

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكنة

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHÈQUE

THESE

Présentée

A L'ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE D'ALGER

Par

Bachir ACHOUR

Ingénieur Hydraulicien - Diplômé de l'ENP

pour obtenir le Diplôme

de Magister en Génie-Civil-Option Construction

Sujet de la Thèse

**CONCEPTION ET REALISATION D'UN DEBITMETRE
A RESSAUT EN CANAL DIEDRIQUE
AVEC OU SANS SEUIL**

Soutenu le Juin 1984 devant le Jury

| | | |
|------------------|---------------------------|----------------------|
| Président | A. GAHMOUSSE | Maître de Conférence |
| Examineur | { B. UTRYSKO A. CHARIF | Maître de Conférence |
| Rapporteur | | G. LAPRAY |
| Invité | M. BOUHADEF | Professeur |

202

R E M E R C I E M E N T S

En présentant ce travail, il m'est agréable d'exprimer, en premier lieu, mes remerciements à Monsieur LAPRAY, Professeur à l'E.N.P, qui a bien voulu en assurer la direction, par les conseils et orientations qu'il n'a cessé de me prodiguer dans le cadre de mes recherches.

Je prie, Monsieur GAHMUSSE, Maitre de conférence à l'E.N.P, de trouver ici l'expression de ma vive gratitude pour l'honneur qu'il m'a accordé en acceptant de présider le jury.

Ma reconnaissance s'adresse également à Monsieur UTRYSKO, Maitre de conférence à l'E.N.P, pour avoir accepté de faire partie du jury.

Monsieur CHAREF, Maitre de conférence à l'E.N.P, a bien voulu également faire partie du jury. Je le remercie vivement.

Mes remerciements vont encore à Monsieur BOUHADEF, Professeur à l'U.S.T.HB, qui m'a fait l'honneur d'assister à l'exposé de cette thèse.

Enfin, que tous ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette étude, trouvent ici l'expression de ma sincère gratitude.



SOMMAIRE

Introduction.

Première partie: Etat des connaissances et étude théorique sur la mesure des débits moyennant le ressaut.

I. Etat des connaissances sur la mesure des débits dans les canaux ouverts.

I.1. Déversoirs

I.1.1. déversoir rectangulaire en mince paroi sans contraction latérale.

I.1.2. déversoir rectangulaire en mince paroi à contraction latérale.

I.1.3. déversoir triangulaire en mince paroi à contraction latérale.

I.1.4. déversoirs à seuil épais à profil triangulaire.

I.1.4.1. type Bazin.

I.1.4.2. type Crump.

I.2. Jaugeurs à ressaut.

I.2.1. Parshall.

I.2.2. Canal venturi à fond plat.

Conclusion.

II. Etude du canal diédrique.

II.1. Influence d'un rétrécissement à section triangulaire sur un écoulement tranquille.

II.1.1. condition d'écoulement sur un obstacle.

II.1.2. cas d'un rétrécissement à section triangulaire.

II.2. Etude de l'écoulement dans un tronçon de canal triangulaire succédant au rétrécissement.

II.2.1. constance de la charge H sur un certain parcours.

II.2.2. nature torrentielle de l'écoulement.

II.3. Etude de l'écoulement dans la zone de transition entre le régime torrentiel en canal triangulaire et le régime à l'aval de l'ouvrage.

- II.3.1. Influence du profil terminal.
 - II.3.2. cas du ressaut hydraulique.
 - II.3.3. relation entre tirant d'eau critique et les tirants d'eau à l'amont et à l'aval du ressaut.
 - II.4. Fonctionnement théorique de l'appareil.
 - II.4.1. variation concomittante des tirants d'eau à l'amont et à l'aval ramenés au tirant d'eau critique.
 - II.4.2. perte de charge ramenée au tirant d'eau critique.
 - II.4.3. détermination complète du problème et résolution graphique.
 - II.4.4. Position du profil initial du ressaut.
 - II.5. Canal diédrique à parois-planes muni d'un seuil-
Expression du débit.
 - II.6. Canal diédrique à parois gauches sans seuil-
Expression du débit.
- Conclusion.

Deuxième partie: Conception des modèles et étude expérimentale.

I. Etude expérimentale du débitmètre à ressaut en canal diédrique à parois planes avec seuil.

- I.1. description de l'appareil.
- I.2. essais de mesure des débits et interprétation des résultats.
- I.3. précision donnée par l'appareil.

II. Etude expérimentale du débitmètre à ressaut en canal diédrique à parois gauches sans seuil.

- II.1. description de l'appareil.
- II.2. essais de mesure des débits et interprétation des résultats.
 - II.2.1. débitmètre à segment- étalonnage.
 - II.2.2. précision donnée par l'appareil.

Conclusion.

III. Considérations théoriques pour l'utilisation
de l'appareil

- III.1. côte limite discriminatoire. Classement des perturbations.
- III.2. condition de fonctionnement normal de l'appareil.
- III.3. étude du ressaut dans le canal trapézoïdal.
 - III.3.1. réduction d'un canal trapézoïdal quelconque à un profil étalon.
 - III.3.2. étude du ressaut.
 - III.3.3. application au profil trapézoïdal étalon.

Conclusion générale.

Bibliographie.

Annexe.

Introduction :

Les appareils ordinairement employés pour la mesure des débits nécessitent des pertes de charge trop élevées, ce qui est indésirable surtout dans leur emploi à l'irrigation des zones à faible déclivité. La recherche d'une solution de ce problème a amené à la conception de l'appareil, faisant objet de la présente étude, constituant un nouveau type de débitmètre semi-modulaire unissant les avantages d'un déversoir triangulaire et ceux d'un Parshall.

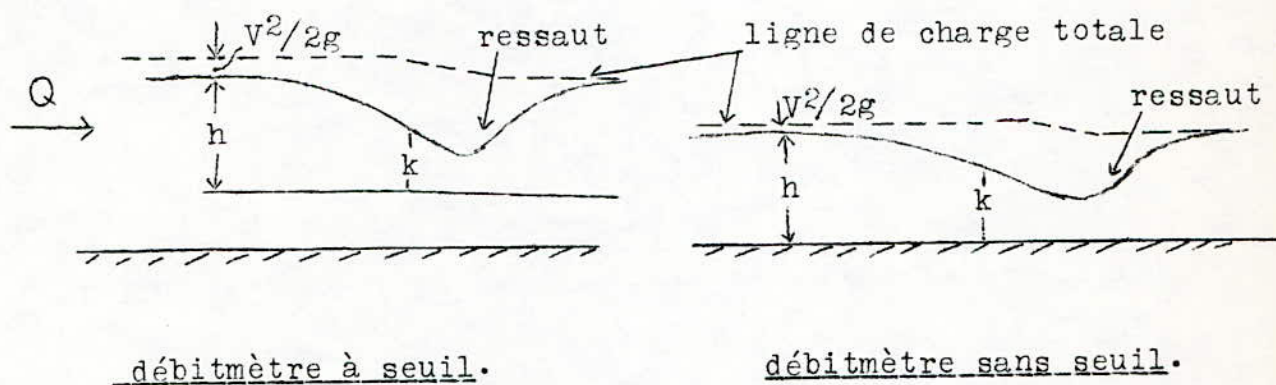
Le profil en travers de l'écoulement, dans la section de contrôle et à l'aval de celle-ci, est un triangle isocèle qui reste géométriquement semblable à lui-même quelque soit le débit passant par l'appareil. Le tronçon en régime torrentiel succédant à la section de contrôle, caractérisé par une vitesse d'écoulement supérieure à celle de la propagation des perturbations tendant à remonter le courant, fait fonction d'un cordon sanitaire qui élimine toute influence des variations du niveau aval sur les caractéristiques de l'écoulement à l'amont.

Ce tronçon est suivi par un ressaut, permettant la récupération dans une forte proportion de l'énergie potentielle antérieurement transformée en énergie cinétique. Grâce à cette retransformation de la vitesse en énergie potentielle, l'appareil fonctionne avec un minimum de perte de charge ne représentant plus que les 6 à 7 % de la perte de charge nécessaire au fonctionnement correct d'un déversoir triangulaire analogue en mince paroi. De plus, l'uniformité du fond de l'appareil permet d'éviter tout dépôt solide, contrairement aux appareils de mesure utilisés jusqu'à présent .

La vitesse de propagation des perturbations élémentaires possibles dans le canal, étant égale à la vitesse critique V_K , aucune des perturbations se manifestant sur le tronçon situé à l'aval de l'ouvrage ne peut influencer le niveau à l'amont, tant qu'une section de contrôle suivie d'un écoulement en régime torrentiel reste intercalée entre les tronçons du cours d'eau en amont et en aval de l'ouvrage. Dans de telles conditions, le débit qui passe par l'ouvrage, en régime torrentiel, ne dépend que du plan de charge à l'amont de celui-ci; le plan de charge

en aval n'ayant aucune influence sur le débit qui est parfaitement déterminé par le seul plan de charge à l'amont.

Dans cette étude nous examinerons le cas d'un débitmètre à ressaut en canal diédrique avec seuil, à parois planes et le cas d'un débitmètre à ressaut en canal diédrique sans seuil, à parois gauches. Les profils en long des écoulements sont respectivement représentés ci-dessous:



Les deux appareils consistent essentiellement en un rétrécissement latéral du canal tel que, compte tenu d'un écoulement fluvial à l'amont, la vitesse atteigne au moins, au droit de l'étranglement et pour tous les débits à mesurer, la vitesse critique. Si cette condition est remplie, un ressaut se forme alors à l'aval de la contraction et l'eau passe à nouveau en régime fluvial; l'influence du niveau aval sur le niveau amont est de ce fait théoriquement nulle, de sorte que l'on puisse établir, à l'amont de la contraction une loi " hauteur-débit " unique. Le bon fonctionnement de l'appareil est conditionné par l'existence d'un ressaut à l'aval de la contraction mais, cette condition n'est pas toujours réalisée pour le débitmètre diédrique avec seuil; en effet, il a été constaté que pour les forts débits, le ressaut se déplaçait vers l'aval avant de disparaître pour un débit donné et l'écoulement devient torrentiel tout le long du canal. Il est alors nécessaires de surélever le seuil pour rendre fluvial l'écoulement à l'amont de la contraction, au droit de laquelle il redevient critique puis fluvial à l'aval par l'intermédiaire du ressaut. Cet inconvénient est supprimé

grâce à la conception du débitmètre à parois gauches sans seuil où le ressaut persiste quelque soit le débit véhiculé par le canal.

Il est démontré dans cette étude que grâce au choix de la section triangulaire, la précision dans la détermination du débit ne dépend que de la précision obtenue dans la mesure du tirant d'eau h , aussi bien pour les faibles que pour les forts débits; ceci contrairement aux autres appareils de mesure utilisés.

Après toutes ces considérations, l'étude consistera dans un premier temps, à la conception et à la réalisation du débitmètre à ressaut en canal diédrique, avec seuil et à parois planes, dont le but principal est la détermination de la loi " hauteur-débit ". Dans un second temps, nous poursuivrons l'étude et la réalisation du débitmètre à ressaut, sans seuil et à parois gauches, dont le but est, d'une part de supprimer les inconvénients observés dans le premier cas et de déterminer d'autre part la loi " hauteur-débit ".

En dernier lieu nous avons envisagé, par des considérations théoriques, les différents cas qui peuvent se présenter lors de l'utilisation de l'appareil. Ceci s'est traduit par l'établissement d'un abaque permettant de déterminer graphiquement le talus maximum de la section retrécie de l'appareil, pour que celui-ci fonctionne correctement.

Symboles utilisés

- Q : débit volume .
- V : vitesse moyenne d'un écoulement.
- A : aire d'une section .
- k : profondeur critique.
- h : profondeur d'un tirant d'eau.
- H : charge totale.
- Q_k : débit volume correspondant au régime critique.
- V_k : vitesse moyenne correspondant au régime critique.
- A_k : aire d'une section critique.
- H_k : charge totale correspondant au régime critique.
- H_{am} : charge totale à l'amont.
- H_{av} : charge totale à l'aval.
- ΔH : perte de charge totale.
- ΔH_{lim} : perte de charge totale correspondant à la limite de la **semi-modularité**.
- H_x : charge totale rapportée à la profondeur critique ($H_x = H/k$)
- h_x : profondeur h rapportée à la profondeur critique ($h_x = h/k$)
- ΔH_x : perte de charge totale rapportée à la profondeur critique.
- e : largeur d'un plan d'eau.
- e_k : largeur d'un plan d'eau critique.
- B, b : base d'un triangle ou d'un trapèze.
- φ : angle d'ouverture d'un dièdre.
- ζ : cotg... inclinaison d'un talus.
- Δh : différence de hauteurs piézométriques.
- \bar{h} : position de centre de gravité.
- P : pression moyenne.
- ρ : masse volumique. $\bar{\omega} = \rho g$: poids volumique.
- α : facteur de correction de l'énergie cinétique.
- λ
1 : échelle horizontale.
- λ_h : échelle verticale.
- λ_v : échelle des vitesses.
- λ_A : échelle des sections.

λ_Q : échelle des débits.

g : accélération de la pesanteur.

r : coefficient de contraction, coefficient de corrélation.

h_t : profondeur à l'amont d'un ressaut.

h_r : profondeur à l'aval d'un ressaut.

A_t : section mouillée correspondant à la profondeur h_t .

A_r : section mouillée correspondant à la profondeur h_r .

Première partie : Etat des connaissances et étude théorique sur la mesure des débits moyennant le ressaut .

Cette première partie se propose, dans une première phase d'établir une confrontation des connaissances sur les divers moyens existants pour la mesure des débits dans les canaux ouverts. Cette mise au point portera sur la présentation des différents déversoirs et jaugeurs à ressaut, en tenant compte des limites de chacun d'entre eux.

Dans une seconde phase, nous étudierons un nouveau type de débitmètre à ressaut pour lequel nous établirons une théorie permettant de déduire la loi " hauteur-débit " .

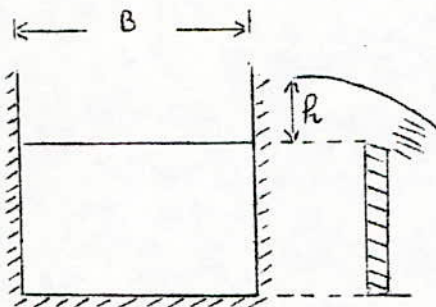
I. Principales connaissances sur la mesure des débits dans les canaux ouverts .

Les appareils de débit dans les canaux ouverts sont de deux types :

I. 1 déversoirs

Ce sont ceux qui utilisent le libre déversement par dessus une paroi verticale , placée en travers de l'écoulement dans une section droite du canal : ils sont appelés déversoirs et sont basés sur une contraction verticale de l'écoulement . La paroi verticale peut présenter une échancrure rectangulaire , triangulaire ou circulaire; le débit du canal est alors déterminé par simple lecture limnimétrique du plan d'eau à l'amont , au-dessus de l'arête du déversoir , ainsi que par les caractéristiques géométriques du canal et de l'appareil .

I. 1.1 déversoir rectangulaire en mince paroi , sans contraction latérale .



Pour un canal dont la lame d'eau est correctement aérée , le débit d'eau peut être calculé en fonction de la hauteur du plan d'eau à l'amont au-dessus de la crête du déversoir , à l'aide de la formule de : KINDSVATER-KARTER (1959) :

$$Q = 2/3 \cdot \sqrt{2g} \cdot C_e \cdot (B - 0,001) \cdot (h + 0,001)^{3/2}$$

où : B est la largeur du canal .

h la hauteur du plan d'eau .

g l'accélération de la pesanteur .

C_e le coefficient de débit donné par la relation :

$$C_e = 0,602 + 0,075 \cdot h/P , \text{ où } P \text{ est la hauteur de pelle .}$$

Il est recommandé , pour que la mesure soit valable , que la hauteur de pelle soit supérieure à 0,10 m , que la hauteur minimum du plan d'eau soit supérieure à 0,08 m , que le rapport h/P soit inférieur à 0,25.

Le débit du canal peut également être déterminé par la relation :

$$Q = 2/3 \cdot \mu \cdot B \cdot \sqrt{2gh} \quad \text{où } \mu$$

Le coefficient de contraction qui se calcule, dans ce cas, par la formule de REHBOCK :

$$\mu = 0,6035 + 0,0813 \cdot h_e/h_d \quad \text{où } h_e = h + 0,0011 \text{ m}$$

h_d étant égale à P (hauteur du déversoir en mètre) .

La formule du débit prend alors la forme suivante :

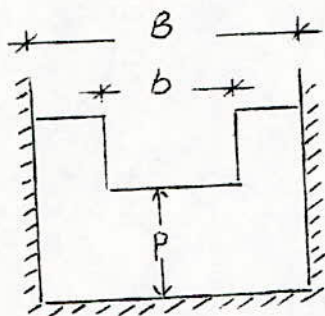
$$Q = 2/3 \cdot \mu \cdot B \cdot h_e \cdot \sqrt{2gh_e}$$

Cette relation est valable pour :

$$h_d \geq 0,3 \text{ m} \quad , \quad B/h_d \leq 1 \quad \text{et} \quad 0,025 \text{ m} \leq h \leq 0,8 \text{ m}$$

N.B : dans toutes ces relations les côtes sont en mètre , les débits seront en mètre-cube par seconde .

I.1.2 déversoir rectangulaire en mince paroi à contraction latérale .



Le débit est obtenu en mètre-cube par seconde , en fonction des données

suivantes mesurées en mètre :

b : la largeur du déversoir .

h : la hauteur du plan d'eau au-dessus de la crête du déversoir .

B : la largeur du canal .

P : la hauteur de la paroi .

Le débit s'exprime par la relation :

$$Q = 2/3 \cdot \sqrt{2g} \cdot C_e \cdot (b - 0,001) \cdot (h + 0,001)^{3/2} \quad , \quad \text{où}$$

g est l'accélération de la pesanteur .

C_e le coefficient de débit .

Le coefficient de débit C_e est calculé moyennant les relations suivantes

$$C_e = 0,598 + 0,064 \cdot h/P \quad \text{pour } b/B = 0,9$$

$$C_e = 0,596 + 0,045 \cdot h/P \quad \text{pour } b/B = 0,8$$

$$C_e = 0,594 + 0,030 \cdot h/P \quad \text{pour } b/B = 0,7$$

$$C_e = 0,593 + 0,018 \cdot h/P \quad \text{pour } b/B = 0,6$$

$$C_e = 0,591 + 0,0058 \cdot h/P \quad \text{pour } b/B = 0,4$$

$$C_e = 0,588 + 0,0018 \cdot h/P \quad \text{pour } b/B = 0,2$$

Les limites d'emploi de la relation exprimant le débit sont les suivantes :

$$\begin{aligned} h &> 0,08 \text{ m} & , & & b &> 0,15 \text{ m} \\ P &> 0,10 \text{ m} & , & & I/2 \cdot (B - b) &> 0,10 \text{ m} \\ h/P &< 2,5 \end{aligned}$$

Etant donnée la contraction latérale, on peut calculer le coefficient μ de la formule de REHBOCK par la relation :

$$\mu = \left[0,578 + 0,037 \left(\frac{b}{B} \right)^2 + \frac{3,615 - 3 \cdot \left(\frac{b}{B} \right)^2}{1000h + 1,6} \right] \left[1 + 0,5 \left(\frac{b}{B} \right)^2 \left(\frac{b}{H} \right)^2 \right]$$

Le débit est alors donné par l'expression :

$$Q = 2/3 \cdot \mu \cdot b \cdot h \cdot \sqrt{2gh}$$

I. 1.3 déversoir triangulaire en mince paroi à contraction latérale

Les déversoirs triangulaires en mince paroi à contraction latérale sont utilisés pour le calcul des faibles débits. La formule de CONE (U.S.A 1916) qui ne tient pas compte de la hauteur de pelle et de la largeur du canal, repose toutefois sur une très large base expérimentale; le débit est donné par la relation :

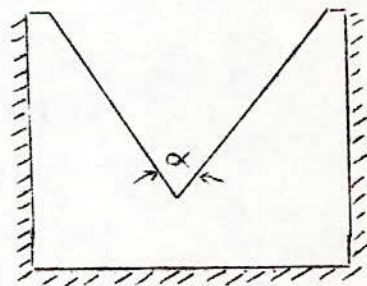
$$Q = \left(0,3065 \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot h^{5/2} \cdot \sqrt{2g} + 0,0031 \cdot h^{5/2} \cdot \sqrt{2g} \right) \cdot (3,28h)^{\frac{0,0195}{0,75}} \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2}$$

dans laquelle :

h est la hauteur du plan d'eau au-dessus de l'arête du déversoir.

g : l'accélération de la pesanteur.

α : l'angle d'ouverture du déversoir.

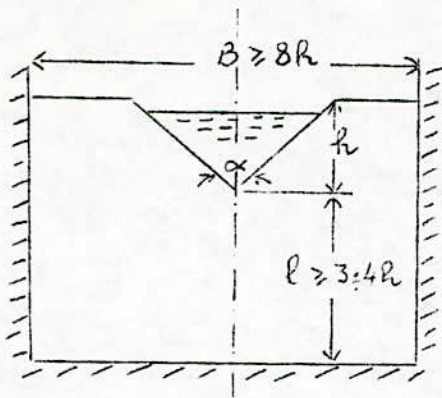


Pour effectuer des calculs plus rapides, il est possible d'utiliser la formule de CONE simplifiée, avec une bonne précision pour les déversoirs à angle d'ouverture égal à 90°:

$$Q = 0,303 \cdot h^{-0,02} \cdot \text{tg} \frac{\alpha}{2} \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{5/2}$$

On emploie également, pour le calcul des faibles débits, le déversoir

THOMSON, représenté par la figure ci-dessous :



pour $\alpha = 90^\circ$, le débit s'exprime par la relation :

$$Q = \mu \cdot 8/15 \cdot h^2 \cdot \sqrt{2gh}, \text{ avec :}$$

$$\mu = 0,565 + 0,00868 \cdot l/\sqrt{h}, \text{ où}$$

h est mesuré en mètre .

Tous les appareils ci-dessus indiqués permettent donc de déterminer le débit véhiculé par un canal ouvert, par simple mesure limnimétrique du plan d'eau amont; ils présentent cependant un grand nombre d'inconvénients, en plus des tolérances qu'ils doivent respecter et dont les plus importants sont les suivants :

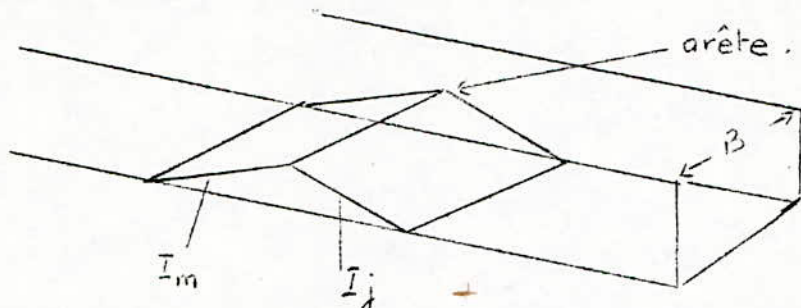
- la paroi verticale placée en travers de l'écoulement, constitue un obstacle devant lequel des dépôts solides, parfois importants s'accumulent et faussent inévitablement la mesure limnimétrique, par conséquent celle du débit; le canal doit donc être nettoyé périodiquement.

