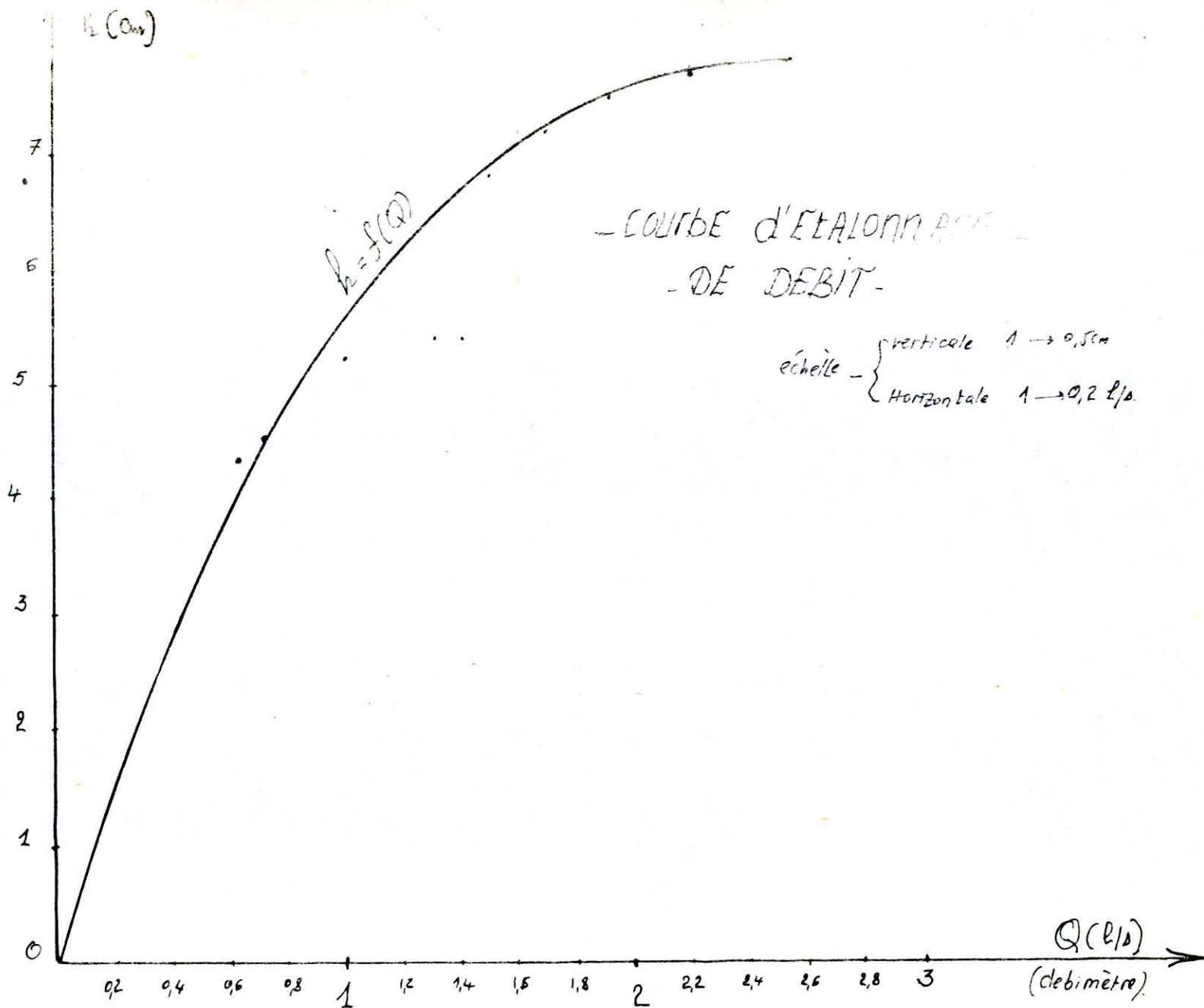
Correspondant à une profondeur h_1 ,

$$S_2 = \frac{I_c'}{I_{c2}} \quad \text{et} \quad \tau_2 = \frac{h_2}{h_c} \quad \text{correspondant à une profondeur } h_2$$

$$S_{21} = \frac{S_1 + S_2}{2}$$

Distance entre les sections S_1 de profondeur h_1 et S_2 de profondeur h_2 est alors donnée par l'expression ,

$$S_2 - S_1 = \frac{h_c}{I_c'} \left[S_{12} (\tau_2 - \tau_1) - \frac{\tau_2^{n+1} - \tau_1^{n+1}}{n+1} \right]$$