- le libre déversement de l'écoulement a pour conséquence la perte de la totalité de la charge, à l'aval de l'appareil, ce qui est indésirable pour l'irrigation des zones de faible pente.

- l'utilisation d'une section rectangulaire a pour effet que la précision obtenue dans la détermination du débit n'est plus fonction de la précision obtenue dans la mesure du tirant d'eau h ; en effet l'absence d'une similitude géométrique dans la section rectangulaire fait que cette précision dépend du rapport B/h (ou b/h). Une bonne précision n'est obtenue que pour les forts débits.

I. 1.4 déversoir en seuil épais à profil triangulaire

Il s'agit d'un déversoir créant une contraction verticale de l'écoulement par une surélévation du fond du canal, appelée : " seuil épais "; l'eau s'étend sur toute la largeur du canal et reste en contact avec le seuil sur une certaine longueur.



Caractéristiques du canal situé à l'amont du dispositif :

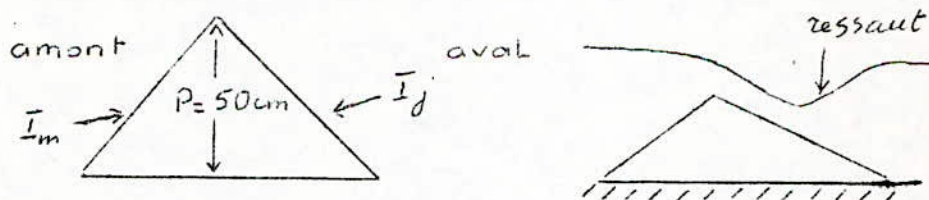
Si B est la largeur du canal, sur une longueur d'au moins $10B$:

- le canal doit être rectiligne.
- sa section doit être rectangulaire et constante.
- sa pente doit être inférieure à 2% .
- ses parois doivent être lisses .

Caractéristiques de l'appareil :

L'arête déterminée par l'intersection des parements amont et aval doit être horizontale; on tolère cependant un écart de 0,2 % .

I. 1.4.1. Seuil épais à profil triangulaire type " BAZIN " :



- hauteur de pelle = 50 cm; on admet une tolérance de 2 cm.
- si I_m et I_j sont respectivement les pentes des parements amont et aval du seuil, le bon fonctionnement de l'appareil est conditionné par les quatre combinaisons suivantes :

| I_m | I_j |
|-------|-------|
| I/I | I/I |
| I/I | I/2 |
| I/I | I/3 |
| I/2 | I/2 |

La tolérance sur les pentes est de 0,2% .

Le débit passant par l'appareil est calculé par la relation :

$$Q = m \cdot B \cdot \sqrt{2g} \cdot h^{3/2}, \text{ où}$$

m est le coefficient de débit .

B la largeur du canal (et de l'arête) .

h la hauteur du plan d'eau , mesurée à au moins $2,5h_{\max}$
à l'amont .

Afin de simplifier les calculs , la formule du débit peut s'écrire :

$$Q = K \cdot B \cdot h^{3/2}, \text{ où}$$

$$K = m \cdot 2g$$

B la largeur du canal (et de la crête) mesurée en cm .

h la hauteur du plan d'eau mesurée en cm .

Q le débit exprimé en l/s .

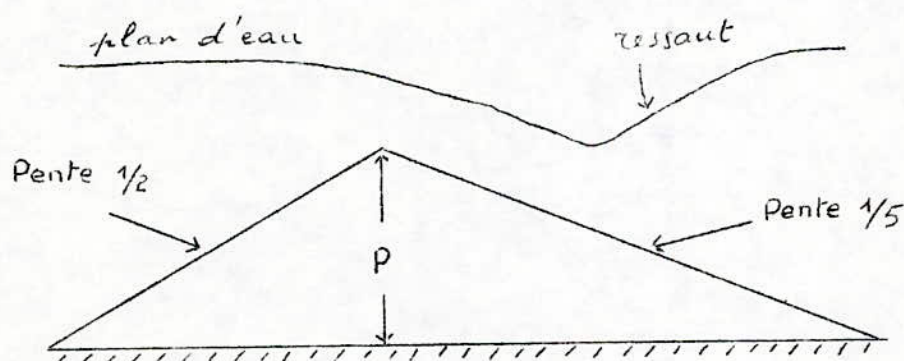
Les valeurs de K sont consignées dans le tableau ci-après , en fonction de h , I_m et I_j .

| $h(\text{cm})$ | $I_m = I/I$ $I_j = I/I$ | $I_m = I/I$ $I_j = I/2$ | $I_m = I/2$ $I_j = I/3$ | $I_m = I/2$ $I_j = I/2$ |
|----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 6 | 0,0211 | 0,0211 | 0,0211 | 0,0211 |
| 9 | 0,0235 | 0,0210 | 0,0192 | 0,0213 |
| 12 | 0,0232 | 0,0208 | 0,0194 | 0,0211 |
| 15 | 0,0228 | 0,0208 | 0,0192 | 0,0212 |
| 18 | 0,0227 | 0,0209 | 0,0191 | 0,0212 |
| 21 | 0,0227 | 0,0211 | 0,0190 | 0,0211 |
| 24 | 0,0227 | 0,0212 | 0,0191 | 0,0213 |
| 27 | 0,0226 | 0,0213 | 0,0192 | 0,0213 |
| 30 | 0,0225 | 0,0213 | 0,0192 | 0,0213 |
| 36 | 0,0217 | 0,0213 | 0,0192 | 0,0213 |
| 45 | 0,0207 | 0,0212 | 0,0191 | 0,0213 |

I. 4.2 seuil épais à profil triangulaire " CRUMP "

Les résultats d'étalonnage de ce type de seuil , que nous donnons ici proviennent d'une publication de l'HYDRAULIC RESEARCH STATION of WALLINGFORD .

La forme du seuil est celle représentée par la figure ci-dessous :



Les limites d'utilisation de l'appareil sont :

- charge maximum : $h/P < 3$.
- charge minimum : $h > 8\text{cm}$

La formule d'étalonnage obtenue est la suivante :

$$Q = C_e \cdot C_v \cdot \sqrt{g} \cdot b \cdot h^{3/2} , \text{ où}$$

- Q est le débit .
- C_e un coefficient sans dimension , égal à 0,626 .
- C_v le coefficient de vitesse , fonction de b , B , h et P .
 b étant la largeur de la crête du déversoir , B la largeur au canal .
- g l'accélération de la pesanteur .
- h hauteur du plan d'eau , mesurée entre 3 et $4h_{\text{max}}$ à l'amont de la crête .

La formule exprimant le débit s'écrit sous sa forme simplifiée :

$$Q = K \cdot b \cdot h^{3/2} , \text{ où}$$

Q est le débit en l/s .

$$K = C_e \cdot C_v \cdot \sqrt{g} .$$

b la largeur de la crête en cm .

h la hauteur du plan d'eau en cm .

Les déversoirs en seuil épais à profil triangulaire , ci-dessus indiqués , permettent donc la mesure du débit passant par un canal rectangulaire par simple lecture limnimétrique du plan d'eau amont situé au-dessus de la crête ; ils permettent également d'opérer avec un minimum de perte de charge , par rapport aux déversoirs simples , grâce à l'existence d'un ressaut qui relève le plan d'eau aval ; mais le seuil constitue cependant un obstacle , devant lequel s'accumulent les dépôts solides .

Ces appareils ne peuvent être utilisés que pour des canaux rectangulaires à parements lisses et plats ; ils présentent aussi l'incon -

vénient de n'avoir été établis que pour des seuils épais ayant une hauteur d'environ 50cm , hauteur qui est en général trop grande pour être adaptée à des canaux déjà existants dans les usines .

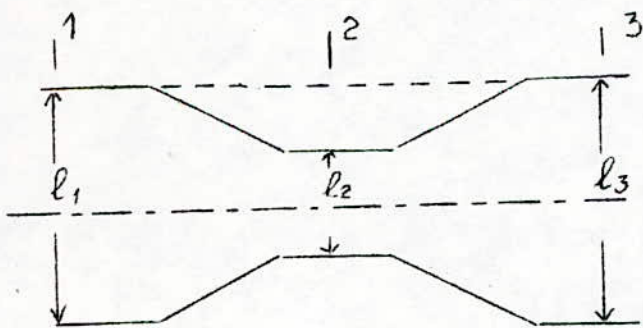
Le débit donné par le seuil épais à profil triangulaire " type BAZIN " est fonction d'un coefficient K qui n'est valable que dans le cas où la lame d'eau déversante est adhérente au seuil; l'existence d'une poche de séparation entre la lame et le seuil est d'ailleurs difficile à détecter sur un écoulement d'eau trouble .

I.2 Jaugeurs à ressaut .

Ce sont des appareils dont les parois sont profilées pour créer une contraction latérale de la veine liquide . On distingue :

I.2.1 Parschall .

Le Parschall est constitué d'une réduction progressive de la section transversale d'un canal , jusqu'à une section retrécie , appelée col. Ce col est suivi d'un élargissement progressif (divergent) permettant de retrouver la section initiale de canal .



La section retrécie a pour effet l'apparition d'un régime torrentiel dans le col où la profondeur passe par sa valeur critique k . Le divergent permet de transformer l'écoulement torrentiel en écoulement fluvial , par l'intermédiaire d'un ressaut qui apparait entre les sections (2) et (3) .

Si le régime critique apparait dans le col de l'appareil , on peut écrire les relations suivantes , dans le cas d'une section rectangulaire :

$$H_1 = h_1 + V_1^2/2g .$$

Cette relation exprime la charge totale , dans la section (1) .

En négligeant d'une part le terme $V^2/2g$ et d'autre part la perte de charge entre les sections (1) et (2), on écrit :

$$H_1 = H_2 = 2/3 \cdot h_1 = h_2, \text{ or } h_2 = k; \text{ il en résulte que } k = 2/3 \cdot h_1$$

Le débit passant par la section rectangulaire (2), en régime critique est déduit de la relation de criticité : $Q^2 l_2 / g A_2^3 = 1$, où la section mouillée A_2 est : $A_2 = l_2 \cdot h_2 = l_2 \cdot k$.

Ainsi $Q^2 = g \cdot A_2^3 / l_2 = g \cdot l_2^3 k^3 / l_2 = g \cdot l_2^2 \cdot k^3$, d'où :

$$Q = \sqrt{g} \cdot l_2 \cdot k^{3/2}$$

mais $k = 2/3 \cdot h_1$, l'expression du débit devient :

$$Q = \sqrt{g} \cdot l_2 \cdot (2/3)^{3/2} \cdot h_1^{3/2} \text{ ou bien :}$$

$$Q = 1,704 l_2 h_1^{3/2}$$

On affecte ce résultat d'un coefficient correctif a , légèrement inférieur à l'unité, tenant compte des approximations faites précédemment ; on écrit finalement :

$$Q = 1,704 \cdot a \cdot l_2 \cdot h_1^{3/2}$$

formule pratique .

La formule du débit proposée par Parschall est la suivante (traduite en unités techniques) :

$$Q = 372 \cdot l_2 \cdot h_1^x \cdot 3,28^x, \text{ dans laquelle :}$$

Q est le débit en l/s .

l_2 la largeur du col , exprimée en mètre .

h la hauteur du plan d'eau à l'amont .

x un exposant fonction de l_2 , donné par le tableau suivant :

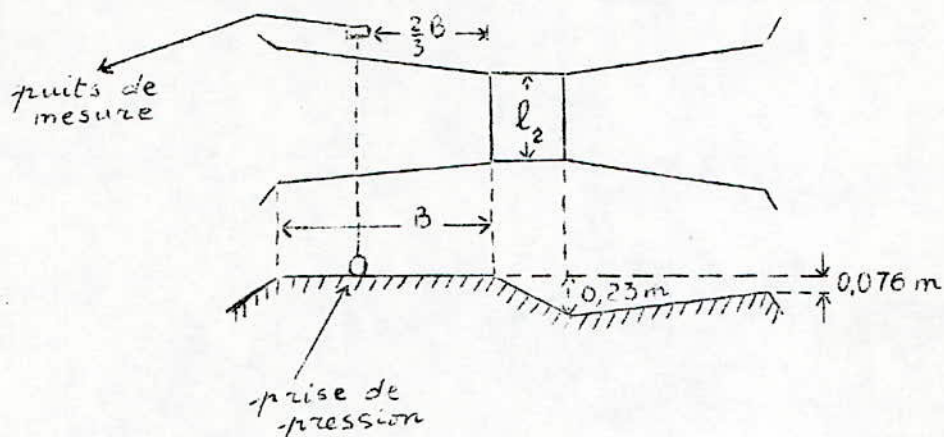
| l_2 (en m.) | 0,2 | 0,6 | 0,8 | 1 | 2 | 2,6 |
|-----------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| x | 1,506 | 1,548 | 1,560 | 1,569 | 1,598 | 1,609 |

La largeur du col l_2 est généralement comprise entre :

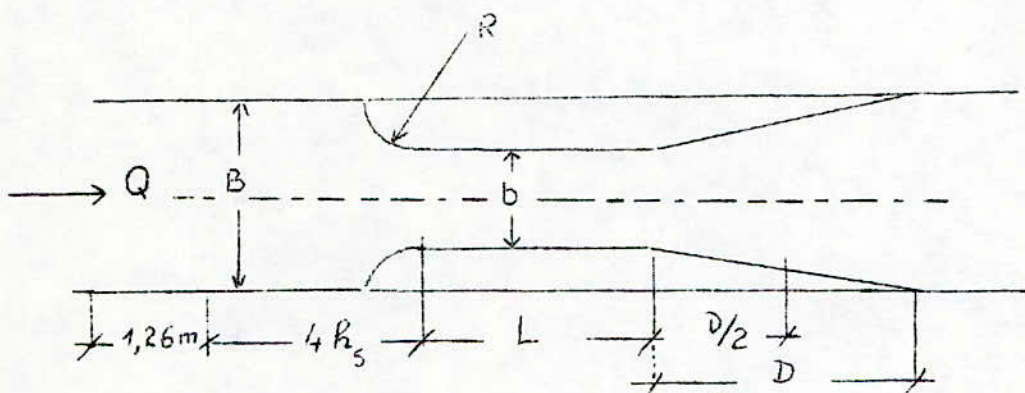
$$l_1/3 \text{ et } l_1/2 .$$

La hauteur h_1 est mesurée aux 2/3 de la distance entre le seuil d'entrée du convergent et l'entrée du col .

La prise de pression doit être placée au niveau du radier . Pour éviter que le ressaut disparaisse pour les forts débits , condition nécessaire pour le fonctionnement correct de l'appareil , on réalise parfois un radier surélevé ou abaissé qui permet de maintenir le ressaut pour une large gamme de débits .



1.2.2 Canal venturi à fond plat .



Caractéristiques géométriques et tolérances .

- un canal rectangulaire (au gabarit du canal amont) à radier horizontal et à parois lisses , sur une longueur égale au minimum à : $1,25 \text{ m} + 4 \text{ fois la hauteur du plan d'eau maximum } h_s$.
- un convergent dont les courbes ont un rayon : $R = 2 (B - b)$.
- une partie rectiligne , à profil rectangulaire , de longueur L supérieure ou égale à $1,5h_s$ et de largeur b comprise entre : 10 cm et $0,7 B$.

- un divergent d'une longueur $D = 0,5 (B - b)$, cette longueur D pourra, dans le cas échéant , être réduite de moitié : soit $D = 1,5 (B - b)$.
- l'axe de la section contractée , dont la largeur est b , doit être confondu avec celui du canal ; la tolérance est de 2 cm .
- les parois du canal venturi doivent être verticales ; la tolérance est de 0,2% .

Toutes les dimensions du canal venturi doivent être respectées avec une tolérance de 2 mm .

La formule développée du débit est la suivante :

$$Q = (2/3)^{3/2} \cdot \sqrt{g} \cdot C_e \cdot C_v \cdot b \cdot h^{3/2} , \text{ où}$$

Q est le débit .

g l'accélération de la pesanteur .

C_e le coefficient de débit qui dépend des pertes dues au frottement et à la turbulence : il est fonction de L , b et L (longueur de la section contractée) .

b largeur de la section contractée .

h hauteur du plan d'eau , mesurée à l'amont de la section contractée .

C_v un coefficient qui dépend de la vitesse dans le canal amont ; il est fonction de b et B (largeur du canal amont) .

On peut écrire la formule du débit sous la forme :

$$Q = K \cdot C_e \cdot C_v \cdot b \cdot h^{3/2} , \text{ où}$$

Q est exprimé en l/s .

$K \cdot C_e = (2/3)^{3/2} \cdot \sqrt{g} \cdot C_e$ est une fonction des rapports L/b et h/L .

Bien que les valeurs de C_e aient été déterminées pour des valeurs de L/b comprises entre 0,2 et 5 , la valeur $L/b = 2$, adoptée par certains fabricants de seuil préfabriqués , est la plus utile . La longueur L de la section contractée doit être supérieure ou égale à :

$1,5 h_{\max}$, sinon il se produit des pertes de charge plus grandes ,
donc une surestimation du débit .

Pour tous les débits à mesurer , la condition suivante doit être vérifiée :

si b/B est supérieur à $0,35$, h doit être supérieure ou égale
à $1,20 h_a$.

si b/B est inférieur à $0,35$, h doit être supérieure ou égale
à $1,30 h_a$.

- h étant la hauteur du plan d'eau à l'amont .

- h_a étant la hauteur du plan d'eau à l'aval du ressaut .

La côte de référence de ces deux hauteurs est celle du radier horizontal du canal venturi .

Ainsi, les deux jaugeurs à ressaut que nous venons de citer , permettent la détermination du débit , passant par un canal , par simple mesure limnimétrique du plan d'eau amont .

Cependant , ces appareils sont constitués d'une section rectangulaire qui ne donne pas , par conséquent , une bonne précision dans la détermination des débits fractionnaires ; ils occasionnent en outre une perte de charge de l'ordre de 8% de la hauteur du plan d'eau amont , quand la profondeur au col atteint la valeur critique k ; le ressaut est alors ondulé . Cette propriété présente l'inconvénient de nécessiter une grande longueur de col , d'entraîner une instabilité de l'écoulement rendant les mesures imprécises et de former des tourbillons sur le radier , avec risques d'érosion . Quand le ressaut est franc , c'est à dire quand la profondeur au col reste inférieure à la profondeur critique k , la perte de charge occasionnée par l'ouvrage peut atteindre les 25% de la hauteur du plan d'eau amont et même plus .

Conclusion :

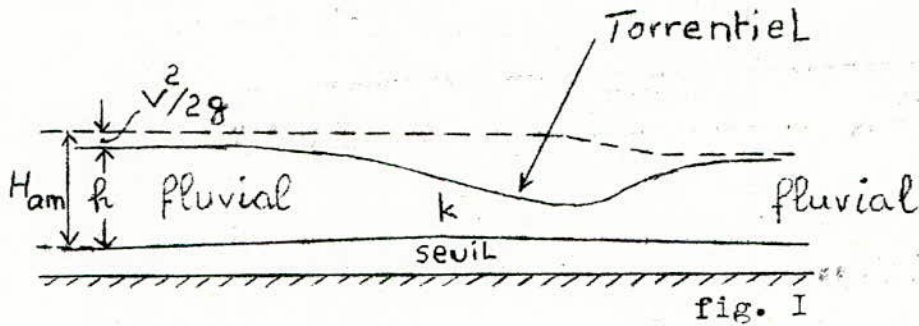
Nous venons donc de passer en revue , les différents types d'appareils utilisés pour la mesure du débit dans les canaux ouverts ; ils présentent tous une loi " hauteur-débit " unique , hauteur mesurée à l'amont de l'ouvrage considéré . Certains d'entre eux occasionnent une plus faible perte de charge , mais qui reste cependant au-dessus de la valeur désirée .

L'expression du débit est en général complexe , suite à l'introduction de facteurs correctifs résultant parfois de phénomènes secondaires indésirables , tels la turbulence , l'apparition de zones d'eau morte que ces ouvrages occasionnent .

Ces appareils sont , pour la plupart , constitués d'une section rectangulaire où une bonne précision n'est obtenue que pour les forts débits et sont de plus dotés de seuils devant lesquels les dépôts solides s'accumulent .

Ainsi allons nous étudier un nouveau type de débitmètre à ressaut en canal diédrique , fonctionnant avec le minimum de pertes de charge . Le choix de la section triangulaire , comme nous le verrons plus loin , permet de simplifier considérablement l'expression de la loi " hauteur-débit " .

II. Etude du canal diédrique:



II. . Influence d'un retrécissement à section triangulaire sur un écoulement tranquille.

II. . . Condition d'écoulement sur un obstacle :

Un écoulement en régime tranquille, dont la charge primitive est suffisante pour que le débit franchisse l'obstacle constitué par un ouvrage, sans que la vitesse accrue au retrécissement atteigne la valeur critique, restera inchangé à l'aval de l'ouvrage; mais il sera ralenti à l'amont de celui-ci par suite d'une surélévation du niveau et sa charge totale sera augmentée d'une hauteur équivalente à la perte de charge occasionnée par le franchissement de l'obstacle.

Dans le cas contraire (figure I), quand l'état primitif du courant ne permet pas de franchir l'obstacle sans atteindre la vitesse critique dans la section retrécie, le plan de charge totale sera surélevé d'une hauteur, correspondant au minimum nécessaire et suffisant pour que le débit passe par le retrécissement. Un tel écoulement est caractérisé par son débit Q et par la charge totale H_{am} . à l'amont de l'obstacle; $H_{am} = h + \alpha V^2/2g$ où h est le tirant d'eau, V la vitesse moyenne de l'écoulement et g l'accélération de la pesanteur. On suppose que le facteur de correction de l'énergie cinétique α est égal à l'unité ;

$$H_{am} = h + V^2/2g \quad (I)$$

II. .2. Cas d'un retrécissement à section triangulaire:

Considérons le cas particulier où la section retrécie a la forme d'un triangle isocèle à axe vertical et à pointe dirigée vers le bas. La surface libre de la veine liquide constitue la base de ce triangle (figure 2).

La section mouillée A s'exprime par :

$$A = h^2 \cdot \text{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (2) \text{ et la vitesse}$$

moyenne par :

$$V = Q/A = \frac{Q}{h^2 \cdot \text{tg} \frac{\varphi}{2}} \quad (3)$$

La relation (1) devient alors :

$$\text{Ham.} = h + \frac{Q^2}{2gh^4 \text{tg}^2 \frac{\varphi}{2}} \quad (4)$$

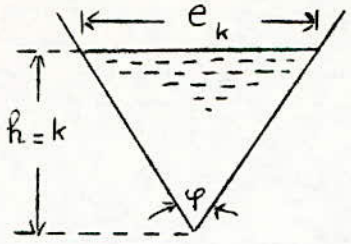


fig. 2

Si nous adoptons le terme de "tirant d'eau critique" k pour la valeur spéciale du tirant d'eau au droit de la section retrécie la relation (4) devient :

$$H_k = k + \frac{Q^2}{2gk^4 \text{tg}^2 \frac{\varphi}{2}} \quad (4')$$

Dans cette section la condition de criticité $Q^2 e_k / g A_k^3 = 1$ (5) est satisfaite et dans laquelle :

$$e_k = 2k \text{tg} \frac{\varphi}{2}$$

$$A_k = k^2 \text{tg} \frac{\varphi}{2}$$

$$\text{La relation (5) s'écrit : } \frac{Q^2 2k \text{tg} \frac{\varphi}{2}}{g k^6 \cdot \text{tg}^3 \frac{\varphi}{2}} = 1 \quad (5')$$

ou bien après simplification :

$$\frac{2Q^2}{g k^5 \text{tg}^2 \frac{\varphi}{2}} = 1 \quad (6)$$

Il vient alors que :

$$Q = \sqrt{g/2} \text{tg} \frac{\varphi}{2} \cdot k^{5/2} \quad (7)$$

En substituant la relation (7) dans (4'), on tire :

$$H_k = k + \frac{g/2 \cdot k^5 \cdot \text{tg}^2 \frac{\varphi}{2}}{2g k^4 \text{tg}^2 \frac{\varphi}{2}} = k + k/4 = 1,25k$$

$$H_k = 1,25 k \quad (8)$$

La vitesse moyenne de l'écoulement, que nous appellerons "vitesse critique" est suivant (3) :

$$V_k = Q / k^2 \text{tg} \frac{\varphi}{2} \quad (3')$$

La profondeur critique peut être déterminée par la relation (6).

$$k = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{g \operatorname{tg}^2 \varphi/2}} \quad (6')$$

La relation (3') devient par suite :

$$V_k = \sqrt[5]{\frac{Q \cdot g^2}{4 \operatorname{tg} \varphi/2}} \quad (9)$$

II.2. Etude de l'écoulement dans un tronçon de canal triangulaire succédant au rétrécissement .

II.2.1. Constance de la charge H sur un certain parcours:

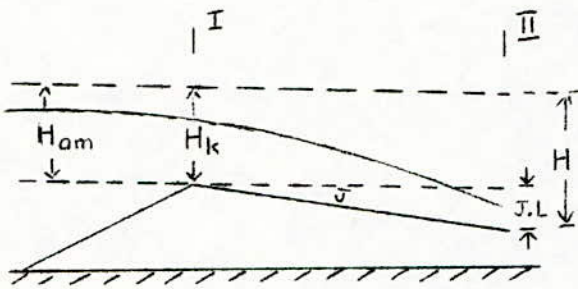


fig 3.

Dans cette étude nous examinerons le comportement du courant dans le cas où celui-ci , après avoir traversé la section I considérée ci-contre, continue son chemin dans un tronçon de canal ayant une pente J

et un profil en travers constant, identique au profil I .

L'écoulement de la veine se poursuit dans une première partie du dit tronçon en régime torrentiel avec une accélération qui dépend de la pente J . Le plan de charge ne subit qu'une légère variation , négligeable pendant le parcours de cette portion de tronçon; sa distance verticale par rapport au fond du canal, dans la section II située à une distance l en aval de la section I, est :

$$H = H_{am} + J.l \quad (10)$$

En désignant par h le tirant d'eau dans la section II, l'écoulement de l'eau dans cette dernière section est caractérisé par

$$l'équation (4) : H = h + \frac{Q^2}{2gh^4 \operatorname{tg}^2 \frac{\varphi}{2}} .$$

En tenant compte de (6'), cette relation s'écrit :

$$H = h + \frac{k^5}{4h^4} \quad (11)$$

II.2.2 Nature torrentielle de l'écoulement :

En posant :

$$H_x = H/k \quad (I2)$$

et
$$h_x = h/k \quad (I3)$$

la relation (11) devient :

$$H_x \cdot k = h_x \cdot k + \frac{k^5}{4 h_x^4 k^4} \quad (11')$$

ou bien après simplification :

$$H_x = h_x + \frac{1}{4 h_x} \quad (I4)$$

La fonction exprimée par (I4) est représentée graphiquement dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques : figure n° 4 .

On remarque que si $h_x = 1$, c'est à dire $h = k$, la valeur correspondante H_x représente le minimum de la fonction exprimée par (I4) :

$$H_{x \min.} = 1 + \frac{1}{4} = 5/4 \quad , \text{ mais}$$

$H_{\min.} = Ham.$; si $H > Ham.$, il est évident que $H_x > 5/4$

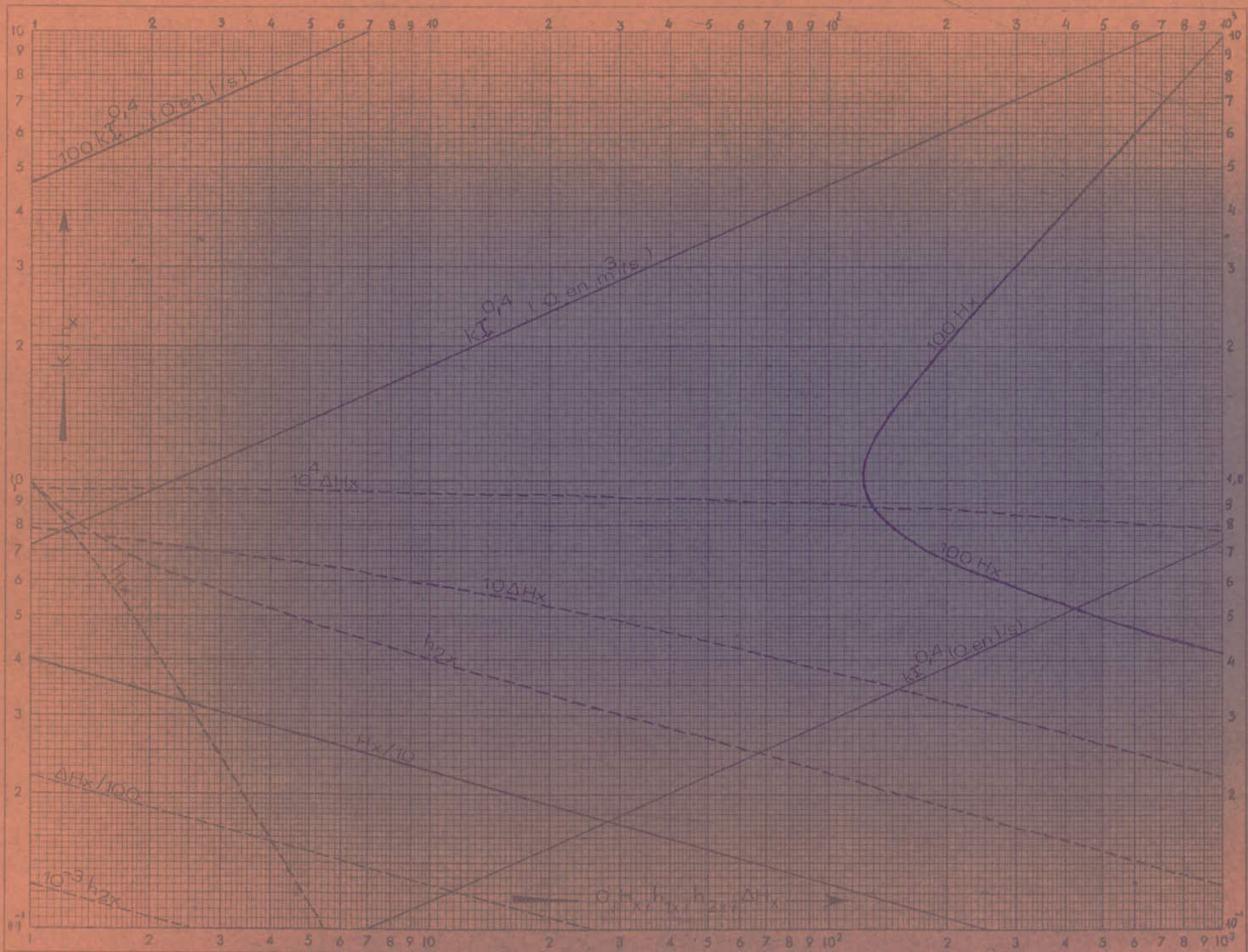
et $h_x < 1$ c'est à dire $h < k$, par suite $V > V_k$.

Il est démontré que le régime de l'écoulement dans le premier tronçon du canal à profil triangulaire, en aval de la section I, est torrentiel .

II.3. Etude de l'écoulement dans la zone de transition entre le régime torrentiel et le régime à l'aval de l'ouvrage .

II.3. Influence du profil terminal :

Considérons l'intersection fictive du plan d'eau à l'aval de l'ouvrage et de la surface libre de l'écoulement, en régime torrentiel, dans la portion du tronçon I à II que nous venons d'étudier . Trois cas sont à considérer :



- 1) cette intersection fictive, située à l'aval de l'extrémité du canal de raccordement, se fait en réalité par une chute.
- 2) cette intersection se trouve à l'amont de l'extrémité du canal de raccordement. Le raccordement se fait en réalité par l'intermédiaire d'un ressaut.
- 3) cas limite : l'intersection fictive se situe au droit de l'extrémité du canal. Le raccordement réel se confond avec le raccordement fictif.

II.3.2 Cas du ressaut hydraulique :

Nous nous plaçons dans le deuxième cas où le changement de régime se fait par un ressaut régi par la loi de l'équilibre hydrodynamique; cet équilibre s'exprime par le théorème des quantités de mouvement.

En désignant par P_I la pression moyenne, par V_I la vitesse moyenne et par A_I la section mouillée, dans la section initiale du ressaut et par P_2 , V_2 , A_2 les éléments analogues relatifs à la section finale, on peut écrire :

$$P_I \cdot A_I + Q \cdot V_I \cdot \rho = P_2 \cdot A_2 + Q \cdot V_2 \cdot \rho \quad (15)$$

en supposant que le coefficient des quantités de mouvement est égal à l'unité.

II.3.3 Relation entre le tirant d'eau critique et les tirants d'eau à l'amont et à l'aval du ressaut

Si h_I et h_2 sont les tirants d'eau initial et final et si $\bar{\omega}$ est le poids spécifique de l'eau, on peut déduire de la relation (15) :

$$\bar{\omega} \frac{h_I^3}{3} \cdot \frac{\varphi}{2} + \frac{Q^2 \cdot \bar{\omega}}{gh_I^2 \cdot \frac{\varphi}{2}} = \bar{\omega} \frac{h_2^3}{3} \cdot \frac{\varphi}{2} + \frac{\bar{\omega} Q^2}{gh_2^2 \cdot \frac{\varphi}{2}}$$

En divisant les deux membres de cette équation par $\bar{\omega}$ et en tenant compte de la relation (6), il vient :

$$\frac{h_I^3}{3} \cdot \frac{\varphi}{2} + \frac{k^5 \cdot \frac{\varphi}{2}}{2h_I^2 \cdot \frac{\varphi}{2}} = \frac{h_2^3}{3} \cdot \frac{\varphi}{2} + \frac{k^5 \cdot \frac{\varphi}{2}}{2h_2^2 \cdot \frac{\varphi}{2}}$$

En divisant par $\frac{\varphi}{2}$, on écrit :

$$\frac{h_1^3}{3} + \frac{k^5}{2h_1^2} = \frac{h_2^3}{3} + \frac{k^5}{2h_2^2} \quad (I 6)$$

II.4 Fonctionnement théorique de l'appareil .

II.4.1 Variation concomittante des tirants d'eau à l'amont et à l'aval ramenés au tirant d'eau critique :

En tenant compte de la relation (I 3) , (I 6) devient :

$$\frac{h_1^3 k^3}{3} + \frac{k^5}{2h_1^2 k^2} = \frac{h_{2x}^3 k^3}{3} + \frac{k^5}{2h_{2x}^2 k^2} \quad (I 6')$$

En divisant les deux membres de (I 6') par k³, on écrit :

$$\frac{h_1^3}{3} + \frac{1}{2h_1^2} = \frac{h_{2x}^3}{3} + \frac{1}{2h_{2x}^2} \quad (I 7)$$

La relation (I 7) peut s'écrire sous la forme :

$$2h_1^3 + 3h_1^{-2} = 2h_{2x}^3 + 3h_{2x}^{-2}$$

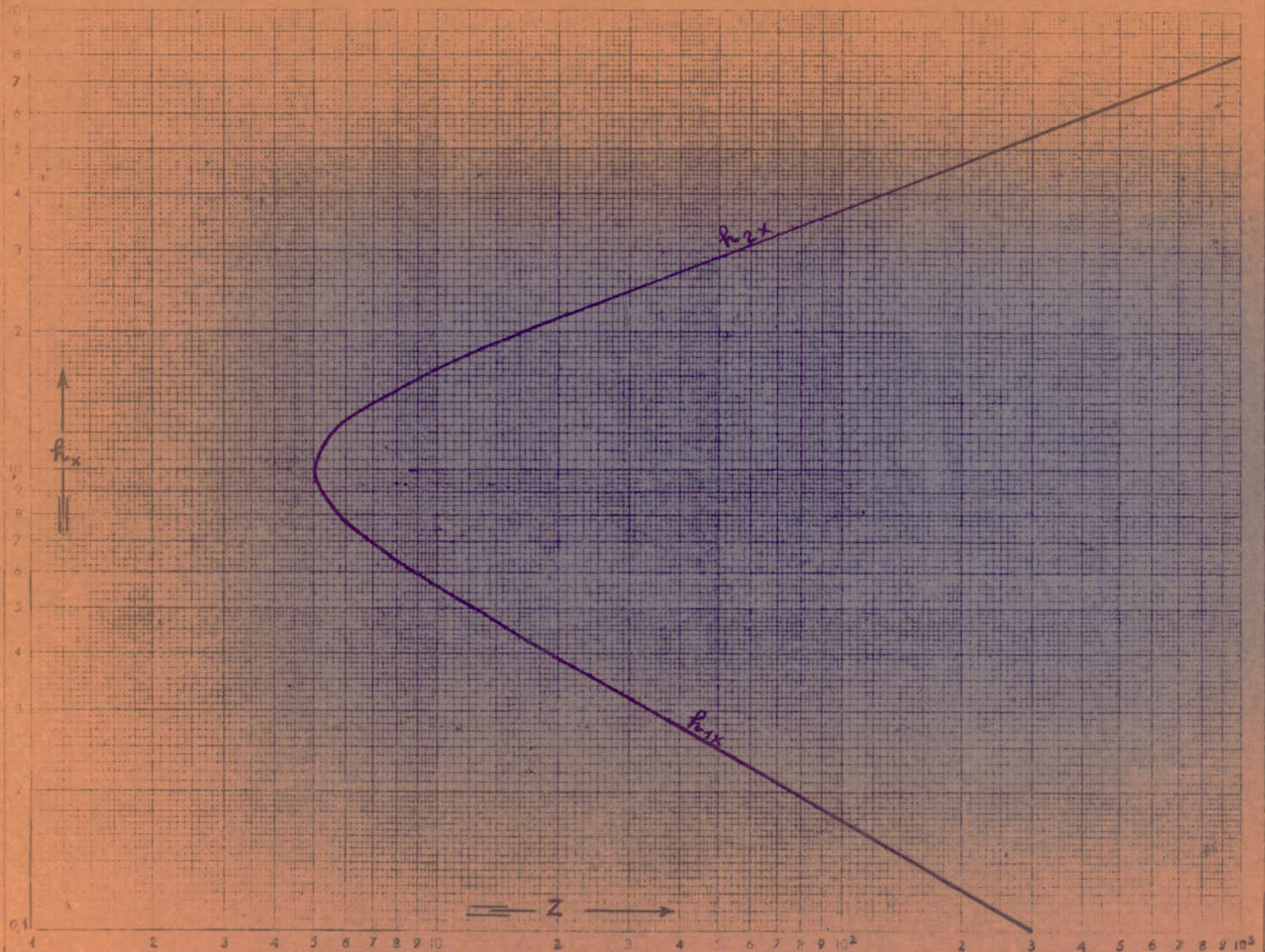
Il est évident que la fonction $Z = 2h_{2x}^3 + 3h_{2x}^{-2}$ est identique à la fonction $Z = 2h_1^3 + 3h_1^{-2}$.

... représentant Z dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques (figure n° 5), on peut constater qu'à chaque valeur déterminée de Z correspondent deux valeurs différentes de h_{1x} et h_{2x} respectivement inférieure et supérieure à l'unité.

Il est donc logique de supposer que le tronçon décroissant de la courbe représentative de Z correspond au régime torrentiel, tandis que le tronçon croissant correspond au régime fluvial :

$$\begin{aligned} h_{1x} < 1 & \text{ donc } h_1 < k \\ h_{2x} > 1 & \text{ donc } h_2 > k . \end{aligned}$$

Cette hypothèse a été confirmée par l'expérience qui a démontré que la valeur h₁ = h_{1x} . k correspond à la hauteur du tirant d'eau dans la section initiale du ressaut et que la valeur h₂ = h_{2x} . k



correspond à la hauteur du tirant d'eau dans la section finale du ressaut .

II.4.2 Perte de charge ramenée au tirant d'eau critique :

La perte de charge correspondant à l'énergie dissipée par le ressaut est :

$$\Delta H = h_I - h_2 + \frac{V_I^2 - V_2^2}{2g} \quad (18)$$

En considérant la relation (3), l'équation (18) peut s'écrire sous la forme :

$$\Delta H = h_I - h_2 + \frac{Q^2}{2g \, tg^2 / 2} \cdot (h_I^{-4} - h_2^{-4}) \quad (18')$$

En posant $\Delta H_x = \frac{\Delta H}{k}$ (19) et en tenant compte de (6')

et de (13), la relation (18') devient :

$$\Delta H_x = h_{I_x} \cdot k - h_{2_x} \cdot k + \frac{k^5}{4} \left(\frac{1}{h_{I_x}^4 k} - \frac{1}{h_{2_x}^4 k} \right)$$

ou bien après simplification :

$$\Delta H_x = h_{I_x} - h_{2_x} + (h_{I_x}^{-4} - h_{2_x}^{-4}) / 4 \quad (20)$$

II.4.3 Détermination complète du problème et résolution graphique :

Dans la relation (20), ΔH_x apparaît comme une fonction des deux variables h_{I_x} et h_{2_x} ; mais h_{2_x} étant une fonction de h_{I_x} , ΔH_x est bien déterminé si l'une de ces dites variables est connue .

Les paramètres H_{I_x} , h_{2_x} et ΔH_x sont représentés en fonction de h_{I_x} , dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques figure n° 4 .

Si l'un des paramètres est connu , les trois autres sont déterminés par simple lecture dans l'abaque .

Si le débit Q est donné , la hauteur du tirant d'eau critique k

est déterminé par l'équation (6') et si l'un des des éléments H_I , h_I, h_2 ou ΔH est connu , tous les autres sont déterminés suivant les relations (I2) , (I3) et (I9) .

Celà revient à dire que le phénomène du ressaut hydraulique en canal triangulaire est bien déterminé si le débit Q et l'un des éléments H_I , h_I , h_2 ou ΔH est donné ; la représentation graphique de la relation (6') permet la détermination rapide de la profondeur critique k . Grâce à la division logarithmique du système de coordonnées , toutes les opérations à effectuer en application des formules (I2) , (I3) , (I9) peuvent être exécutées par simple superposition ou retranchement des longueurs figuratives .

II.4.4 Position du profil initial du ressaut :

La position du profil initial du ressaut est déterminée par le point d'intersection de la ligne de fond et de l'horizontale située à une profondeur H_I en-dessous du plan de charge totale en amont de l'obstacle (figure n° 3); ce point est d'autant plus reculé vers la section I que ΔH est plus petit et devrait coïncider théoriquement avec celui-ci lorsque $\Delta H = 0$.

Cela signifierait que les perturbations se manifestant à l'aval de l'ouvrage n'ont aucune influence sur l'écoulement d'eau à l'amont de celui-ci, tant que le plan de charge à l'aval de l'ouvrage n'atteint pas un niveau égal à celui du plan de charge amont. Autrement dit le ressaut permettrait de récupérer la totalité de l'énergie potentielle transformée en énergie cinétique dans le retrécissement et la limite de la semi-modularité correspondrait à : $\Delta H_x = 0$, $H_{I_x} = 1,25$, $h_{I_x} = 1$, $h_{2_x} = 1$.

L'expérience montre que la réalité est un peu moins favorable; la limite de la semi-modularité, pour un canal triangulaire ayant un angle d'ouverture bien déterminé est en réalité toujours conditionné par les mêmes valeurs des paramètres ΔH_x , H_{I_x} , h_{I_x} et h_{2_x} . En désignant les dites valeurs correspondant à la limite de la semi-modularité par : $\Delta H_{x_{lim}}$, $H_{I_{x_{lim}}}$, $h_{I_{x_{lim}}}$. et

$h_{2x_{lim}}$, on peut énoncer que pour un angle d'ouverture bien déterminé : $\Delta H_{x_{lim}} = \text{constante}$, $H_{I_{x_{lim}}} = \text{constante}$, $h_{I_{x_{lim}}} = \text{constante}$
 $h_{2x_{lim}} = \text{constante}$.

La loi ci-dessus énoncée est la conséquence bien évidente des faits suivants :

1°) le profil en travers d'un canal triangulaire est entièrement déterminé par le seul élément que constitue l'angle φ d'ouverture du dièdre .

2°) il existe une similitude hydraulique parfaite entre les écoulements, correspondant à toute la gamme des débits imaginables, dans les canaux triangulaires ayant le même angle d'ouverture φ , si ΔH_x est constant .

II.5 Canal diédrique à parois planes muni d'un seuil . Expression du débit .

L'expression fondamentale du débit véhiculé par le canal peut être déterminée à l'aide des relations (7) et (8), en fonction de Ham.

$$Q = \sqrt{g/2} \operatorname{tg} \varphi/2 \cdot k^{5/2} \quad (7)$$

$$H_k = 5/4 \cdot k \quad (8)$$

En éliminant k entre (7) et (8), on peut écrire :

$$Q = \sqrt{g/2} \cdot \operatorname{tg} \varphi/2 \cdot H_k^{5/2} \cdot (4/5)^{5/2}$$

mais la constance de la charge le long du premier tronçon du canal permet d'écrire : $H_k = \text{Ham}$.