-67-

TABLEAUX DE MESURES

- Canal descendant ($I > 0$).

$$I = 1\%$$

$$Q = 2,32 \text{ l/s}$$

$$I_{cr} = 0,6\%$$

$$h_n = 3,6 \text{ cm}$$

$$h_{cr} = 4,38 \text{ cm}$$

Sections	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
Hauteurs expérimentales (cm)	17,79	18,37	18,45	18,12	17,69	17,45	17,14	16,8	16,46	16,13
Hauteurs théoriques (cm)	17,79	18,20	18,45	18,8	18,6	18,2	18,0	17,6	17,2	16,8
distances (cm)	00	04	11	15	15	15	15	15	15	15

- Canal descendant ($I > 0$)

$$I = 4\%$$

$$Q = 1,91 \text{ l/s}$$

$$I_{cr} = 0,6\%$$

$$h_n = 2,2 \text{ cm}$$

$$h_{cr} = 4,38 \text{ cm}$$

Sections	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
Hauteurs expérimentales (cm)	17,72	18,1	17,67	16,64	15,69	14,7	13,62	12,58	11,64	10,58
Hauteurs théoriques (cm)	17,72	17,8	17,67	17,60	17,2	16,2	15,2	14,2	13,2	12,2
distances (cm)	00	04	11	15	15	15	15	15	15	15

TABLEAUX DE MESURES

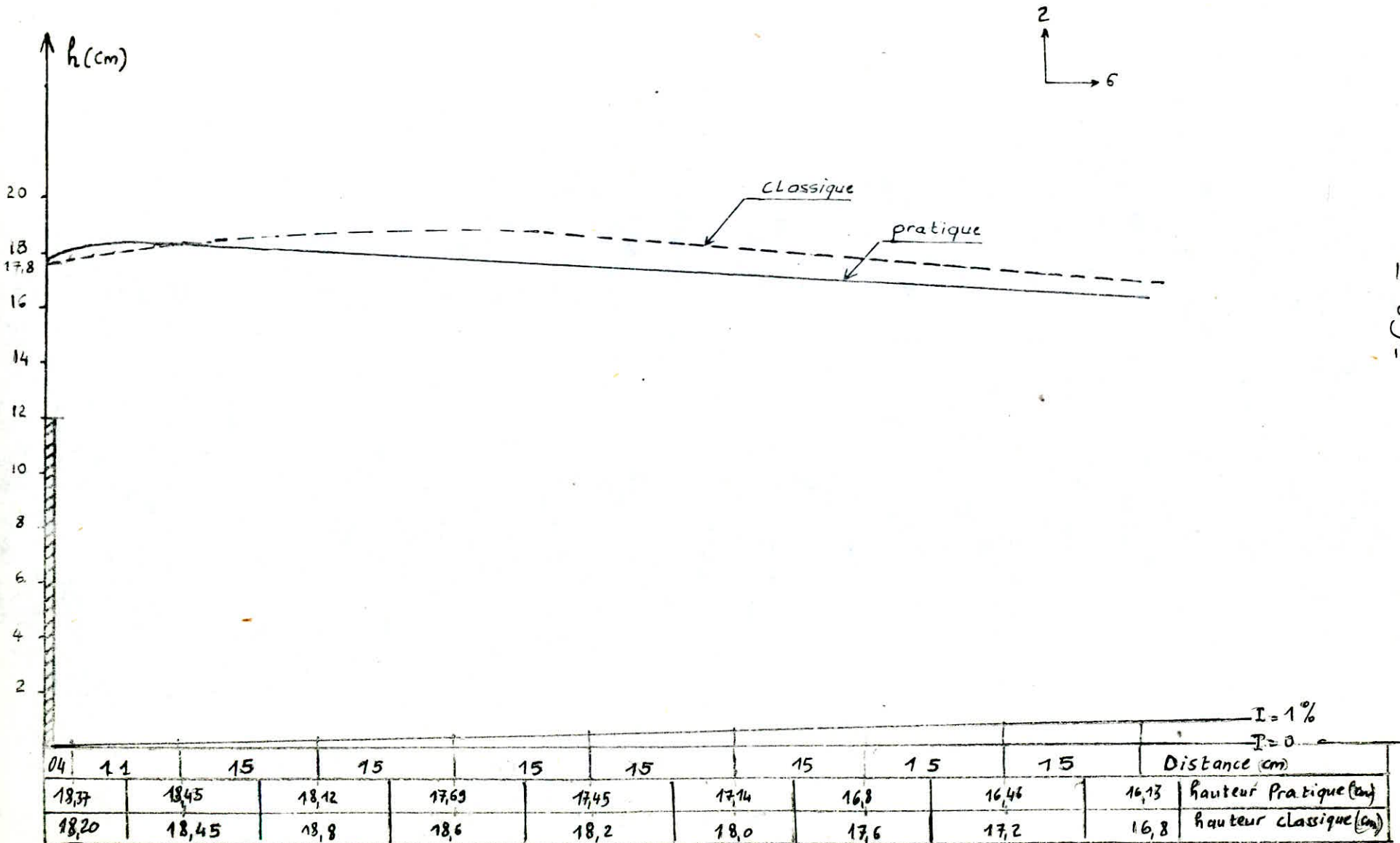
- Canal Horizontale ($I = 0$)
- Hauteur normale ($h_n = \infty$)
- $Q = 2,44 \text{ l/s}$
- rugosité ($n = 0,009$).