L'expression fondamentale du débit devient par suite :

$$Q = (4/5)^{5/2} \cdot \sqrt{g/2} \cdot \operatorname{tg} \varphi/2 \cdot \text{Ham}^{5/2} \quad \text{ou bien :}$$

$$Q = (4/5)^2 \cdot \sqrt{2g/5} \cdot \operatorname{tg} \varphi/2 \cdot \text{Ham}^{5/2} \quad (2I)$$

Cependant la mesure de Ham. n'est guère possible dans la pratique. Nous allons démontrer que celle-ci peut être remplacée par la mesure d'un tirant d'eau h relatif, situé en amont de la section retrécie. Ce profil d'aire A_I doit être choisi de façon que la perte de charge entre celui-ci et l'entrée du canal

triangulaire soit négligeable . Le profil examiné au cours de nos essais se situe à quelques millimètres à l'aval de l'entrée du convergent qui précède le canal triangulaire .

La charge Ham. s'exprime par la relation :

$$\text{Ham.} = h + Q^2 / 2gA_I^2 \quad (22)$$

$$\text{En posant } \varepsilon = \frac{A_I}{h^2 \text{tg } \varphi/2} \quad (23)$$

la relation (22) devient :

$$\text{Ham.} = h + \frac{Q^2}{2g \varepsilon^2 h^4 \text{tg}^2 \varphi/2} \quad (24)$$

$$\text{En posant } \tau = \frac{\text{Ham.} - h}{h} \quad (25) , \text{ on tire :}$$

$$1 + \tau = \text{Ham.} / h \quad (26)$$

En substituant cette dernière expression dans (24), on écrit :

$$h + \tau h = h + \frac{Q^2}{2g \varepsilon^2 h^4 \text{tg}^2 \varphi/2} \quad \text{d'où}$$

$$\tau h = \frac{Q^2}{2g \varepsilon^2 h^4 \text{tg}^2 \varphi/2} \quad \text{qui peut s'écrire :}$$

$$\frac{Q^2}{h^5} = 2g \varepsilon^2 \text{tg}^2 \varphi/2 \cdot \tau \quad (27)$$

En substituant la relation (21) dans (27), il vient :

$$\frac{g/2 \cdot (4/5)^5 \cdot \text{tg}^2 \varphi/2 \cdot \text{Ham.}^5}{h^5} = 2g \varepsilon^2 \text{tg}^2 \varphi/2 \cdot \tau$$

ou bien , après simplification :

$$\frac{\text{Ham.}^5}{h^5} = (5/4)^5 \cdot 4 \cdot \varepsilon^2 \cdot \tau \quad (28)$$

En tenant compte de (26) et en effectuant les calculs , la relation (28) devient :

$$(1 + \tau)^5 = 12,207 \varepsilon^2 \tau \quad (29)$$

Ce qui montre que le rapport $\tau = \frac{\text{Ham.} - h}{h}$ ne dépend que de ε et peut s'écrire symboliquement $\tau = f(\varepsilon)$ (29)

Les valeurs de cette fonction ont été déterminées par solution graphique représentée sur la figure n° 6 ; si l'on connaît la valeur de τ , Q peut être exprimé par la seule variable h . En effet, la combinaison des relations (21) et (26) permet d'établir la relation suivante :

$$Q = \left(\frac{4}{5}\right)^2 \sqrt{2g/5} \operatorname{tg} \varphi/2 \cdot (1 + \tau)^{5/2} \cdot h^{5/2}$$

qui peut s'écrire :

$$Q = \left(\frac{1 + \tau}{0,91}\right)^{5/2} \operatorname{tg} \varphi/2 \cdot h^{5/2} \quad (30)$$

Si l'on posait : $\mu = \left(\frac{1 + \tau}{0,91}\right)^{5/2}$ (31)

l'expression du débit serait :

$$Q = \mu \operatorname{tg} \varphi/2 \cdot h^{5/2} \quad (32)$$

Les valeurs de μ exprimées en fonction de ε figurent dans l'abaque de la figure n° 6 .

A condition que la mesure limnimétrique, à l'amont de l'écoulement, soit opérée dans un profil traversant le convergent qui précède le canal triangulaire, la relation entre la position verticale de ce profil et celle du canal reste toujours inchangée .

Dans de telles conditions l'aire A_I , (par conséquent les paramètres ε , τ et μ) ne dépend que de la hauteur h qui constitue le seul élément nécessaire et suffisant pour déterminer la valeur Q du débit , autrement dit $Q = f(h)$ (33)

Cette dernière fonction est déterminée expérimentalement par étalonnage et en ayant recours aux relations (31) et (32), ainsi qu'à l'abaque représentant $\mu = f(\varepsilon)$.

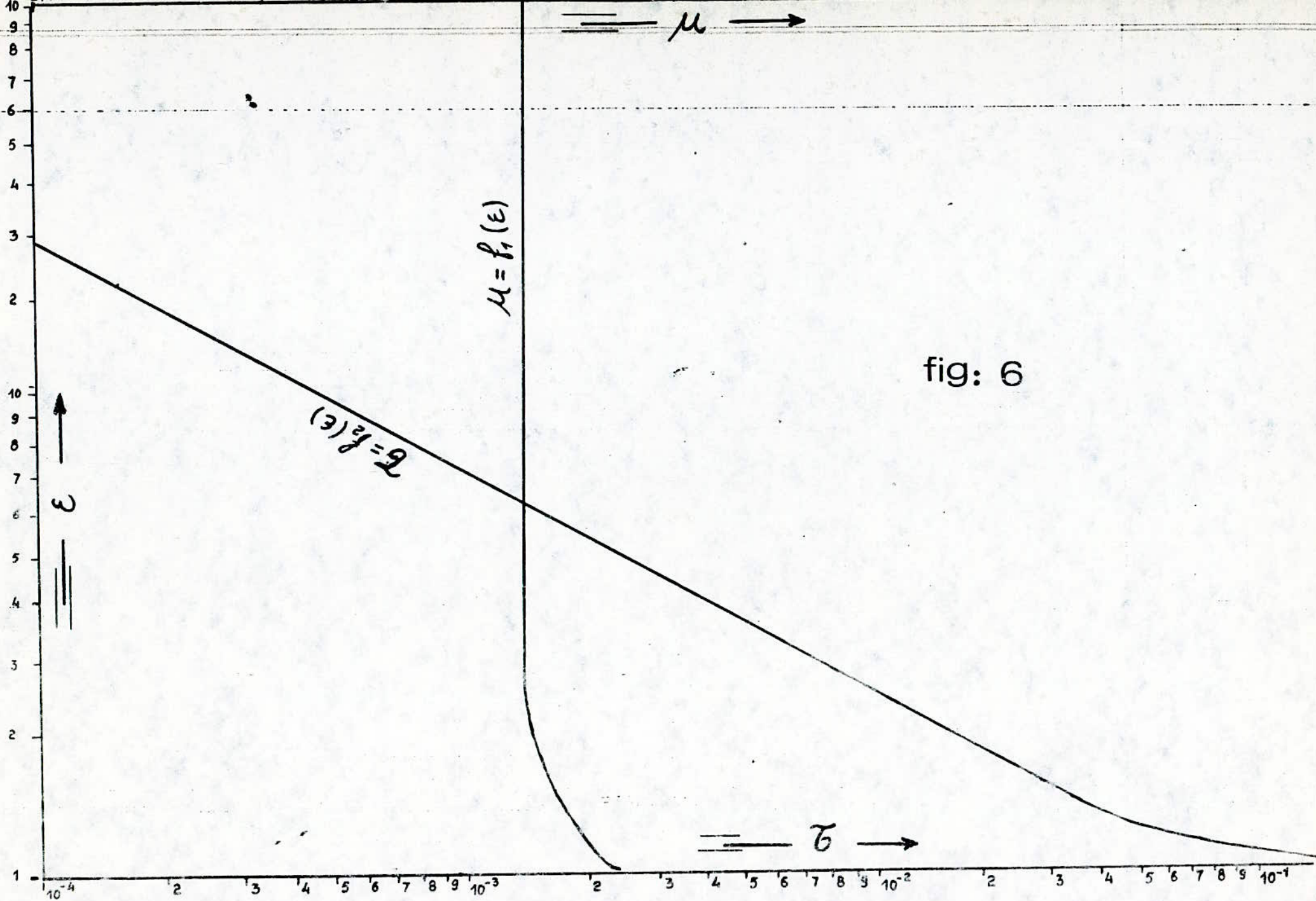
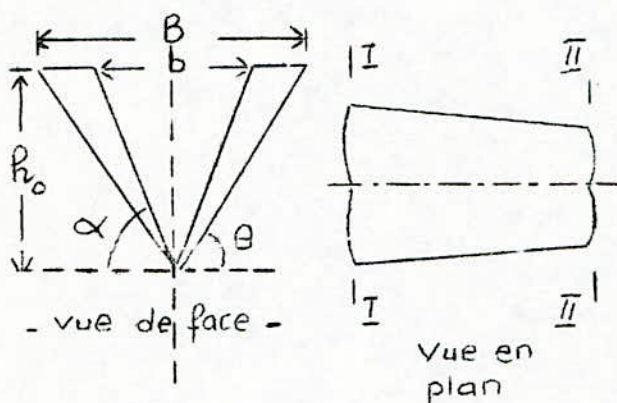


fig: 6

II.6 Canal diédrique à parois gauches, sans seuil.
Expression du débit.

Comme nous le verrons plus en détail lors de la description des appareils, celui-ci peut être alimenté par les deux extrémités; ceci permet d'étudier dans chaque cas l'expression du débit.

Le tronçon du canal que nous allons étudier est celui où l'angle d'ouverture du dièdre est variable. Cet angle varie en diminuant depuis $(\pi - 2\theta)$ jusqu'à $(\pi - 2\alpha)$ constituant l'angle d'ouverture de la section rétrécie de l'appareil; (fig. ci-dessous)



Si:

h_0 est la hauteur géométrique du canal .

B la largeur du dièdre à angle d'ouverture $(\pi - 2\theta)$.

b la largeur du dièdre à angle d'ouverture $(\pi - 2\alpha)$.

Nous pouvons établir géométriquement les relations suivantes :

$$\tilde{\zeta}_1 = \cotg \theta = \frac{B/2}{h_0} \quad (34)$$

$$\tilde{\zeta}_2 = \cotg \alpha = \frac{b/2}{h_0} \quad (35)$$

dont le rapport conduit à la relation :

$$\frac{\tilde{\zeta}_1}{\tilde{\zeta}_2} = B/b \quad (36)$$

La variation progressive de l'angle d'ouverture du dièdre permet d'obtenir une infinité de profondeurs critiques; la relation (6') permet alors d'écrire :

$$k_1^5 = \frac{2Q^2}{g \tilde{\zeta}_1^2} \quad (37)$$

exprimant la profondeur critique dans la section (I) et

$$k_2^5 = \frac{2Q^2}{g \tilde{h}_2^2} \quad (38) , \text{ exprimant la profondeur critique}$$

dans la section () .

En établissant le rapport des relations (37) et (38) , on peut écrire :

$$\frac{k_1^5}{k_2^5} = \frac{\tilde{h}_2^2}{\tilde{h}_1^2} = (b/B)^2 , \text{ ou bien :}$$

$$k_1 = k_2 \cdot (b/B)^{2/5} \quad (39)$$

En négligeant les pertes de charge linéaires entre la section d'entrée de l'appareil et la section retrécie, on peut écrire:

$$H_1 = H_2 = 5/4 \cdot h_2 \quad (8) , \text{ avec } h_2 = k_2$$

ainsi : $k_2 = 4/5 \cdot H_1$; par suite la relation (39) devient:

$$k_1 = 4/5 \cdot H_1 \cdot (b/B)^{2/5} \quad (40)$$

En rapportant la charge H_1 à la profondeur du tirant d'eau critique k_1 , il vient :

$$\frac{H_1}{k_1} = 5/4 \cdot (B/b)^{2/5} \quad (41)$$

En tenant compte de la relation (I2), on fait apparaitre le terme H_x qui ne sera fonction que des caractéristiques géométriques du canal étudié :

$$H_x = 5/4 \cdot (B/b)^{2/5} \quad (41')$$

En substituant la relation (I4) dans (41'), on établit la relation suivante :

$$5/4 \cdot (B/b)^{2/5} = h_x + \frac{1}{4 \frac{h_x}{x}} \quad (42)$$

Cette fonction est représentée , dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques, sur la figure n° 4 qui permet de déterminer le paramètre h_x pour n'importe quel canal du type étudié .

En combinant les relations (36) et (37), on obtient :

$$Q^2 = g/2 \cdot \zeta_2^2 \cdot (B/b)^2 \cdot k_1^5 \quad (43)$$

or $k_1 = \frac{h_1}{h_1/x}$, la relation (43) devient :

$$Q^2 = g/2 \cdot \zeta_2^2 \cdot (B/b)^2 \cdot \frac{h_1^5}{h_1/x^5} \quad , \text{ d'où finalement :}$$

$$Q = \sqrt{g/2} \cdot \frac{\zeta_2^2}{b/B \cdot h_1/x^{5/2}} \cdot h_1^{5/2} \quad (44)$$

En posant :

$$a = \frac{1}{b/B \cdot h_1/x^{5/2}}$$

l'expression du débit formulée par la relation (44) prend la forme :

$$Q = a \cdot \sqrt{g/2} \cdot \zeta_2^2 \cdot h_1^{5/2} \quad (44')$$

Dans cette relation, le paramètre a n'est fonction que du rapport b/B , donc des caractéristiques géométriques de l'appareil .

Conclusion

Parmi les expressions de débits que nous venons d'écrire, seul le débitmètre diédrique à parois gauches et sans seuil présente un intérêt certain quant à son utilisation pratique .

En effet , l'introduction du paramètre h_x permet de simplifier considérablement la loi " hauteur - débit " ; le débit est alors déterminé par simple lecture limnimétrique du tirant d'eau à l'entrée de l'appareil et moyennant les caractéristiques géométriques de ce dernier .

L'expression fondamentale du débit que nous avons formulée et présentée par la relation (44') est conforme à celles des appareils semi-modulaires ; en effet, le débit est fonction non seulement de la profondeur à l'amont du dispositif mais aussi des caractéristiques géométriques de ce dernier .

Deuxième partie: Conception des modèles réduits et étude expérimentale .

Au cours de l'étude expérimentale, nous allons nous intéresser au débitmètre diédrique et plus particulièrement au débitmètre diédrique sans seuil, à parois gauches, compte tenu des avantages qu'il présente .

Dans un premier temps, l'étude consistera d'une part à concevoir et à réaliser le débitmètre diédrique à parois planes avec seuil et d'autre part à effectuer des essais visant à établir la loi " hauteur-débit " expérimentale .

Dans un second temps, nous poursuivrons l'étude par la conception et la réalisation du débitmètre diédrique à parois gauches, sans seuil, sur lequel nous effectuerons les mêmes essais.

Les dimensions des modèles ont été fixées après avoir déterminé expérimentalement, sur un canal diédrique, les valeurs minima des grandeurs physiques (charge et débit) pour lesquelles les lois de similitude de Reech-Froude restent encore en vigueur; le nombre de Weber y correspondant a été également déterminé; il constitue le seuil en-dessous duquel ces lois ne sont plus valables, en raison de l'effet de la tension superficielle .

I. Etude expérimentale du débitmètre à ressaut en canal diédrique à parois planes, avec seuil.

I. Description de l'appareil :

Le modèle réduit de l'appareil a été confectionné et expérimenté dans le laboratoire de l'E.N.P.

Il est composé d'une tranche de canal diédrique ascendante suivie d'une tranche identique descendante, dont les angles d'ouverture sont de 90°; l'intersection de ces deux tranches constitue le seuil diédrique .

La pente longitudinale du fond du canal, dans le sens du courant, est de 1/25 alors que les arêtes supérieures sont horizontales.

Le tout est construit en pléxiglass de 5 mm d'épaisseur. Cet ensemble est fixé sur une plaque en pléxiglass, de 5 mm d'épaisseur également, verticale et perpendiculaire au sens du courant; cette plaque coulisse verticalement entre deux cornières formant des glissières fixées à leur tour aux flancs d'un bassin rectangulaire contenant l'ensemble; ces glissières sont également fixées entre deux plaques inférieures empêchant la communication entre l'amont et l'aval de l'écoulement .

Un manomètre de pente 1/4 , connecté à un bac tranquilisateur solidaire du débitmètre, permet la lecture directe de la hauteur de déversement h .

La prise de pression opérée dans la tranche ascendante du canal, ainsi que le zéro du manomètre, sont situés dans le même plan horizontal contenant la pointe du triangle isocèle qui constitue le seuil .

Un dispositif permet de régler à volonté la position verticale de la plaque coulissante, du débitmètre, du bac tranquilisateur et du manomètre qui tous quatres solidaires .

Le rôle de la plaque coulissante est donc double; elle supporte et règle d'une part la position verticale de l'appareil

d'autre part le courant liquide à passer intégralement à travers le canal triangulaire. L'étanchéité est rendue parfaite par l'application de deux ressorts en pléxiglass qui accolent la plaque porteuse aux plaques séparatives inférieures .

L'écoulement est tranquilisé grâce à une plaque verticale disposée à l'amont, dont la hauteur est inférieure à celle du bassin, laissant ainsi une ouverture rectangulaire entre son extrémité inférieure et le fond du bassin; cette ouverture permet à l'écoulement de s'effectuer avec le minimum de perturbations.

Des prises de pression sont également opérées dans la tranche descendante du canal afin de mesurer la profondeur à l'aval du ressaut; plusieurs prises de pression sont nécessaires car le ressaut se déplace quand le débit varie .

1.2 Essais de mesure des débits et interprétation des résultats:

Les essais ont consisté à déterminer les débits expérimentaux par mesure volumétrique à l'aval de l'appareil, ainsi que les débits théoriques par mesure limnimétrique de la profondeur h de déversement à l'amont .

Les débits expérimentaux sont obtenus par l'évaluation du temps de remplissage d'une capacité jaugée, tandis que les débits théoriques sont calculés à l'aide de la relation (32) et moyennant l'abaque n° 6 .

L'aire A_1 citée dans la théorie est exactement déterminée par la seule variable h .

Les essais que nous avons effectués nous ont permis de dresser le tableau de la page suivante .

Tableau n° I :

| h' (cm) manomètre | h=h'/4 (cm) déversement | V (l) | t (sec) | Q (l/s) expériment. | Q (l/s) moyen |
|----------------------|----------------------------|------------------------------|------------------------------|--------------------------------------|------------------|
| 8,6 | 2,15 | 6,63 6,55 6,52 | 89,3 88,5 87,5 | 0,0742 0,0740 0,0739 | 0,074 |
| 10,6 | 2,65 | 6,68 6,81 7,11 6,63 | 53,2 54,8 56,7 53,6 | 0,1255 0,1245 0,1255 0,1235 | 0,125 |
| 11,3 | 2,825 | 6,62 6,97 6,87 | 45,2 51,3 50,5 | 0,1375 0,1360 0,1360 | 0,1365 |
| 14,2 | 3,55 | 6,70 7,23 7,30 7,61 | 26,2 28,3 28,7 29,7 | 0,256 0,256 0,256 0,256 | 0,256 |
| 14,9 | 3,725 | 6,73 6,77 6,40 | 21,2 21,2 20,0 | 0,318 0,320 0,320 | 0,3195 |
| 19,6 | 4,9 | 7,70 6,20 6,62 6,98 | 13,6 11,1 12,0 12,3 | 0,566 0,558 0,553 0,567 | 0,561 |
| 24,6 | 6,15 | 6,97 7,42 6,72 7,17 | 6,4 6,5 6,0 6,5 | 1,09 1,14 1,12 1,10 | 1,11 |
| 26,4 | 6,6 | 6,65 6,67 6,87 | 4,8 4,7 4,8 | 1,39 1,42 1,43 | 1,42 |

Les dimensions réduites de notre appareil ne nous ont pas permis de déterminer les débits supérieurs à 1,45 l/s .

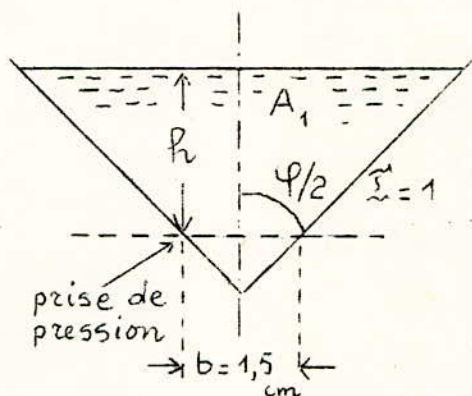
Un ajustement puissance a permis d'établir la relation $h = f(Q)$ expérimentale, avec un coefficient de corrélation $r = 0,99857$:

$$h_{\text{exp.}} = 5,9 \cdot Q^{0,381}$$

La courbe représentant la fonction ci-dessus est représenté sur l'abaque de la figure n°7 , dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques; les valeurs de h sont exprimées en centimètres, tandis que celles du débit sont exprimées en litre par

La colonne n°2 du tableau précédent nous a permis de calculer les débits théoriques; le coefficient μ est déterminé connaissant la valeur de τ ; celle-ci est évaluée moyennant la relation (23) ainsi que l'abaque représentant $\tau = f (\varepsilon)$.

Il est à préciser que l'aire A_1 représente l'aire du trapèze dont la base fictive b est obtenue en traçant l'horizontale passant par la prise de pression; cette base b est constante quelque soit la profondeur h et vaut 1,5 cm . (figure ci-dessous)



Le tableau de la page suivante a été établi comme suit :

- la mesure de h permet de calculer l'aire A_1 en application de la relation : $A_1 = h (b + \zeta h)$.
- le couple de valeurs (h , A_1) permet le calcul de ε suivant la relation (23) .

- grâce à cette valeur de ε on détermine graphiquement dans l'abaque n°6 la valeur y correspondante de τ . Par ailleurs, on peut calculer la valeur de τ à l'aide de la relation (29) .

- Enfin, la valeur de τ permet de déterminer μ en application de la relation (31) .

Nous avons délibérément calculé les coefficients τ et μ afin d'obtenir leurs valeurs exactes; cependant la lecture de ces coefficients dans l'abaque n°6 donne une bonne précision .