Sections	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
Hauteurs Expérimentales (cm)	17,87	18,46	18,67	18,65	18,32	18,14	17,95	17,76	17,60	17,33
Hauteurs théoriques (cm)	17,87	18,46	18,67	18,2	18,0	17,8	17,4	17,0	16,6	16,2
Distance (cm)	00	04	11	15	15	15	15	15	15	15

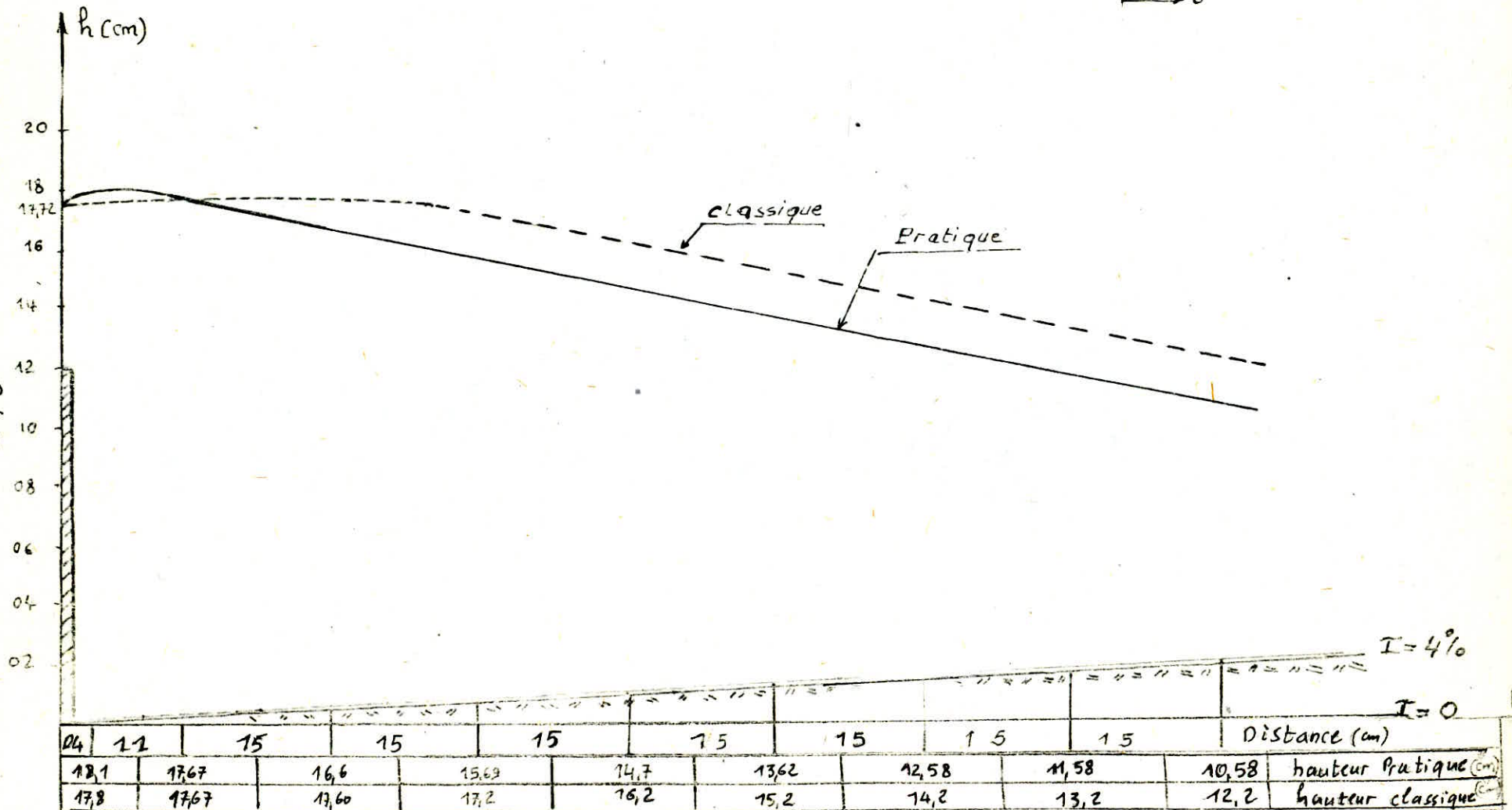
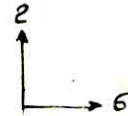
- Canal ascendant ($I < 0$).
- $I = -2 \%$
- $Q = 2,65 \text{ l/s}$
- $h_n = \infty$