Tableau n° 2 .

| h (cm) | A ₁ (cm ²) | ε | τ · 10 ⁻² | μ | Q (l/s) |
|--------|-----------------------------------|-------|----------------------|-------|---------|
| 2,15 | 7,8475 | 1,697 | 3,36 | 1,375 | 0,0932 |
| 2,65 | 10,9975 | 1,566 | 4,072 | 1,390 | 0,159 |
| 2,825 | 12,2181 | 1,531 | 4,31 | 1,406 | 0,1877 |
| 3,55 | 17,9275 | 1,422 | 5,23 | 1,438 | 0,317 |
| 3,725 | 19,4631 | 1,402 | 5,43 | 1,445 | 0,387 |
| 4,9 | 31,36 | 1,306 | 6,6 | 1,485 | 0,789 |
| 6,15 | 47,0475 | 1,244 | 7,64 | 1,522 | 1,427 |
| 6,6 | 53,46 | 1,227 | 8 | 1,534 | 1,71 |

Un ajustement puissance nous a permis d'établir la loi $h=f(Q)$ théorique, avec un coefficient de corrélation $r = 0,99999$:

$$h = 5,368 \cdot Q^{0,384}$$

Cette fonction est représentée graphiquement dans l'abaque de la figure n° 7 , où la profondeur h est exprimée en centimètres et le débit Q en litre par seconde .

On constate donc que pour un même tirant d'eau h, le débit théorique est plus grand que le débit expérimental trouvé à partir de l'étalonnage de l'appareil; ce fait est dû à la contraction dont on exprime l'effet par le rapport : $r = Q_{exp.} / Q_{th.}$

Ce nombre sans dimension est le coefficient de contraction de l'appareil. Sa valeur dépend des caractéristiques constructives de ce dernier et subit de légères variations en fonction du débit

Les valeurs du coefficient de contraction r sont rapportées dans le tableau suivant :

Tableau n° 3 :

| $Q_{exp.} \text{ (l/s)}$ | $Q_{th.} \text{ (l/s)}$ | $r = Q_{exp.}/Q_{th.}$ |
|----------------------------|---------------------------|------------------------|
| 0,074 | 0,0932 | 0,794 |
| 0,125 | 0,159 | 0,786 |
| 0,1365 | 0,1877 | 0,727 |
| 0,256 | 0,341 | 0,750 |
| 0,3195 | 0,387 | 0,825 |
| 0,561 | 0,789 | 0,711 |
| 1,11 | 1,427 | 0,778 |
| 1,42 | 1,71 | 0,83 |

Nous avons enfin procédé à la détermination des caractéristiques du ressaut, correspondant à la limite de la semi-modularité .

Pour chaque débit expérimental, nous avons mesuré la profondeur à l'aval du ressaut quand celui-ci tendait à disparaître en se déplaçant vers l'amont; une tranche de liquide, en régime torrentiel reste cependant intercalée entre l'amont et l'aval .

Le déplacement du ressaut est obtenu par surélévation de la profondeur aval, occasionnée par l'abaissement du seuil grâce au dispositif de réglage vertical. En augmentant le débit, l'écoulement devient fluvial tout le long du canal et le ressaut disparaît.

La réapparition du ressaut, conditionnant le fonctionnement correct de l'appareil, ne peut se faire que par la surélévation du seuil.

Le dispositif de réglage vertical joue donc un rôle important mais il constitue cependant un inconvénient d'ordre pratique .

Les caractéristiques du ressaut correspondant à la limite de la semi-modularité sont consignées dans les cinq dernières colonnes du tableau suivant :

Tableau n° 4 :

| Ham. (cm) exp. | k (cm) | Ham (cm) calculé | $h_{\text{av.}}$ (cm) | Hav. (cm) calculé | $\frac{\text{Hav.}}{\text{Ham.}}$ | $\Delta H_{\text{lim.}}$ (cm) | $\Delta H_{x_{\text{lim.}}}$ |
|----------------------|-----------|---------------------|--------------------------|-------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|------------------------------|
| 2,195 | 1,620 | 2,025 | 2,00 | 2,0606 | 0,9387 | 0,1344 | 0,0829 |
| 2,716 | 1,998 | 2,498 | 2,45 | 2,5402 | 0,9352 | 0,1758 | 0,0879 |
| 2,888 | 2,070 | 2,588 | 2,60 | 2,6887 | 0,9310 | 0,1993 | 0,0962 |
| 3,654 | 2,662 | 3,328 | 3,30 | 3,4394 | 0,9412 | 0,2146 | 0,0806 |
| 3,862 | 2,909 | 3,636 | 3,45 | 3,6370 | 0,9417 | 0,2250 | 0,0773 |
| 5,063 | 3,643 | 4,554 | 4,55 | 4,7696 | 0,9420 | 0,2934 | 0,0805 |
| 6,434 | 4,787 | 5,984 | 5,70 | 6,0848 | 0,9457 | 0,3492 | 0,0729 |
| 6,960 | 5,283 | 6,603 | 6,00 | 6,5272 | 0,9378 | 0,4328 | 0,0819 |

On peut alors constater que le rapport Hav. / Ham. prend la valeur moyenne de 0,94 . Autrement dit, grâce au ressaut hydraulique dans le canal diédrique à parois planes, nous pouvons récupérer les 94% de la charge initiale, à l'aval de l'écoulement .

Un ajustement puissance nous a permis d'établir la loi $\Delta H_{\text{lim.}} = f(Q)$ avec un coefficient de corrélation $r = 0,98462$:

$$\Delta H_{\text{lim.}} = 3,577 \cdot Q^{0,353}$$

Cette relation est représentée graphiquement, dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques, dans l'abaque de la figure n° 7 .

$\Delta H_{\text{lim.}}$ est exprimé en millimètres, tandis que le débit Q est exprimé en litre par seconde .

La relation $Ham. = f(Q)$ expérimentale a été également déterminée par un ajustement puissance, avec un coefficient de corrélation $r = 0,95944$:

$$Ham. = 5,577. Q^{0,393}$$

Cette relation est aussi représentée dans l'abaque de la figure n° 7, en coordonnées à divisions logarithmiques; Ham. est exprimé en centimètres, tandis que le débit est exprimé en litre par seconde.

Nous représentons également dans le même abaque la relation $Hav. = f(Q)$, obtenue par un ajustement puissance avec un coefficient de corrélation $r = 0,96422$:

$$Hav. = 5,624. Q^{0,402}$$

Nous pouvons donc constater que la courbe représentative de $H_{lim.} = f(Q)$ est parallèle à celle de $h = f(Q)$ et de $Ham. = f(Q)$; il est alors prouvé par l'expérience que le rapport $\Delta H_{lim.} / Ham. = \text{constante}$. Mais, en tenant compte du fait que :

$$\Delta H_{x_{lim.}} = \frac{\Delta H_{lim.}}{k} = \frac{\Delta H_{lim.}}{4/5. Ham.} = 5/4. \Delta H_{lim.}/Ham.$$

on en déduit que $\Delta H_{x_{lim.}}$ est aussi constant.

L'expérience montre finalement, que pour un canal triangulaire à angle d'ouverture $\varphi = 90^\circ$, le rapport $\Delta H_{lim.}/Ham.$ reste pratiquement constant et prend la valeur moyenne de 0,06 :

$\Delta H_{lim.}/Ham. : 0,0612 ; 0,0647 ; 0,0690 ; 0,0587 ; 0,0582 ;$
 $0,0579 ; 0,0543 ; 0,0622 ; 0,0568 .$

I.3 Précision donnée par l'appareil :

L'appareil ainsi conçu permet le contrôle de tout débit supérieur à 2 centilitres par seconde; lorsque le débit est inférieur à cette valeur limite, l'effet de la tension superficielle fausse les résultats donnés par les diagrammes et les formules ci-dessus exposées.

Nous avons vu que le débit traversant l'appareil peut être exprimé en fonction de Ham. :

$$Q = \left(\frac{4}{5} \right)^2 \cdot \sqrt{2g/5} \cdot \operatorname{tg} \varphi/2 \cdot \operatorname{Ham}^{5/2} \quad (2I)$$

La précision obtenue, relative à la mesure d'un débit, ne dépend que de la précision obtenue dans la mesure de Ham. ; en effet on tire de l'équation (2I) : $-\frac{dQ}{Q} = \frac{5}{2} \cdot \frac{d\operatorname{Ham}}{\operatorname{Ham}}$ en vertu du théorème des erreurs relatives. La précision dans la mesure du débit est donc indépendante de la valeur de Ham. ; elle ne dépend que de la précision obtenue dans la mesure de Ham., donc de h. Le facteur de proportionnalité entre les deux précisions est constant et vaut 5/2 .

Le manomètre incliné de pente 1/4 , solidaire de la plaque coulissante qui porte le canal triangulaire, permet d'obtenir la plus grande précision possible dans la mesure de h ; en effet l'inclinaison d'un quart du manomètre nous donne pour un tirant d'eau de 1 cm, une lecture manométrique de 4 cm ; puisque l'erreur absolue commise sur nos lectures est de 0,5 mm , l'erreur commise dans la détermination de h est donc : $0,5/4 = 0,125$ mm .

En ce qui concerne les appareils de mesure type déversoir rectangulaire, Parschall etc... , l'erreur commise dans la détermination du débit dépend du rapport b/h et augmente rapidement quand h diminue (b est la largeur du canal) .

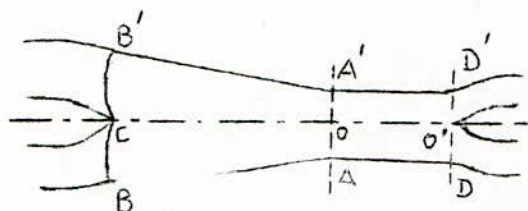
Le calcul de la précision obtenue dans la détermination du débit sera développé dans le cas du débitmètre diédrique à parois gauches, sans seuil .

II. Etude expérimentale du débitmètre à ressaut en canal diédrique à parois gauches, sans seuil

II.1 Description de l'appareil :

Le modèle réduit a été confectionné et expérimenté dans le laboratoire de l'E.N.P .

Il est composé des surfaces gauches CABCO et OA'B'CO constituant la partie convergente. (figure ci-dessous)



Les surfaces gauches ont leurs directrices constituées respectivement par les droites AB et OC, A'B' et OC en projection verticale sur un plan horizontal; leurs génératrices sont des droites parallèles à un plan perpendiculaire à l'axe longi-

tudinal de l'ouvrage.

Ces surfaces gauches sont conçues de telle manière que toute section transversale soit représentée par un triangle isocèle; le tronçon B'A'OABC constitue donc un canal triangulaire à angle d'ouverture variable.

La partie A'D'DA, succédant aux parois gauches, est un canal triangulaire à angle d'ouverture constant servant de transition à l'écoulement et dans lequel ce dernier devient critique.

L'angle d'ouverture du canal triangulaire, constitué des parois gauches, varie en diminuant depuis 87°, correspondant à l'angle d'ouverture de la section B'CB, jusqu'à 68° correspondant à l'angle d'ouverture de la section A'OA .

La longueur du segment A'A, correspondant à la largeur de la section sèche du canal de transition, est égale à 10,7 cm tandis que celle du segment B'B, correspondant à la largeur de la section sèche d'entrée de l'appareil, vaut 18 cm .

La longueur du canal triangulaire à angle d'ouverture variable, c'est à dire la longueur du segment CO, vaut 16 cm alors que celle du canal triangulaire à angle d'ouverture cons-

tant, c'est à dire la longueur du segment OO' , vaut 16,2 cm .

Le tronçon B'A'D'DAB, formé des parois gauches et de la transition, sépare deux canaux trapézoïdaux . A l'amont de la section B'CB , le canal trapézoïdal possède les caractéristiques suivantes:

- largeur du fond : 12,15 cm .
- hauteur géométrique : 11,2 cm .
- longueur totale : 60 cm .
- inclinaison du talus : 60° .

Le canal trapézoïdal situé à l'aval de la section D'O'D possède les caractéristiques suivantes :

- largeur du fond : 10,55 cm .
- hauteur géométrique : 9 cm .
- longueur totale : 61 cm .
- inclinaison du talus : $45,4^\circ$.

Tout l'ensemble ainsi décrit présente un fond uniforme de pente nulle et un axe longitudinal unique .

Les canaux trapézoïdaux sont munis à leur extrémité d'un bassin d'alimentation dans lequel est disposée une plaque servant de vanne qui se déplace verticalement; celle-ci sera utilisée pour le déplacement du ressaut .

Les parois des différentes composantes du dispositif sont confectionnées en plexiglass d'épaisseur 1,5 mm, tandis que le fond, réalisé également dans la même matière, présente une épaisseur de 10 mm .

Afin de mesurer la profondeur du tirant d'eau h , deux rails parallèles, suffisamment élevés, sont disposés de part et d'autre du dispositif . Ces rails permettent le déplacement horizontal d'un chariot, porteur d'un limnimètre à voyants lumineux dont la pointe touche la surface libre du liquide en écoulement; grâce à un dispositif de réglage vertical, le contact entre la pointe du limnimètre et la surface libre est aisément réalisé .

II.2 Essais de mesure des débits et interprétation des résultats :

Les essais ont consisté à déterminer les débits expérimentaux par mesure limnimétrique de la profondeur h à l'entrée de l'appareil, comme le préconise la théorie.

La valeur de débit est déterminée par la relation :

$$Q = \sqrt{g/2} \cdot \frac{\sum_2^{5/2}}{b/B \cdot h_{1x}^{5/2}} \cdot h_1 \quad (44)$$

dans laquelle les paramètres \sum_2 , b , B et h_{1x} sont entièrement déterminés puisqu'ils ne dépendent que des caractéristiques géométriques de l'appareil : $\sum_2 = \cotg 56^\circ$; $b = 10,7$ cm ; $B = 18$ cm.

Le rapport B/b permet le calcul du paramètre h_{1x} suivant la relation (42) dont on rappelle l'expression :

$$5/4 \cdot (B/b)^{2/5} = h_{1x} + \frac{1}{4 h_{1x}^4} \quad (42)$$

Par ailleurs, la valeur de h_{1x} peut être également déterminée graphiquement dans l'abaque de la figure n°4 ; en effet la quantité $5/4 \cdot (B/b)^{2/5}$ représente la valeur de H_{1x} que l'on peut lire sur l'axe des abscisses. Par projection verticale, on peut déterminer deux valeurs distinctes de h_{1x} ; mais comme la profondeur h_1 , mesurée à l'entrée de l'appareil, correspond à un écoulement fluvial, la valeur de h_{1x} que l'on doit retenir est celle qui correspond à la branche supérieure de la courbe .

Ainsi :

$$H_{1x} = 5/4 \cdot (B/b)^{2/5} = 5/4 \cdot (18/10,7)^{0,4} = 1,5391$$

correspondant à :

$$h_{1x} = 1,4881$$

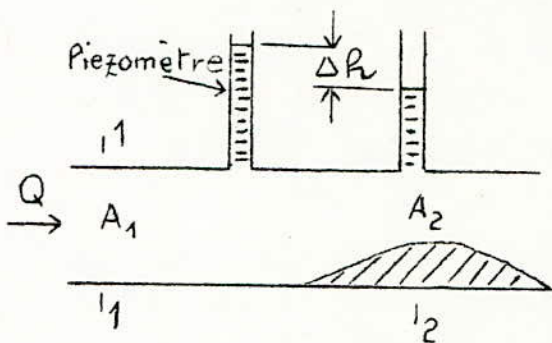
En substituant les valeurs numériques des différents paramètres de la relation (44), celle-ci devient :

$$Q = 0,81 \cdot h_1^{5/2} ; \quad h_1 \text{ en mètres, } Q \text{ en mètre-cube par seconde .}$$

Chaque débit calculé suivant cette dernière relation est contrôlé à l'amont par un débitmètre à segment, préalablement étalonné, placé à l'entrée du bassin d'alimentation. Le principe de ce débitmètre est développé ci-dessous.

II.2.1 Débitmètre à segment. Etalonnage.

L'intrêêt du dispositif est la possibilité de mesurer entre deux sections de l'écoulement, une différence de pression provoquée par un retrécissement graduel d'une section à l'autre. Il est entièrement conçu en Pléxiglass et est constitué d'un tube dans lequel est placé un col provoquant ainsi un retrécissement de la section du tube. (figure ci-dessous)



Deux prises de pression sont opérées l'une dans une section pleine du tube l'autre au droit même de la section retrécie; les prises de pression sont suffisamment rapprochées afin de négliger la perte de charge linéaire.

L'équation de Bernoulli, appliquée entre les sections A_I et A_2 nous permet d'écrire :

$$\frac{P_I}{\bar{\omega}} + \frac{V_I^2}{2g} = \frac{P_2}{\bar{\omega}} + \frac{V_2^2}{2g} \quad , \text{ ce qui peut s'écrire :}$$

$$\frac{P_I - P_2}{\bar{\omega}} = \Delta h = \frac{V_2^2 - V_I^2}{2g}$$

L'équation de continuité $V_I \cdot A_I = V_2 \cdot A_2 = Q$, nous donne :

$$V_I^2 = \left(A_2 / A_I \right)^2 \cdot V_2^2 \quad \text{d'où :}$$

$$\frac{P_I - P_2}{\bar{\omega}} = \frac{V_2^2}{2g} \left[1 - \left(A_2 / A_I \right)^2 \right] \quad , \text{ ainsi :}$$

$$V_2 = \frac{\sqrt{2g}}{\sqrt{1 - \left(A_2 / A_I \right)^2}} \cdot \sqrt{\frac{P_I - P_2}{\bar{\omega}}}$$

Le débit Q est alors exprimé par la relation :

$$Q = V_2 \cdot A_2 = A_2 \sqrt{\frac{2g}{1 - (A_2/A_1)^2}} \cdot \Delta h$$

En posant $C = \sqrt{\frac{2g}{1 - (A_2/A_1)^2}}$, l'expression du débit devient

$$Q = C \cdot A_2 \cdot \sqrt{\Delta h} \quad , \quad C \text{ étant le coefficient de débit .}$$

Le débitmètre à segment que nous avons utilisé a un diamètre de 4,2 cm ; l'étalonnage a été effectué en faisant passer différents débits que nous avons déterminés par mesure volumétrique ; le débit est alors calculé par le quotient du volume d'eau, recueilli dans une capacité jaugée, par le temps nécessaire à l'obtention de ce volume ; à chaque débit qui passe par l'appareil, correspond une différence de hauteurs piézométriques Δh que nous lisons sur un manomètre différentiel. Nous disposons ainsi d'une série de valeurs des débits Q et des Δh y correspondants .

Cette série de valeurs nous a permis d'établir la loi $Q = f(\Delta h)$ moyennant un ajustement puissance : $Q = 0,448 \Delta h^{0,502}$ avec un coefficient de corrélation $r = 0,99993$.

Les résultats de l'étalonnage sont consignés dans le tableau de la page suivante .

La courbe d'étalonnage du débitmètre à segment est représentée graphiquement sur la figure n°3 , dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques ; Δh est exprimée en centimètres, le débit Q en litre par seconde .

Tableau n° 5 .

| Δh (cm) | h_0 : Graduations capacité jaugée (cm) | V: Volume (l) | t temps (sec.) | Q_i (l/s) | moyenne des débits |
|--------------------|--|--------------------|----------------------|----------------|--------------------------|
| 39,10 | 18,50 | 27,50 | 9,85 | 2,792 | 2,825 |
| | 45,50 | 30,46 | 10,80 | 2,820 | |
| | 37,50 | 29,64 | 10,40 | 2,850 | |
| | 12,40 | 27,28 | 9,60 | 2,841 | |
| 31,70 | 21,00 | 27,95 | 10,90 | 2,564 | 2,566 |
| | 42,00 | 30,10 | 11,85 | 2,540 | |
| | 18,80 | 27,73 | 10,85 | 2,555 | |
| | 33,10 | 29,19 | 11,20 | 2,606 | |
| 19,72 | 17,60 | 27,60 | 13,50 | 2,044 | 1,980 |
| | 44,50 | 30,35 | 15,40 | 1,970 | |
| | 33,00 | 29,18 | 14,80 | 1,971 | |
| | 29,60 | 28,83 | 14,90 | 1,935 | |
| 9,00 | 16,40 | 27,48 | 20,40 | 1,347 | 1,352 |
| | 14,70 | 27,31 | 20,15 | 1,355 | |
| | 36,40 | 29,52 | 21,80 | 1,354 | |
| | 36,60 | 29,54 | 21,85 | 1,352 | |
| 1,65 | 26,80 | 28,54 | 49,20 | 0,580 | 0,577 |
| | 20,25 | 27,88 | 48,45 | 0,575 | |
| | 25,90 | 28,45 | 49,30 | 0,577 | |
| | 28,30 | 28,70 | 49,75 | 0,577 | |

$$\sigma_{\text{exp.}} = 0,5 \%$$

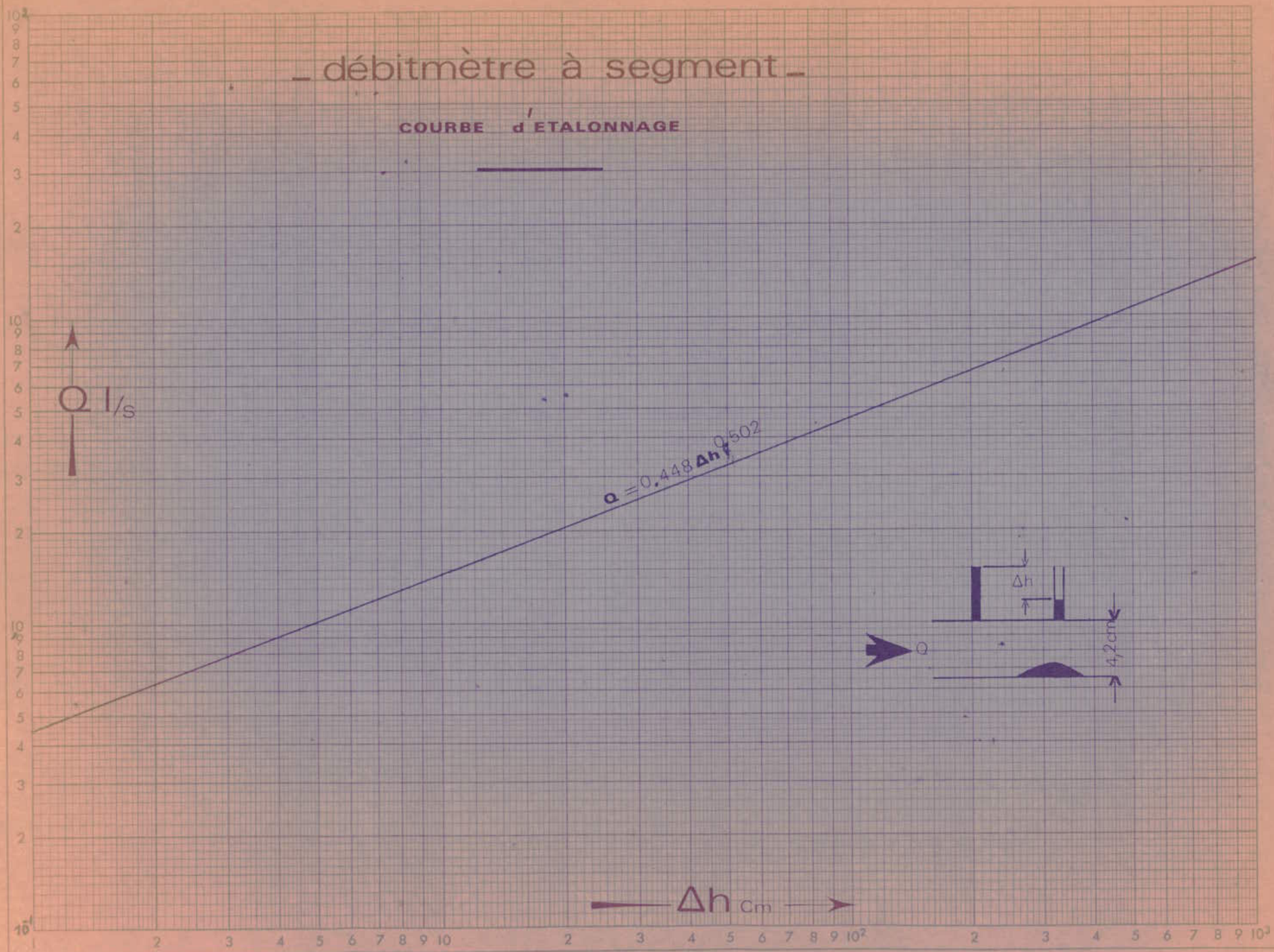
$\sigma_{\text{exp.}}$ est la variance relative moyenne des débits mesurés Q_i ; elle est calculée par : $[\sum (\Delta Q_i)^2]^{1/2} / \sum Q_i$

avec $\Delta Q_i / Q_i = \Delta V / V + \Delta t / t$ et $\Delta h_0 / h_0 = \Delta V / V$

$$\Delta h_0 = 0,5 \text{ mm} , \Delta t = 0,1 \text{ seconde} .$$

_ débitmètre à segment _

COURBE d'ETALONNAGE



Le tableau suivant permet de confronter les débits véhiculés par l'appareil étudié et ceux donnés par l'étalonnage du débitmètre à segment.