Sections	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	S_9
Hauteurs Expérimentales (cm)	17,87	18,43	19,05	19,21	19,36	19,53	19,66	19,82	20,00	20,20
Hauteurs théoriques (cm)	17,87	18,05	19,05	19,42	19,80	20,2	20,4	20,8	21,0	21,40
Distances (cm)	00	04	11	15	15	15	15	15	15	15

Courbe de remous pour canal
descendant $I = 1\%$

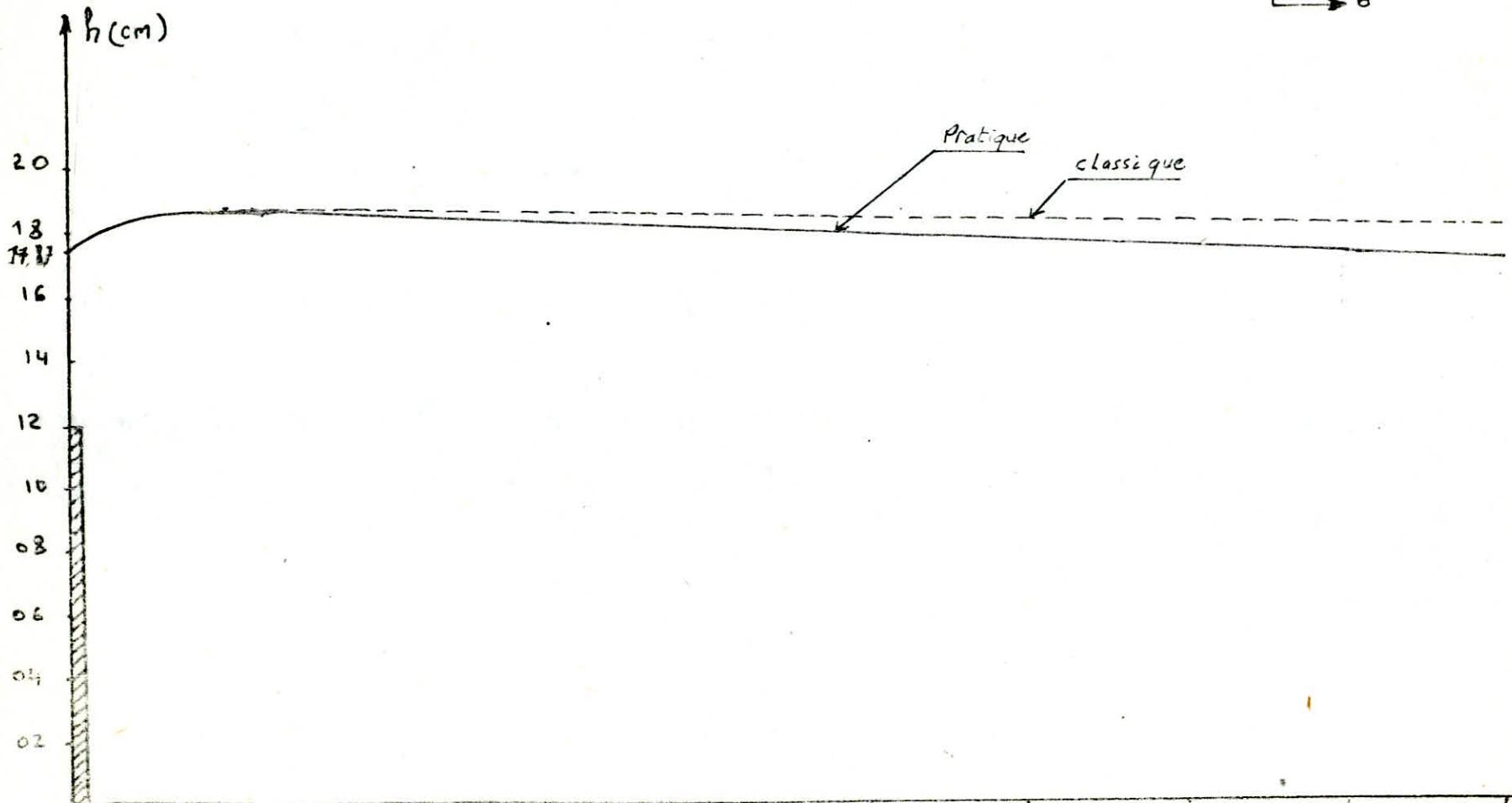
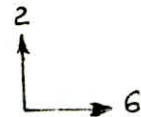