Tableau n° 6 .

| h_1 (cm) | $Q = 0,81 h_1^{5/2}$ (l/S) | Δh (cm) | $Q = 0,448 h^{0,502}$ (l/S) | $\Delta Q / Q$ (%) |
|---------------|-------------------------------|--------------------|----------------------------------|-------------------------|
| 8,3 | 1,6076 | 12,3 | 1,5791 | 1,77 |
| 8,1 | 1,5125 | 10,8 | 1,4793 | 2,2 |
| 7,0 | 1,0501 | 5,3 | 1,0348 | 1,46 |
| 6,4 | 0,8393 | 3,4 | 0,8281 | 1,33 |
| 6,3 | 0,8069 | 3,1 | 0,79057 | 2,02 |
| 6,05 | 0,7292 | 2,05 | 0,7097 | 2,7 |

On peut donc constater, à travers ces résultats, que les débits déterminés par mesure limnimétrique du tirant d'eau à l'entrée de l'appareil étudié sont très proches de ceux donnés par l'étalonnage du débitmètre à segment ; l'écart relatif entre les deux débits atteint une valeur maximale de 3 % .

En partant de la formule (44) , exprimant la relation entre la profondeur du tirant d'eau et le débit y correspondant, les valeurs exactes du débit ne sont obtenues que par l'introduction de coefficients très voisins de l'unité ; ces coefficients sont déterminés par le rapport du débit donné par l'appareil et celui donné par le débitmètre à segment :

$$\frac{Q_{\text{appareil}}}{Q_{\text{débit.seg.}}} = 0,9822 ; 0,9780 ; 0,9854 ; 0,9866 ; 0,9797 ; 0,9732 .$$

Nous avons procédé à la détermination des caractéristiques du ressaut, correspondant à la limite de la semi-modularité.

La profondeur du tirant d'eau, à l'aval du ressaut, est évaluée par mesure limnimétrique opérée dans le canal trapézoïdal de talus $\Sigma = \cotg 60^\circ$ et de base $b = 12,15$ cm ; le déplacement du ressaut est obtenu, pour un débit donné, par la surélévation progressive de la vanne située dans le bassin aval jusqu'à ce que la longueur du ressaut s'amenuise. Dans cette position finale du ressaut, on effectue les mesures limnimétriques des tirants d'eau amont et aval.

Pour un débit plus grand, on effectue les mêmes manipulations sur la vanne de telle manière que le ressaut, qui s'était déplacé vers l'aval, remonte le courant.

Les charges aval et amont sont calculées respectivement par les relations suivantes :

$$H_{am.} = h_{am.} + \frac{Q^2}{2g A^2} \quad \text{dans laquelle } h_{am.} \text{ est la profondeur}$$

du tirant d'eau amont mesurée à l'entrée de l'appareil, c'est à dire dans une section triangulaire de talus $\Sigma = \cotg 46,5^\circ = 0,94896$

et A étant la section mouillée correspondant à $h_{am.}$, c'est à dire $A = \Sigma h_{am.}^2 = 0,94896 h_{am.}^2$.

$$H_{av.} = h_{av.} + \frac{Q^2}{2g A^2} \quad \text{dans laquelle } h_{av.} \text{ est la profondeur}$$

du tirant d'eau aval mesurée dans la section trapézoïdale de talus $\Sigma = \cotg 60^\circ = 0,57735$, de base $b = 12,15$ cm et A étant la section mouillée correspondant à $h_{av.}$, c'est à dire $A = h_{av.} (b + \Sigma h_{av.})$.

Les caractéristiques du ressaut correspondant à la limite de la semi-modularité sont consignées dans le tableau de la page suivante .

Tableau n°7 .

| ham. (cm) | hav. (cm) | Ham. (cm) | Hav. (cm) | Hav. ----- Ham. | $\Delta H_{lim.}$ | Q (l/s) | k (cm) | $\Delta H_{x_{lim.}}$ |
|--------------|--------------|--------------|--------------|-----------------------|-------------------|------------|-----------|-----------------------|
| 8,3 | 7,9 | 8,608 | 7,975 | 0,9264 | 0,633 | 1,6076 | 6,499 | 0,0974 |
| 8,1 | 7,8 | 8,401 | 7,869 | 0,9367 | 0,532 | 1,5125 | 6,342 | 0,0839 |
| 7,0 | 6,75 | 7,260 | 6,798 | 0,9363 | 0,462 | 1,0501 | 5,481 | 0,0843 |
| 6,4 | 6,20 | 6,638 | 6,237 | 0,9390 | 0,401 | 0,8393 | 5,011 | 0,0800 |
| 6,3 | 6,10 | 6,534 | 6,136 | 0,9390 | 0,398 | 0,8069 | 4,933 | 0,0807 |
| 6,05 | 5,85 | 6,275 | 5,883 | 0,9370 | 0,392 | 0,7292 | 4,737 | 0,0827 |

On peut donc constater que le rapport Hav./Ham. prend la valeur moyenne de 0,93 ; autrement dit grâce au ressaut hydraylique dans le canal diédrique ainsi conçu, nous pouvons récupérer les 93 % de la charge initiale, à l'aval de l'écoulement.

On montre par l'expérience que pour un canal triangulaire à angle d'ouverture $\varphi = 68^\circ$, correspondant à l'angle d'ouverture de la section retrécie de l'appareil, le rapport $\Delta H_{lim.} / Ham.$ reste pratiquement constant et prend la valeur moyenne de 0,064 :

$$\Delta H_{lim.}/Ham. : 0,0735; 0,0633; 0,0636; 0,0604; 0,0609; 0,0624 .$$

Un ajustement puissance nous a permis d'établir la loi $\Delta H_{lim.} = f(Q)$ avec un coefficient de corrélation $r = 0,9690$; les calculs ont donné la relation suivante :

$$\Delta H_{lim.} = 4,522 Q^{0,558}$$

Cette relation est représentée graphiquement dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques, sur la figure n°9 où $\Delta H_{lim.}$ est exprimée en millimètres, le débit Q en litre par seconde .

La loi $Ham. = f(Q)$ expérimentale a été également déterminée par un ajustement puissance, avec un coefficient de corrélation $r = 0,99999$

Les calculs ont donné la relation suivante :

$$\text{Ham.} = 7,1196 Q^{0,4}$$

Cette relation est également représentée sur la figure n° 9 en coordonnées à divisions logarithmiques où Ham. est exprimée en centimètres tandis que le débit Q est exprimé en litre par seconde. Sur la même figure n° 9 est représentée la loi $\text{Hav.} = f(Q)$ obtenue par un ajustement puissance avec un coefficient de corrélation $r = 0,99964$; les calculs ont donné la relation suivante :

$$\text{Hav.} = 6,666 Q^{0,388}$$

Hav. est exprimée en centimètres , le débit Q en litre par seconde.

Afin de déterminer la loi $h = f(Q)$ de l'appareil étudié nous avons délibérément introduit dans les calculs, les débits obtenus par l'étalonnage du débitmètre à segment; en effet ce sont les débits exacts passant par l'appareil; un ajustement puissance nous a conduit à la loi suivante :

$$h = 6,918 Q^{0,3989}, \text{ avec un coefficient de corrélation } r = 0,99989;$$

h étant exprimée en centimètres tandis que le débit Q est exprimé en litre par seconde . Cette dernière relation est représentée sur la figure n°9 .

Nous pouvons donc constater que la courbe représentative de $\Delta H_{\text{lim.}} = f(Q)$ est parallèle à celle de $\text{ham.} = f(Q)$ et de $\text{Ham.} = f(Q)$; il est donc prouvé par l'expérience que le rapport $\Delta H_{\text{lim.}} / \text{Ham.} = \text{constante}$, par voie de conséquence $\Delta H_{x_{\text{lim.}}}$ l'est aussi .

Nous avons procédé enfin à quelques essais rapides, exécutés avec des alluvions charriés ou en suspension, qui nous ont permis d'observer que ces particules solides ne se déposaient jamais à proximité de la section de contrôle.

II.2.2 Précision donnée par l'appareil :

Nous avons vu que le débit véhiculé par l'appareil peut être exprimé en fonction de la profondeur h_1 mesurée à l'amont :

$$Q = \sqrt{g/2} \cdot \frac{\gamma_2}{b/B \cdot h_{1x}^{5/2}} \cdot h_1^{5/2}$$

Dans cette relation h_{1x} ne dépend que des caractéristiques géométriques b et B de l'appareil; par conséquent la précision obtenue dans la mesure du débit Q ne dépend que de la précision obtenue dans la mesure de h_1 ; en effet, le théorème des erreurs relatives nous permet d'écrire : $-\frac{dQ}{Q} = 5/2 \cdot dh_1/h_1$

Le facteur de proportionnalité entre les deux précisions est constant et vaut $5/2$.

Le tableau de la page suivante présente les erreurs relatives commises dans la détermination du débit Q , en considérant que l'erreur absolue commise dans la mesure de h_1 est de $0,5$ mm; le débit Q est calculé suivant la relation : $h_{am} = 6,918 Q^{0,3989}$ qui peut s'écrire : $Q = 0,0078389 h_{am}^{2,5069}$, où h_{am} est exprimée en centimètres , le débit Q en litre par seconde .

Un ajustement puissance nous a permis de déterminer la loi de variation de dQ/Q en fonction du débit Q , avec un coefficient de corrélation $r = 1$: $-\frac{dQ}{Q} = 1,812 Q^{-0,399}$.

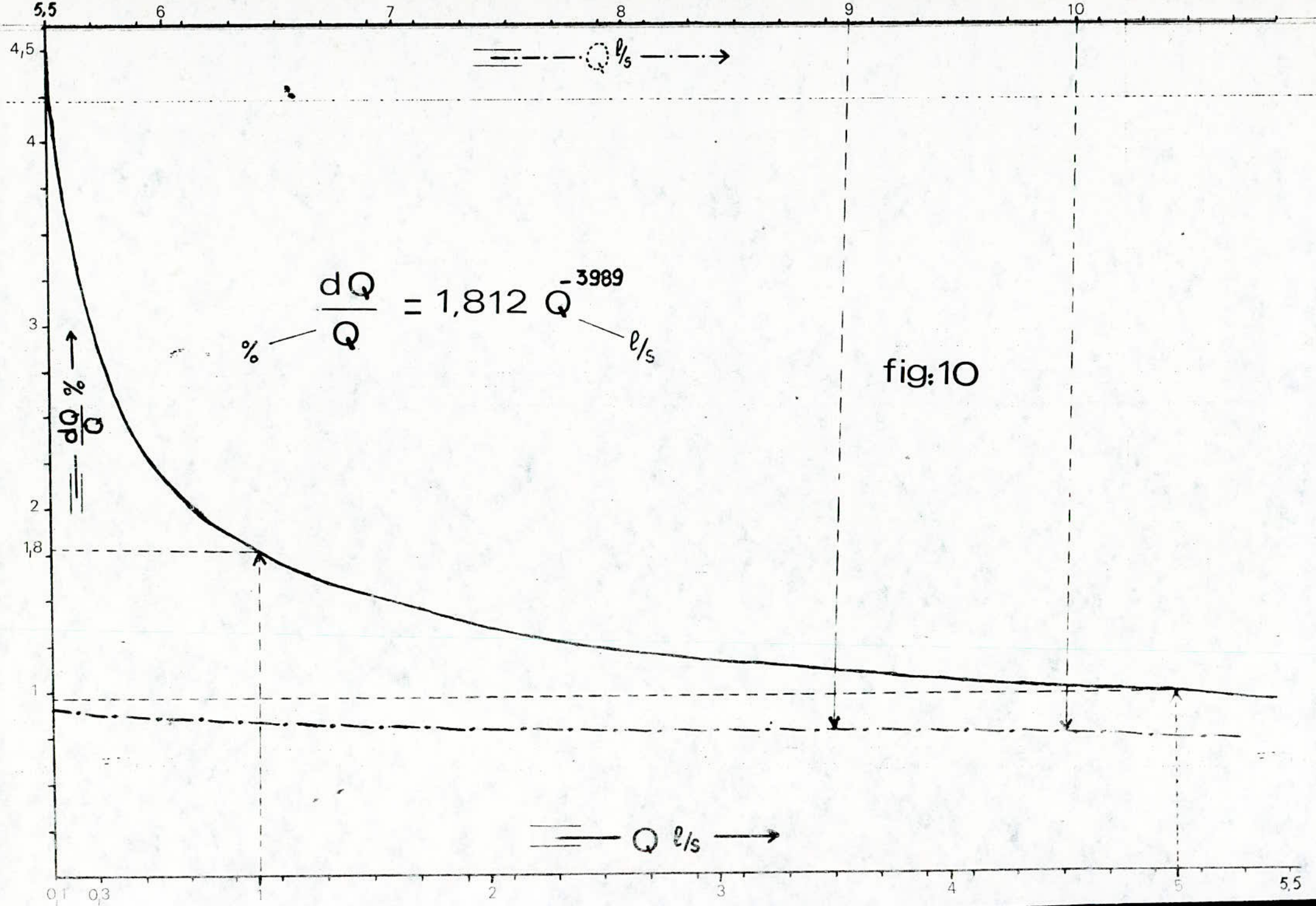
Cette relation est représentée sur le graphe de la figure n° 10 où dQ/Q est exprimé en % , le débit Q en litre par seconde.

Tableau n° 8 .

| h (cm) | Q (l/s) | dQ/Q (%) | 5/2 . dh/h (%) |
|-------------------------|--|-------------|----------------|
| 8,3 8,25 8,275 ° | I,578682 I,554949 I,566815 °° | I,514718 | I,510574 |
| 8,I 8,I5 8,I25 ° | I,4850426 I,50813016 I,4965863 °° | I,5426819 | I,538461 |
| 7 7,05 7,025 ° | I,02999257 I,04853544 I,0392640 °° | I,7842306 | I,779359 |
| 6,4 6,45 6,425 ° | 0,82275474 0,838963497 0,830859118 °° | I,9508429 | I,945525 |
| 6,05 6,I0 6,075 ° | 0,714562738 0,729459492 0,722011119 °° | 2,0632306 | 2,0576131 |
| 6,3 6,35 6,325 ° | 0,7909055811 0,8067356866 0,798820634 °° | I,9816846 | I,9762845 |

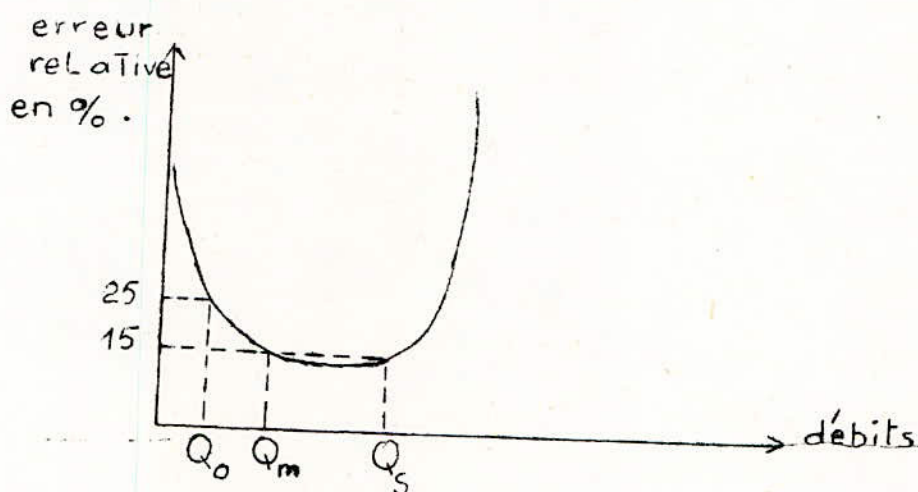
" ° " : h moyen en centimètres .

" °° " : Q moyen en litre par seconde .



Nous pouvons donc constater que l'erreur relative dQ/Q diminue avec le débit suivant une loi hyperbolique de degré supérieur. Les erreurs relatives dans la détermination des débits fractionnaires restent faibles ($dQ/Q = 4,5\%$ pour $Q = 0,1$ l/s).

Pour les autres dispositifs de mesure utilisés, l'erreur relative est également variable dans la gamme des débits mesurés, mais sa loi de variation se traduit par une courbe en " sac " représentée ci-dessous :



Pour chaque dispositif, les débits caractéristiques suivants sont déterminés :

- Q_0 : débit au-dessous duquel l'erreur relative est supérieure à 25 %.
- Q_m : débit au-dessous duquel l'erreur relative est supérieure à 15 %.
- Q_s : débit au-dessus duquel l'erreur relative est supérieure à 15 %.

Les valeurs extrêmes Q_0 et Q_s définissent les limites du champ de mesures au-delà desquelles l'erreur se dégrade très vite.

Autrement dit, une bonne précision n'est obtenue que pour une gamme limitée de débits.

Ces considérations permettent donc de conclure que c'est le débitmètre diédrique qui permet la meilleure précision dans la détermination du débit.

Conclusion :

Les essais effectués ont confirmé l'efficacité et la fiabilité du débitmètre diédrique à parois gauches, pour une très large gamme de débits. De plus, sa géométrie et l'uniformité de son fond lui confèrent l'avantage d'évacuer les dépôts solides qui s'accumuleraient par contre dans les appareils de mesure présentant une surélévation de leur fond, tel le Parshall.

Quant au débitmètre diédrique à parois planes, il doit être muni d'un dispositif de surélévation du seuil, conditionnant le bon fonctionnement de l'appareil pour les valeurs élevées du débit; ceci constitue un inconvénient d'ordre pratique qui est supprimé dans le cas du débitmètre diédrique à parois gauches.

Les essais nous ont montré que l'on pouvait récupérer une forte proportion de la charge initiale; celle-ci est évaluée à 94 % pour le débitmètre diédrique à parois planes dont l'angle d'ouverture est de 90 ° et à 93 % pour le débitmètre diédrique à parois gauches, dont l'angle d'ouverture de la section retrécie est de 68° .

Le tableau ci-après permet une rapide confrontation de la perte de charge, nécessitée par la mesure des débits de divers ordres de grandeur avec des appareils de mesure les plus courants :

| valeurs de la perte de charge minimum (H _{lim.}) exprimée en millimètres, pour divers appareils de mesure . | | | | | | | |
|--|--------------------------------|-----|-----|------|------|--------|------------------|
| appareil de mesure. | débits en litres par seconde . | | | | | | observation |
| | 0,1 | 1 | 10 | 100 | 1000 | 10.000 | |
| déversoir rectangulaire | 15 | 36 | 90 | 228 | 578 | 1465 | $h/L = 1/2$ ° |
| Parshall | 3 | 7,2 | 18 | 45 | 115 | 293 | |
| canal triangulaire | 1,6 | 3,6 | 8,2 | 18,2 | 41 | 92,4 | 90° °° |

" ° " : $h/L =$ hauteur / Largeur

" °° " : angle d'ouverture.

C'est donc le canal triangulaire qui nécessite le minimum de perte de charge pour la mesure d'un débit donné.

Il est à noter que l'étude de l'écoulement traversant l'appareil dans le sens croissant de l'angle d'ouverture, n'a pas été retenue; nous avons constaté que dans ce cas, les débits donnés par l'étalonnage du débitmètre à segment sont nettement supérieurs à ceux obtenus par le calcul. Ceci semble dû à l'existence d'une forte contraction occasionnée par la forme de la transition que nous avons délibérément choisie différente de celle du premier cas étudié.

Nous avons enfin constaté que la précision reste appréciable pour une très large gamme de débits : $dQ/Q = 4,5 \%$ pour $Q = 0,1$ l/s et l'erreur relative diminue au fur et à mesure que le débit s'accroît.

III. Considérations théoriques pour l'utilisation de l'appareil .

III. 1 Côte limite discriminatoire. Classement des perturbations.

L'appareil étudié placé dans un courant liquide provoque des perturbations à l'amont et à l'aval; la distance verticale H_k , représentant la charge minima nécessaire pour que le débit puisse franchir l'obstacle, définit la côte limite discriminatoire ayant une importance primordiale au point de vue classement de ces dites perturbations.

Si le plan de charge primitif (avant la mise en place de l'appareil) se trouve en-dessous de la côte limite discriminatoire la mise place de l'appareil aura pour effet un changement de régime soit à l'aval soit à l'amont. Le régime de l'écoulement sera critique au droit de la section retrécie qui possèdera dans tous les cas les caractéristiques d'une section de contrôle; l'appareil fonctionnera normalement .

Le cas défavorable que nous allons étudier est celui où le plan de charge primitif se trouve au-dessus de la côte limite discriminatoire.