courbe de remous Pour canal
descendant $I = 4\%$



Courbe de remous pour canal

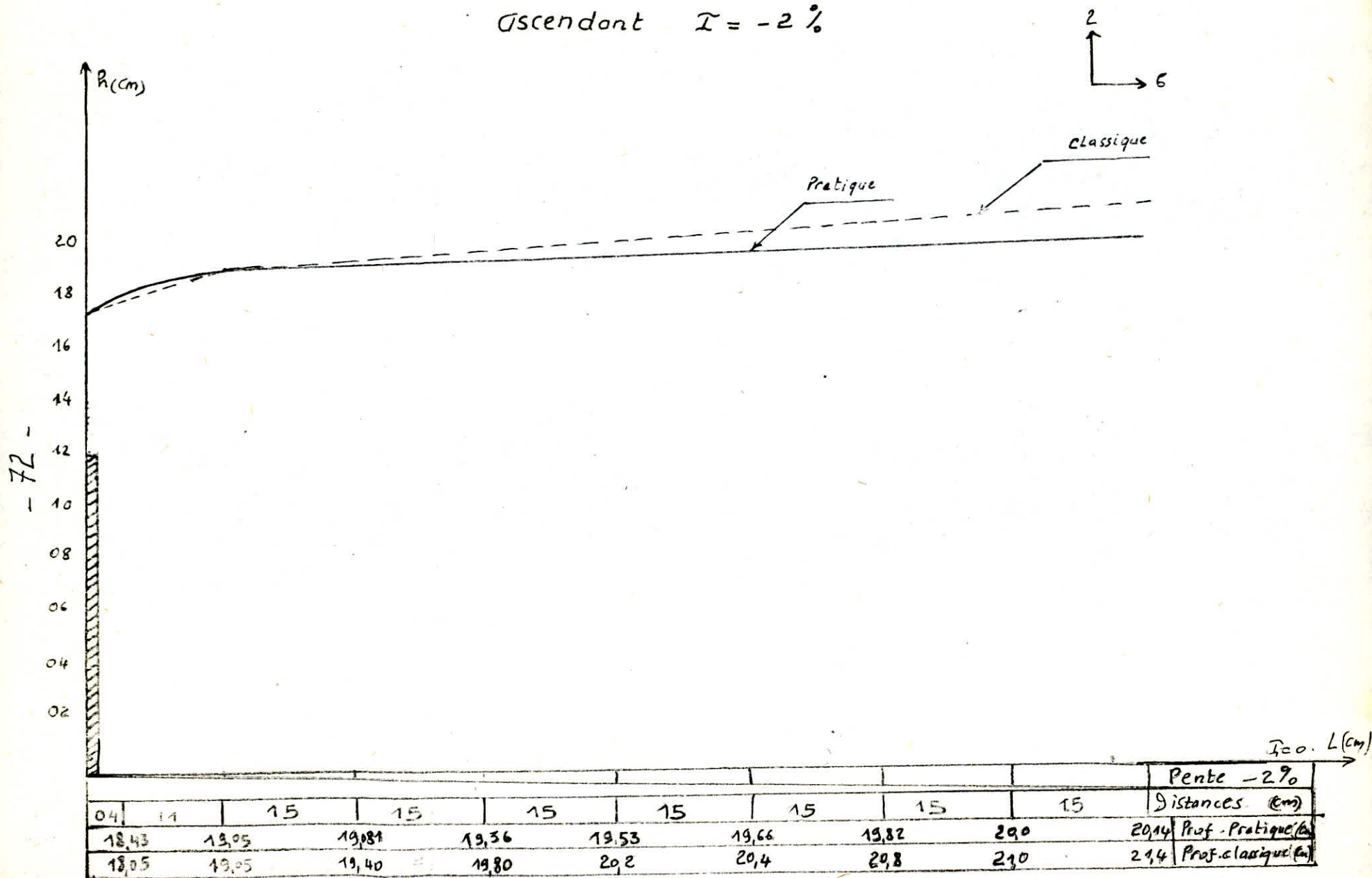
Horizontal $I = 0$.



$I = 0$ (horizontal)										Pente
04	11	15	15	15	15	15	15	15	15	distance
18,46	18,67	18,65	18,32	18,14	17,95	17,76	17,60	17,33	17,16	Prof. Ex
18,76	18,67	18,2	18,0	17,8	17,4	17,0	16,6	16,2	15,0	Prof. H

courbe de remous Pour canal

Ascendant $I = -2 \%$



de tableaux des valeurs de la fonction $\phi(x)$
pour l'exposant (x)