Le régime de l'écoulement reste inchangé par rapport à son ~~état primitif, sur toute~~ la longueur de son parcours.

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 de l'ouvrage; elle n'aura pour effet aucun changement à l'amont de celui-ci. La section retrécie de l'appareil ne possède pas les caractéristiques bien déterminées d'une section de contrôle. Il faut par conséquent surélever la côte limite discriminatoire de telle sorte que le plan de charge primitif y soit en-dessous:

Dans de telles conditions, il y aura changement de régime en fluvial par un ressaut, se produisant à une certaine distance à l'amont de l'appareil; le plan de charge à l'amont subira un exhaussement jusqu'à atteindre la côte limite discriminatoire, provoquant

simultanément un exhaussement de la surface libre et un ralentissement du courant de la tranche fluviale artificiellement créée entre le ressaut et l'appareil; la section retrécie sera le lieu d'un écoulement critique qui se transformera aussitôt à l'aval en torrentiel; ce régime persistera jusqu'à l'extrémité avale de la tranche considérée.

Le ressaut transformant le régime de l'écoulement à l'amont de l'appareil, de torrentiel en fluvial, se situe là où la côte de la charge primitive est égale à la côte limite discriminatoire ajoutée à la perte de charge due au ressaut et aux frottements agissant sur le tronçon fluvial artificiellement créé.

La section retrécie de l'appareil, satisfaisant aux conditions d'une véritable section de contrôle, sera caractérisée par une charge $H_{am.} = 5/4 \cdot k_v$ où k_v est la profondeur critique dans la section retrécie, c'est à dire dans le canal triangulaire à angle d'ouverture constant. (figure n°11)

III.2 Condition de fonctionnement normal de l'appareil:

Afin de satisfaire la condition " plan de charge primitif en-dessous de la côte limite discriminatoire ", nous proposons de minorer le rapport $\frac{H_{am.}}{H_{av.}} = 0,93$ représentant la limite de la semi-modularité, à une valeur de 0,90; cette minoration constitue une marge de sécurité et prend en considération l'effet des frottements. Cela revient à écrire :

$$\frac{H_{am.}}{H_{av.}} = 0,90, \text{ c'est à dire } H_{am.} = 1,1 H_{av.}$$

$$\text{où } H_{av.} = H_{\text{primitive}} = h + \frac{Q^2}{2gA^2}$$

Ceci nous conduit à déterminer le talus maximal de la section retrécie de l'appareil, que l'on doit adopter :

$$H_{am.} = 1,1 H$$

$$k_v = 4/5 \cdot H_{am.} = 4/5 \cdot 1,1 H = 0,88 H = \sqrt[5]{2Q^2 / g \sum k_{max.}^2}$$

$$\text{d'où } \sum k_{max.} = 0,622 \frac{Q}{H^{5/2}}, \text{ dans laquelle } Q \text{ est exprimé}$$

en mètre-cube par seconde et H en mètres.

On peut donc déterminer la valeur du talus maximum de la section retrécie de l'appareil, suivant cette dernière relation, en tenant compte du débit maximum véhiculé par le canal et de la charge H y correspondante.

Nous proposons dans ce qui suit une méthode graphique permettant la détermination rapide de ce talus maximum. Pour cela, on trace dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques la loi Ham. = f (Q) pour différentes valeurs de $\tilde{\zeta}_{k_{max}}$; on obtient alors une série de droites représentées sur la figure n°12. Sur chacune de ces droites est indiqué non pas le talus maximum mais l'angle d'inclinaison α y correspondant.

Ces dites droites ont été tracées à partir de la relation :

$$k_v = 4/5 \cdot \text{Ham.} = \frac{5 \sqrt{2Q^2}}{g \tilde{\zeta}_{k_{max}}^2}$$

qui peut s'écrire également :

$$\text{Ham.} = \frac{0,90964}{\tilde{\zeta}_{k_{max}}^{0,4}} \cdot Q^{2/5}$$

Ainsi les différentes relations qui nous ont permis d'établir l'abaque de la figure n° sont :

- pour $\alpha = 26^\circ$, $\tilde{\zeta}_{k_{max}}^{0,4} = (\cotg 26^\circ)^{0,4} = 1,332$ d'où

$$\text{Ham.} = 0,682 Q^{2/5} \quad (Q \text{ en } m^3/s, \text{ Ham. en mètre })$$

- pour $\alpha = 30^\circ$, $\tilde{\zeta}_{k_{max}}^{0,4} = (\cotg 30^\circ)^{0,4} = 1,245$ d'où

$$\text{Ham.} = 0,730 Q^{2/5} \quad (Q \text{ en } m^3/s, \text{ Ham. en mètre })$$

- pour $\alpha = 45^\circ$, $\tilde{\zeta}_{k_{max}}^{0,4} = (\cotg 45^\circ)^{0,4} = 1$ d'où

$$\text{Ham.} = 0,90964 Q^{2/5} \quad (Q \text{ en } m^3/s, \text{ Ham. en mètre })$$

- pour $\alpha = 60^\circ$, $\zeta_{k_{\max}}^{0,4} = (\cotg 60^\circ)^{0,4} = 0,8027$ d'où :

$$\text{Ham.} = 1,133 Q^{2/5} \quad (Q \text{ en m}^3/\text{s}, \text{ Ham. en m})$$

- pour $\alpha = 65^\circ$, $\zeta_{k_{\max}}^{0,4} = (\cotg 65^\circ)^{0,4} = 0,737$ d'où :

$$\text{Ham.} = 1,234 Q^{2/5} \quad (Q \text{ en m}^3/\text{s}, \text{ Ham. en mètre})$$

D'autre part, si nous disposons de la loi de variation de la charge H en fonction du débit pour le canal trapézoïdal, avant la mise en place de l'appareil, c'est à dire la variation de la charge primitive, on pourrait la représenter sur la figure n°12.

Cette loi se traduira par une courbe dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques et présentera des points d'intersection avec les droites $\text{Ham.} = f(Q)$; l'angle d'inclinaison qu'il faut adopter pour la section retrécie de l'appareil afin que ce dernier fonctionne correctement, est celui pour lequel la droite y correspondante $\text{Ham.} = f(Q)$ se situe au-dessus de la courbe $H = f(Q)$. Les points d'intersection correspondants à $\text{Ham.} = H$ nous indiquent la valeur du débit Q au delà de laquelle l'angle d'inclinaison choisi ne peut plus être adopté.

Afin d'illustrer ce qui vient d'être exposé, nous avons tracer sur la figure n°12 la loi de variation $H = f(Q)$ dans un canal trapézoïdal de talus $\zeta = 1,25$, de base $b = 0,20$ m de rugosité absolue $\mathcal{E} = 0,005$ m et de pente $J = 0,007195$.

Les calculs ont été effectués suivant un programme que nous avons établi sur un calculateur de poche du type TI 59 ; pour différentes valeurs de la profondeur h nous calculons les valeurs des débits y correspondants ainsi que les valeurs de H suivant la relation $H = h + \frac{Q^2}{2gA^2}$ où $A = h(b + \zeta h)$. Les résultats du calcul sont consignés dans le tableau de la page suivante.

Tableau n°9 :

| h (m) | Q (m ³ /s) | H (m) |
|---------|-------------------------|---------|
| 0,1 | 0,002734 | 0,01361 |
| 0,2 | 0,1094 | 0,275 |
| 0,5 | 0,8307 | 0,7070 |
| 1,0 | 4,364 | 1,462 |
| 2,0 | 24,569 | 3,056 |
| 5,0 | 255 | 8,191 |
| 10 | 1255,1 | 17,356 |

On peut donc constater que la courbe $H = f (Q)$ présente des points d'intersection avec les droites $H_{am.} = f (Q)$; pour que la section rétrécie de l'appareil soit le lieu d'un écoulement critique, on peut choisir par exemple $\alpha = 45^\circ$, mais seulement pour des débits allant jusqu'à $400 \text{ m}^3/\text{s}$. Si l'on choisit $\alpha = 30^\circ$, l'appareil fonctionnera normalement que pour des débits allant jusqu'à $0,6 \text{ m}^3/\text{s}$ seulement.

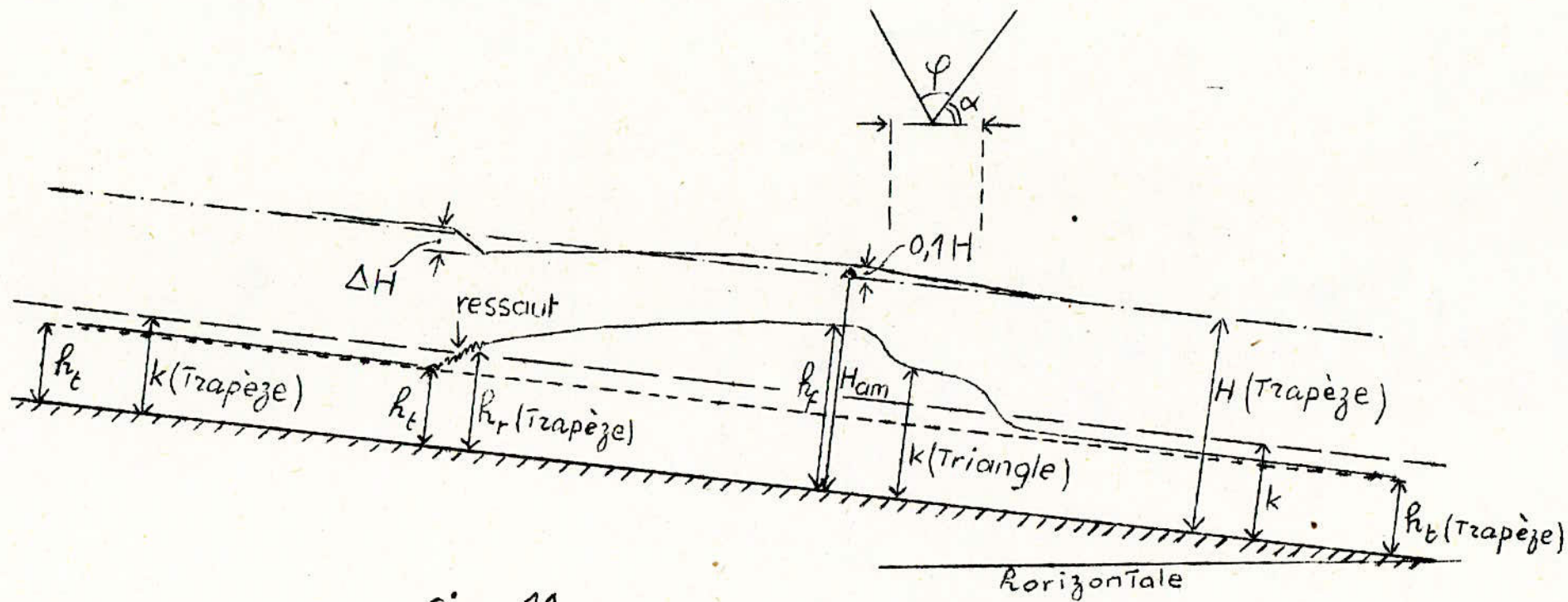
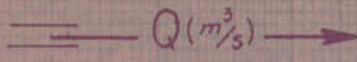
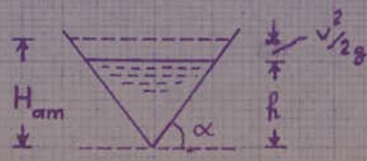
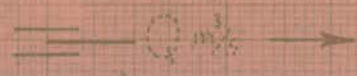
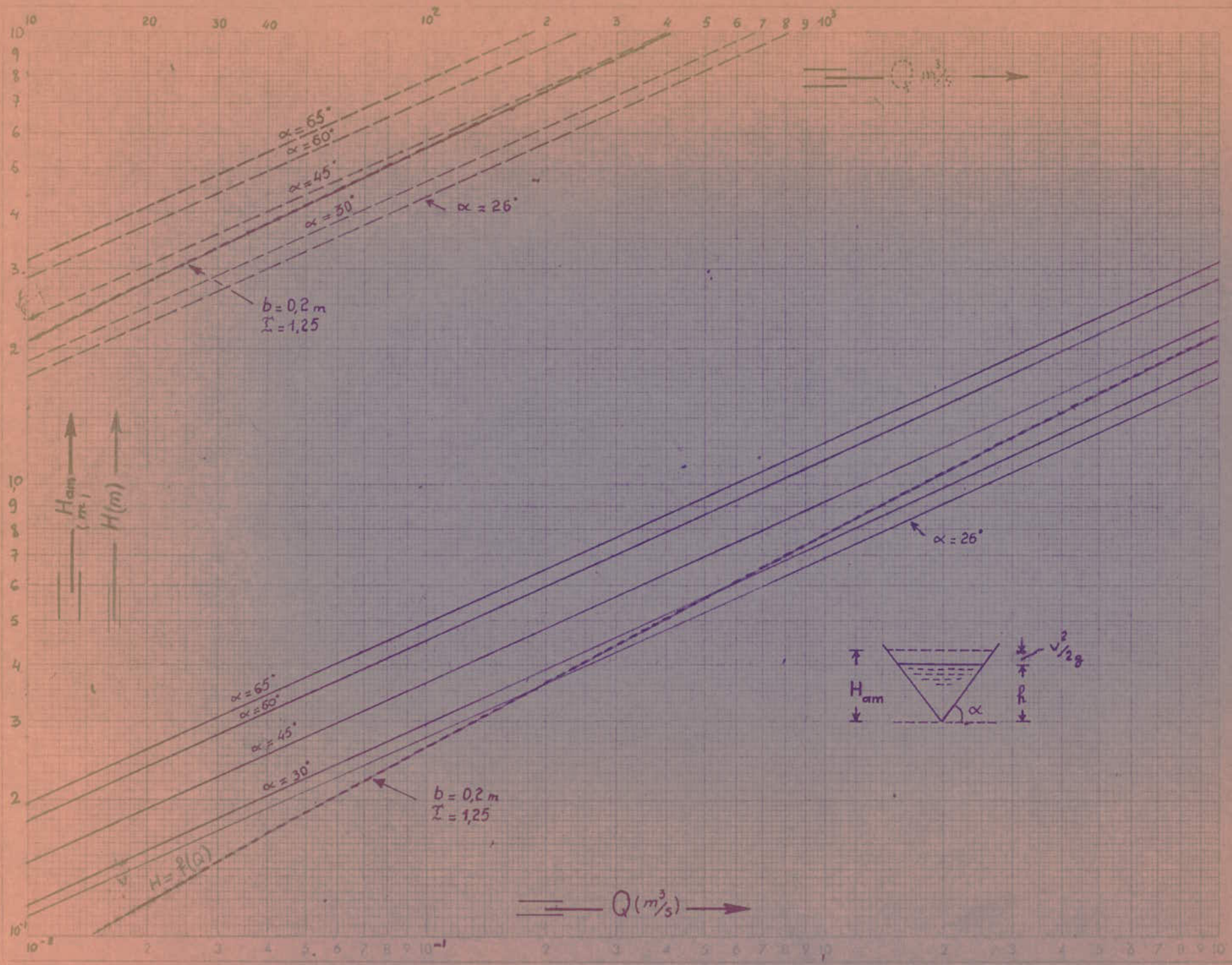


Fig: 11



$H = f(Q)$

$b = 0.2$ m
 $\zeta = 1.25$

$b = 0.2$ m
 $\zeta = 1.25$

$\alpha = 65^\circ$
 $\alpha = 60^\circ$

$\alpha = 45^\circ$

$\alpha = 30^\circ$

$\alpha = 26^\circ$

$\alpha = 26^\circ$

$\alpha = 65^\circ$
 $\alpha = 60^\circ$

$\alpha = 45^\circ$

$\alpha = 30^\circ$

$\sqrt{3}/28$

$Q (m^3/s)$

$b = 0.2$ m
 $\zeta = 1.25$

$b = 0.2$ m
 $\zeta = 1.25$

$\alpha = 65^\circ$
 $\alpha = 60^\circ$

$\alpha = 45^\circ$

$\alpha = 30^\circ$

$\alpha = 26^\circ$

$\alpha = 26^\circ$

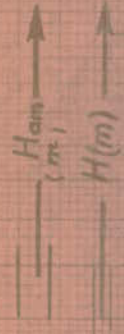
$\alpha = 65^\circ$
 $\alpha = 60^\circ$

$\alpha = 45^\circ$

$\alpha = 30^\circ$

$\sqrt{3}/28$

$Q (m^3/s)$



III.3 Etude du ressaut dans le canal trapézoïdal

Une publication du C.T.G.R.E.F (groupement d'ANTHONY-FRANCE 1976) fait état d'une étude sur le ressaut en canal trapézoïdal.

Cependant son utilisation nous parait peu pratique, du fait du grand nombre de paramètres introduits.

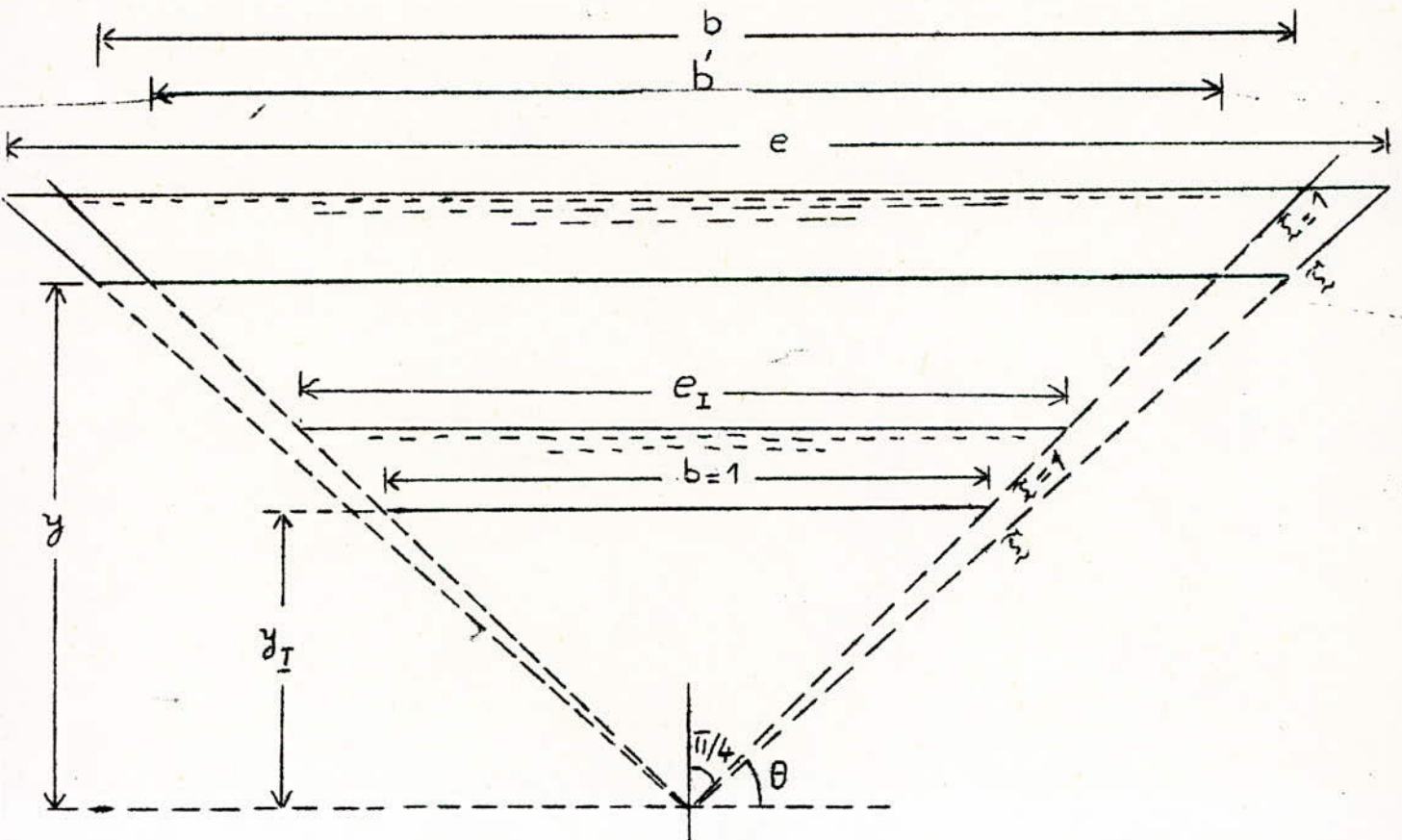
Nous présentons une théorie inédite qui apporte des simplifications considérables, pour l'étude du ressaut en canal trapézoïdal.

III.3.1 Réduction d'un canal trapézoïdal quelconque à un profil étalon :

Considérons un canal trapézoïdal quelconque, ayant un talus $\tilde{\lambda}$ et une base b . La réduction de ce profil nécessite deux étapes (figure ci-dessous) :

- passage du talus $\tilde{\lambda} = \cotg \theta$ au talus $\tilde{\lambda} = \cotg 45^\circ = 1$ (et de b à b').
- passage de la base b' à la base unité.

Le profil étalon est alors défini par $b = 1$ et $\tilde{\lambda} = 1$.



La figure précédente permet d'écrire les relations suivantes :

$$b = 2y\tilde{\Sigma} \text{ et } b' = 2y, \text{ d'où le rapport } b'/b = 1/\tilde{\Sigma} \quad (45)$$

On peut écrire d'autre part : $y_I / y = 1/b'$ (46)

En éliminant b' entre les relations (45) et (46), il vient :

$$y_I / y = \tilde{\Sigma}/b ; \text{ ce rapport représente l'échelle verticale } \lambda_h.$$

En désignant par h_I la profondeur du tirant d'eau dans le profil étalon ($\tilde{\Sigma} = 1, b = 1$) et par h la profondeur dans le profil quelconque défini par b et $\tilde{\Sigma}$, on peut écrire les relations suivantes :

$$h_I / h = y_I / y = \tilde{\Sigma}/b = \lambda_h$$

de même que l'on peut écrire :

$e_I / e = 1/b$; ce rapport représente l'échelle horizontale λ_l , e_I désigne la largeur du plan d'eau dans le profil étalon et e la largeur du plan d'eau dans le profil quelconque.