h	L'exposant $\ll X \gg$									
	2,00	2,50	3,00	3,25	3,50	3,75	4,4	4,5	5,00	5,50
0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05
0,20	0,202	0,201	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200	0,200
0,30	0,309	0,304	0,302	0,301	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300	0,300
0,40	0,423	0,411	0,407	0,404	0,403	0,403	0,402	0,401	0,400	0,400
0,50	0,549	0,527	0,517	0,513	0,510	0,508	0,507	0,504	0,502	0,501
0,60	0,683	0,667	0,637	0,630	0,624	0,621	0,617	0,610	0,607	0,605
0,65	0,775	0,728	0,703	0,693	0,688	0,681	0,676	0,668	0,662	0,659
0,70	0,867	0,809	0,776	0,763	0,753	0,746	0,739	0,728	0,722	0,716
0,75	0,972	0,893	0,867	0,853	0,827	0,827	0,816	0,808	0,794	0,786
0,80	1,098	1,006	0,950	0,927	0,913	0,900	0,887	0,867	0,854	0,842
0,85	1,256	1,139	1,065	1,027	1,015	0,997	0,980	0,952	0,935	0,921
0,90	1,472	1,316	1,218	1,179	1,252	1,127	1,103	1,065	1,038	1,017
0,925	1,622	1,439	1,323	1,279	1,243	1,214	1,184	1,141	1,106	1,080
0,95	1,831	1,610	1,467	1,411	1,367	1,332	1,297	1,241	1,197	1,165
0,975	2,184	1,895	1,707	1,622	1,575	1,525	1,479	1,407	1,347	1,300
1,000	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞
1,010	2,652	2,863	1,419	1,265	1,188	1,031	0,936	0,790	0,680	0,598
1,025	2,197	1,504	1,119	0,986	0,879	0,789	0,712	0,594	0,503	0,435
1,05	1,857	1,234	0,896	0,779	0,687	0,612	0,548	0,447	0,375	0,317
1,10	1,522	0,969	0,686	0,583	0,506	0,444	0,392	0,312	0,253	0,210
1,15	1,331	0,821	0,561	0,475	0,407	0,353	0,308	0,238	0,190	0,153
1,20	1,193	0,718	0,480	0,400	0,341	0,292	0,252	0,192	0,151	0,118
1,25	1,098	0,643	0,420	0,346	0,292	0,247	0,212	0,158	0,121	0,094
1,50	0,805	0,426	0,255	0,201	0,162	0,132	0,108	0,073	0,052	0,038
2,0	0,550	0,253	0,132	0,097	0,073	0,057	0,057	0,043	0,025	0,008
2,5	0,424	0,176	0,082	0,057	0,041	0,031	0,021	0,011	0,006	0,003
3,0	0,346	0,131	0,056	0,037	0,025	0,018	0,0125	0,006	0,003	0,0015
4,0	0,255	0,084	0,031	0,019	0,012	0,0085	0,0050	0,0020	0,0010	0,00025
5,0	0,203	0,059	0,020	0,010	0,007	0,0050	0,0025	0,0010	0	0
8,0	0,126	0,029	0,008	0,004	0,002	0,0015	0,0010	0,0002	0	0
10,0	0,100	0,021	0,005	0,002	0,001	0,0005	0,0002	0	0	0

Conclusion

L'étude expérimentale des écoulements graduellement variés en régime non uniforme nous a permis de préciser l'allure des courbes de remous correspondantes aux différentes pentes du canal rectangulaire de largeur très petite. Dans le cas général on peut utiliser diverses méthodes mathématiques ou graphiques.

Quel que soit le procédé de calcul utilisé, le résultat on donnera l'équation qu'à une constante près. Or il est bien évident que la position de cette ligne par rapport au fond du canal est unique. Pour lever l'indétermination il faudra obligatoirement connaître l'un de ses points celui-ci appelé point de repère, que nous désignerons par $S_0(h_0)$. On a choisi comme méthode classique celle de Bakmeteff applicable à une section transversale de forme quelconque pour une pente. Elle est assez longue à utiliser mais elle est précise à condition d'adopter des intervalles d'intégrations suffisamment petits.

Conclusion

Dans cette présente thèse une partie de l'étude a été consacrée à la description de l'installation et l'utilisation de ses différents accessoires, durant notre expérimentation on a remarqué la bonne performance du matériel utilisé puisque les résultats pratiques trouvés concordent assez bien avec ceux de la théorie. Les chapitres suivants traitent les notions classiques de l'hydraulique, montrant comment l'utilisation de la pratique permet d'analyser le comportement du liquide, on a traité aussi les écoulements à surface libre, tout ces chapitres s'enrichissent par l'étude des lois de similitude dynamique et son application aux essais sur modèle réduit.

Enfin on remarque que le recours à l'expérimentation est indispensable pour fournir à l'ingénieur les méthodes d'analyse permettant d'établir les formules susceptibles de traduire le comportement du liquide dans les divers cas de la pratique courante.

-76-
BIBLIOGRAPHIE

- CHABERT.(J) _:
"Calcul des courbes de remous". (Eyrolles, 1958)
- CARLIER.(M) _
"Hydraulique générale et appliquée". (Eyrolles, 1972)
- LENCASTRE.(A) _
"Manuel d'hydraulique générale". (Eyrolles, 1961)
- CRAUSSE.(E) _
"Hydraulique des canaux découverts". (Eyrolles, 1958)
- COMOLET.(R) _
"Mécanique Expérimentale des fluides" (Masson, 1976)
- ESCANDE.(L) _
"Compléments d'hydrauliques". (Edition Privat 1947)
- THESE DE FIN D'ETUDE _ ??
"Etude d'un écoulement dans un canal diédrique" (Janv)