En vertu des lois de la similitude distordue, on peut déterminer les échelles suivantes :

$$\text{- échelle des vitesses : } V_I / V = \lambda_v = \sqrt{\lambda_h} = (\tilde{\Sigma}/b)^{1/2}$$

où V_I désigne la vitesse de l'écoulement dans le profil étalon et V la vitesse de l'écoulement dans le profil quelconque.

$$\text{- échelle des sections : } A_I / A = \lambda_A = \lambda_h \cdot \lambda_l = \frac{\tilde{\Sigma}}{b^2}$$

où A_I désigne la section mouillée dans le profil étalon et A la section mouillée dans le profil quelconque.

$$\text{- échelle des débits : } Q_I / Q = \lambda_Q = \lambda_A \cdot \lambda_v = \frac{\tilde{\Sigma}}{b^2} \cdot \left(\frac{\tilde{\Sigma}}{b}\right)^{1/2}$$

$$\text{ou bien : } Q_I / Q = \frac{\tilde{\Sigma}^{1,5}}{b^{2,5}}$$

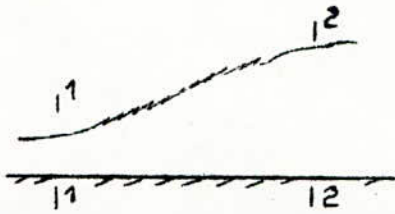
$$\text{d'où l'on peut déduire : } Q_I = \frac{\tilde{\Sigma}^{1,5}}{b^{2,5}} \cdot Q$$

Grâce à l'échelle verticale λ_h , on peut déterminer les charge et profondeur critiques :

$$H_{k_I} = \frac{\tilde{\Sigma}}{b} H_k$$

$$k_I = \frac{\tilde{\Sigma}}{b} k$$

III.3.2 Etude du ressaut :



Le changement de régime à l'aval de la section (1-1) de la figure ci-contre, se fait par un ressaut régi

par la loi d'équilibre hydrodynamique exprimée par le théorème des quantités de mouvement. Celle-ci traduit l'équilibre dynamique entre toutes les forces extérieures, appliquées à la masse liquide et la résultante des quantités de mouvement entrant et sortant par les sections initiale et finale du ressaut.

Par convention, les quantités de mouvement sortant sont positives et celles entrant sont négatives; l'équation des quantités de mouvement est donnée par la relation (15) :

$$\bar{P}_1 \cdot A_1 - \bar{P}_2 \cdot A_2 = \rho Q (V_2 - V_1) , \text{ en admettant que le}$$

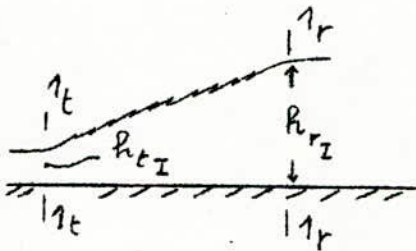
facteur de correction de la quantité de mouvement est égal à l'unité; dans cette dernière relation $\bar{P}_1 = \rho g \bar{h}_1$ est la pression agissant au centre de gravité de la section (1-1), \bar{h}_1 est la position du centre de gravité de la section (1-1) comptée à partir de la surface libre.

$\bar{P}_2 = \rho g \bar{h}_2$ est la pression agissant au centre de gravité de la section (2-2) , \bar{h}_2 est la position du centre de gravité de la section (2-2) comptée à partir de la surface libre.

ρ est la masse volumique du liquide en écoulement.

III.3.3 Application au profil trapézoïdal étalon

$$(\xi = I , b = I)$$



En désignant par A_{tI} l'aire de la section mouillée au début du ressaut et par A_{rI} l'aire de la section mouillée à l'aval

immédiat du ressaut (figure ci-dessus), les expressions respectives de ces dites sections sont :

$$A_{tI} = h_{tI} (I + h_{tI}) \text{ et } A_{rI} = h_{rI} (I + h_{rI})$$

La position du centre de gravité de ces sections, comptée à

partir de la surface libre est :

$$\bar{h}_{t_I} = \frac{h_{t_I} (e_I + 2)}{3 (e_I + 1)} \quad \text{où } e_I \text{ est la largeur du plan d'eau}$$

donnée par la relation : $e_I = 1 + 2h_{t_I}$; \bar{h}_{t_I} peut donc s'écrire :

$$\bar{h}_{t_I} = \frac{h_{t_I}}{6} \cdot \frac{2h_{t_I} + 3}{1 + h_{t_I}}$$

or $A_{t_I} = h_{t_I} (1 + h_{t_I})$, \bar{h}_{t_I} devient alors :

$$\bar{h}_{t_I} = \frac{h_{t_I}^2}{6} \cdot \frac{2h_{t_I} + 3}{A_{t_I}}$$

De la même manière, on peut établir la relation exprimant la position du centre de gravité de la section A_{r_I} :

$$\bar{h}_{r_I} = \frac{h_{r_I}^2}{6} \cdot \frac{2h_{r_I} + 3}{A_{r_I}}$$

En appliquant le théorème des quantités de mouvement au liquide en écoulement, occupant le domaine situé entre les sections 1_t et 1_r , on écrit :

$$\rho g (\bar{h}_{t_I} \cdot A_{t_I} - \bar{h}_{r_I} \cdot A_{r_I}) = Q_I^2 (1/A_{r_I} - 1/A_{t_I}) \text{ soit :}$$

$$\bar{h}_{t_I} \cdot A_{t_I} - \bar{h}_{r_I} \cdot A_{r_I} = \frac{Q_I^2}{g} (1/A_{r_I} - 1/A_{t_I}), \text{ ou bien :}$$

$$\bar{h}_{t_I} \cdot A_{t_I} + \frac{Q_I^2}{g A_{t_I}} = Z = \bar{h}_{r_I} \cdot A_{r_I} + \frac{Q_I^2}{g A_{r_I}}$$

La fonction Z peut s'écrire d'une manière générale, sous la forme :

$$Z = \bar{h}_I \cdot A_I + \frac{Q_I^2}{g A_I}, \text{ valable pour les sections } 1_t \text{ et } 1_r.$$

En substituant \bar{h}_I et A_I par leur expression générale, cette dernière relation devient :

$$Z = \frac{h_I^2}{6} (2h_I + 3) + \frac{Q_I^2}{g(h_I^2 + h_I)} \quad (47)$$

Z est donc une fonction de la profondeur h_I et du débit Q_I .

En représentant Z dans un système de coordonnées à divisions logarithmiques (pour un débit Q_I donné), en fonction de h_I on constate que la pente de la courbe représentative de Z est variable (figure n° 13).

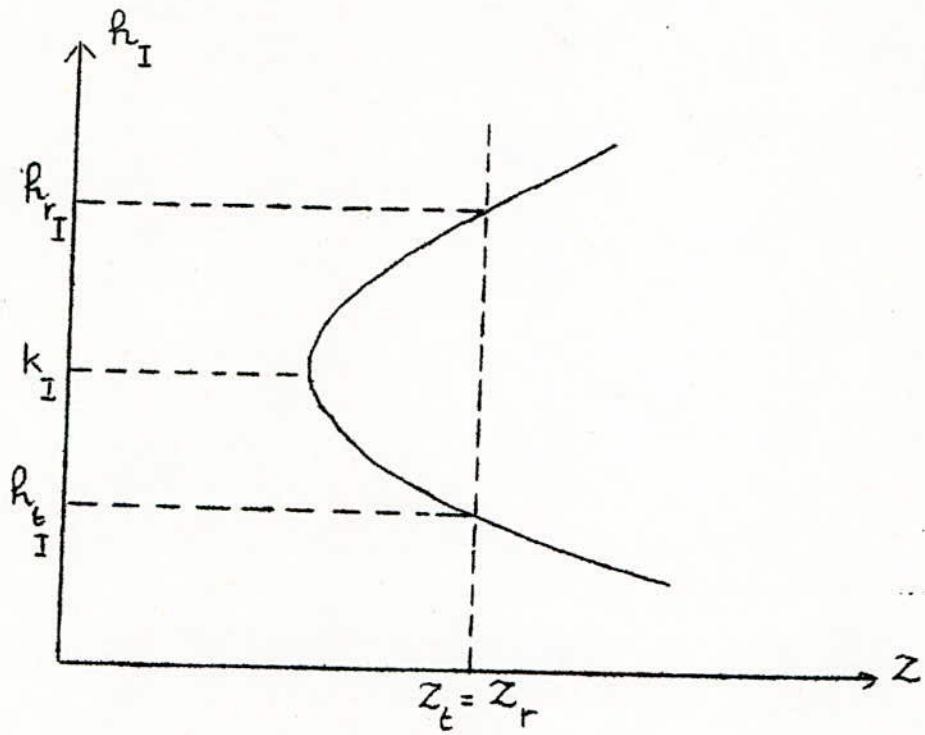


figure n° I3

La valeur de h_I correspondant au minimum de Z , représente la profondeur critique k_I ; celle-ci est déterminée en égalant à zéro la dérivée de Z suivant h_I . La branche supérieure de la courbe correspond alors au régime fluvial et la branche inférieure au régime torrentiel.

On constate que pour une même valeur de Z ($Z_t = Z_r$), correspondent deux profondeurs conjuguées; l'une de ces profondeurs est désignée par h_{rI} , l'autre est désignée par h_{tI} . h_{tI} et h_{rI} représentent respectivement les profondeurs à l'amont et à l'aval immédiat du ressaut.

L'un des problèmes qui se posent est la détermination de la profondeur h_{rI} , connaissant la profondeur h_{tI} . En posant $x = \log Z$ et $y = \log h_I$, on peut calculer la valeur de la tangente ϑ en un point quelconque de la courbe, ayant pour ordonnée une valeur $\log h_I$ arbitrairement choisie :

$$y = \log \left[\frac{h_I^2}{6} (2h_I + 3) + \frac{Q_I^2 / g}{h_I^2 + h_I} \right]$$

$$x = \log h_I$$

$$y' = \frac{\partial y}{\partial h} = \frac{h_I^2 + h_I - Q_I^2(2h_I + 1)/g(h_I^2 + h_I)^2}{\left[\frac{h_I^2}{6} (2h_I + 3) + \frac{Q_I^2}{g(h_I^2 + h_I)} \right] \ln 10}$$

$$x' = \frac{I}{h_I \cdot \ln 10}$$

ainsi :

$$\vartheta = \frac{dy}{dx} = \frac{y'}{x'} \quad \text{est donnée par l'expression :}$$

$$\vartheta = \frac{h_I \left[h_I^2 + h_I - \frac{Q_I^2(2h_I + 1)}{g(h_I^2 + h_I)^2} \right]}{\frac{h_I^3}{3} + \frac{h_I^2}{2} + \frac{Q_I^2}{g(h_I^2 + h_I)}}$$

La valeur de la tangente ϑ ainsi déterminée, en fonction de h_I sera introduite dans un programme destiné à la solution de l'équation (47), par conséquent à la solution du problème du ressaut en canal trapézoïdal.

A partir des caractéristiques de l'écoulement calculées dans le profil étalon, nous pouvons, à l'aide des relations de la similitude distordue que nous avons déjà exposées, calculer celles de l'écoulement dans un profil trapézoïdal quelconque de base b et de talus $\tilde{\Sigma}$.

Conclusion générale :

La mesure d'un débit volume est un problème général de la Mécanique des fluides, la mesure d'un débit véhiculé par un cours d'eau naturel, par un canal à ciel ouvert collecteur ou d'irrigation, une raie d'irrigation etc... est un problème qui peut se présenter à chaque moment, dans le travail de l'ingénieur hydraulicien.

Nous avons passé en revue les divers moyens utilisés fréquemment pour la mesure des débits tels, les déversoirs en mince paroi, le déversoir de Bazin, de Rehbock etc... et le déversoir à échancrure triangulaire. C'est ce dernier qui permet la meilleure précision dans la détermination du débit, par une simple mesure limnimétrique. Le phénomène de déversement reste géométriquement et dynamiquement semblable à lui-même quelque soit le débit à mesurer. La précision ne dépend que de l'exactitude de la mesure limnimétrique.

L'emploi des déversoirs en mince paroi, nécessite une perte de charge supérieure ou égale à la charge au-dessus du point le plus bas de l'échancrure constituant le déversoir.

Le débitmètre à ressaut, connu sous le nom de Farshall, provoque dans la section de contrôle, située dans la partie retrécie du dispositif, un écoulement critique suivi par une tranche où le régime de l'écoulement devient torrentiel; cette tranche constitue une espèce de cordon sanitaire entre les tranches du cours d'eau situées respectivement à l'amont et à l'aval du dispositif et assurent un fonctionnement semi-modulaire de l'appareil. La tranche torrentielle peut être suivie d'un ressaut permettant de récupérer une forte proportion de la charge initiale, à l'aval de l'écoulement.

Il est nécessaire, pour le fonctionnement semi-modulaire de l'appareil, que l'ensemble des filets de courant (sauf évidemment la couche limite) devienne franchement torrentiel.

On peut avoir en effet, dans une même section, des particules proches de la paroi solide dont la vitesse est inférieure à la vitesse critique V_k , alors que dans l'axe les particules sont animées d'une vitesse supérieure à V_k . Pour cette raison, il est nécessaire que la tranche torrentielle possède un certain minimum de longueur, pour que le ressaut puisse permettre de récupérer la totalité de la charge.

Le Parshall, tel qu'il a été conçu par son inventeur, est caractérisé par une section rétrécie rectangulaire, par conséquent les faibles débits le franchissent avec une faible charge par rapport à laquelle l'imprécision de la lecture limnimétrique devient trop importante.

Il a été donc logique de vouloir réunir les avantages du déversoir triangulaire et ceux du Parshall; ce qui a mené à la conception du débitmètre diédrique à parois planes, muni d'un seuil.

Cependant, ce dernier présente l'inconvénient de nécessiter un dispositif de réglage vertical. Pour palier à cela, nous avons conçu et testé un débitmètre diédrique à parois gauches, sans seuil ayant son talweg au même niveau que celui du cours d'eau.

La charge totale nécessaire au franchissement du dispositif doit être telle que le niveau maximum de l'eau à l'aval de l'appareil (correspondant à la limite de la semi-modularité: $0,93H$) reste pour toute la gamme des débits, au-dessus du plan de charge primitif, c'est à dire avant la mise en place du débitmètre.

L'angle d'ouverture du dièdre doit être tel que l'écoulement garde son caractère semi-modulaire quelque soit le régime primitif de l'écoulement dans le cours d'eau; si le régime primitif est torrentiel, il se transformera à l'amont de l'appareil, en fluvial moyennant un ressaut.

Si le régime primitif est fluvial, il se produira un exhaussement de la charge, à l'amont de l'appareil; la tranche torrentielle à l'aval, sera suivie d'un ressaut dont la position dépendra du débit passant.

Une étude particulière des susdites variations du régime de l'écoulement a été faite et nous a mené à une solution graphique permettant de déterminer le talus maximum à adopter pour la section retrécie de l'appareil.

Il est à noter que ce sont les gros débits, correspondant aux plus fortes crues qui déterminent l'angle d'ouverture maximum du dièdre. Le passage des gros débits se produira sans ralentissement considérable de la vitesse, en évitant ainsi la formation de dépôts d'alluvions à proximité du débitmètre. Ce ralentissement sera beaucoup plus prononcé lors du passage, à l'étiage des plus faibles débits et il pourra occasionner la formation de dépôt des éléments fins véhiculés par le courant.

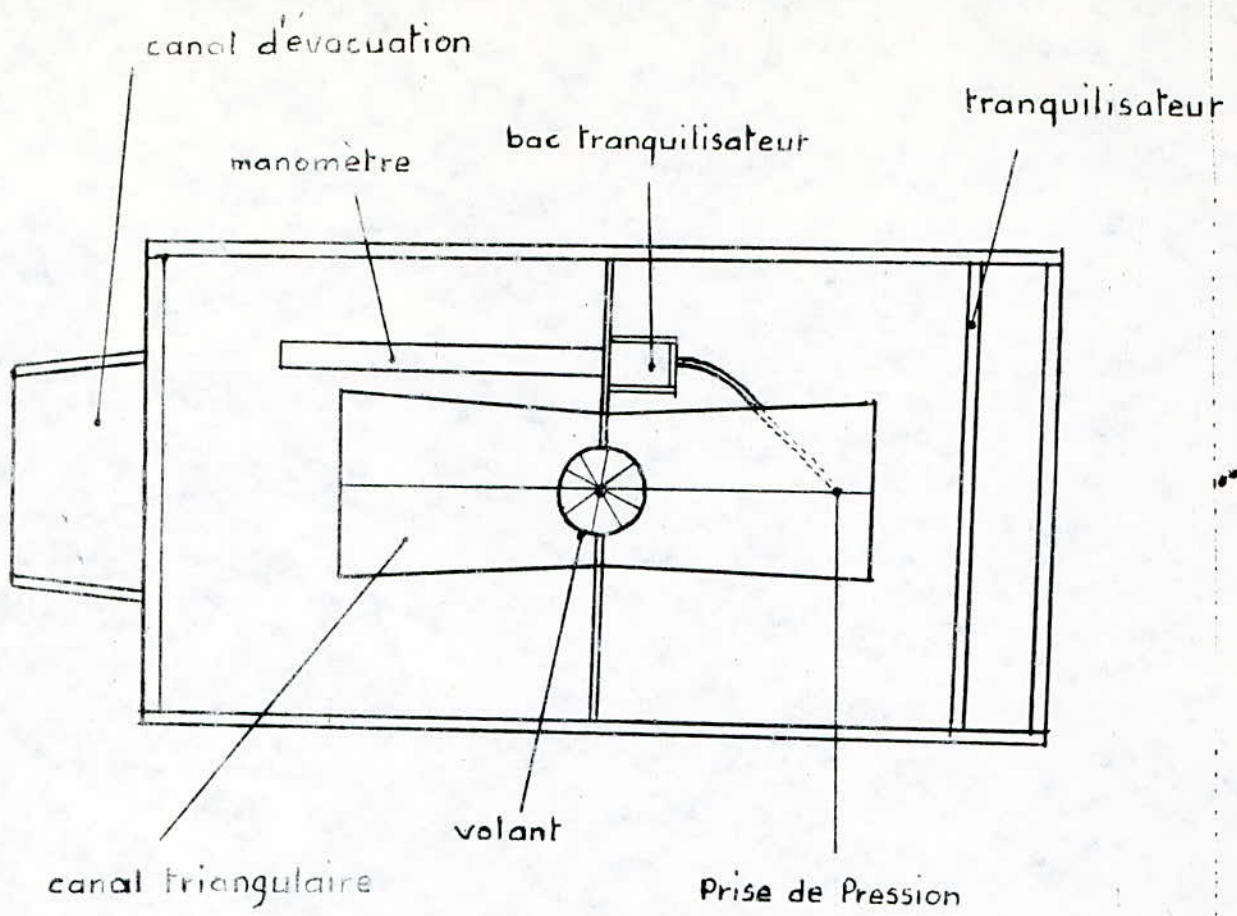
Mais ceux-ci seront balayés par le courant au fur et à mesure que le débit et la vitesse continuent à s'accroître lors du passage des crues, en assurant ainsi le dégrevement automatique du dispositif.

Des essais de mesure de débits nous ont permis de conclure que les résultats expérimentaux confirment la théorie et ne nécessitent que l'introduction de coefficients très proches de l'unité, pour obtenir les valeurs exactes du débit .

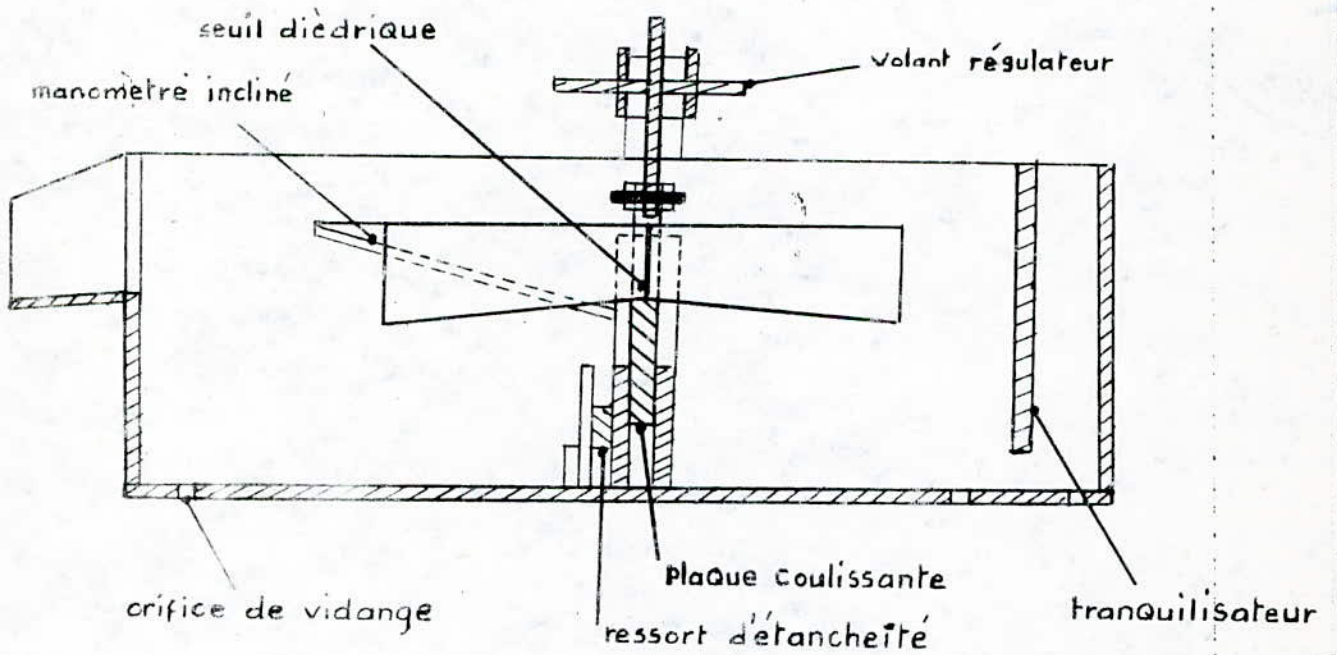
BIBLIOGRAPHIE

- (1) Pr. G. LAPRAY : " Application de la théorie de la longueur fluidodynamique " budapest-1944-
- (2) Pr. G. LAPRAY : " Le seuil et ressaut en canal diédrique " cahier du Génie-Rural-Rabat-1957.
- (3) AGENCE FINANCIERE DE BASSIN " LOIRE-BRETAGNE " : " cahier de prescriptions spéciales pour la réalisation et l'agrément des dispositifs de mesure du débit des effluents " Octobre 1970.
- (4) M. CARLIER : " Hydraulique générale et appliquée " Edition Eyrolles - 1972 -
- (5) S. H:son TIDESTROM : " Manuel de base de l'ingénieur " Tome I - Edition Dunod-1959-
- (6) A. LENCASTRE : " Manuel d'hydraulique générale " Edition Eyrolles-1979-
- (7) CH. OLLIER et M. POIREE : " Irrigation " Edition Eyrolles, 113-140 -1981-
- (8) M. OREGGIA : " Le canal Venturi de la Gavotte " T.S.M, 204-206 - 1962 -
- (9) C.T.G.R.E.F (groupement d'Anthony) : " Hydraulique à surface libre " - 1979 -

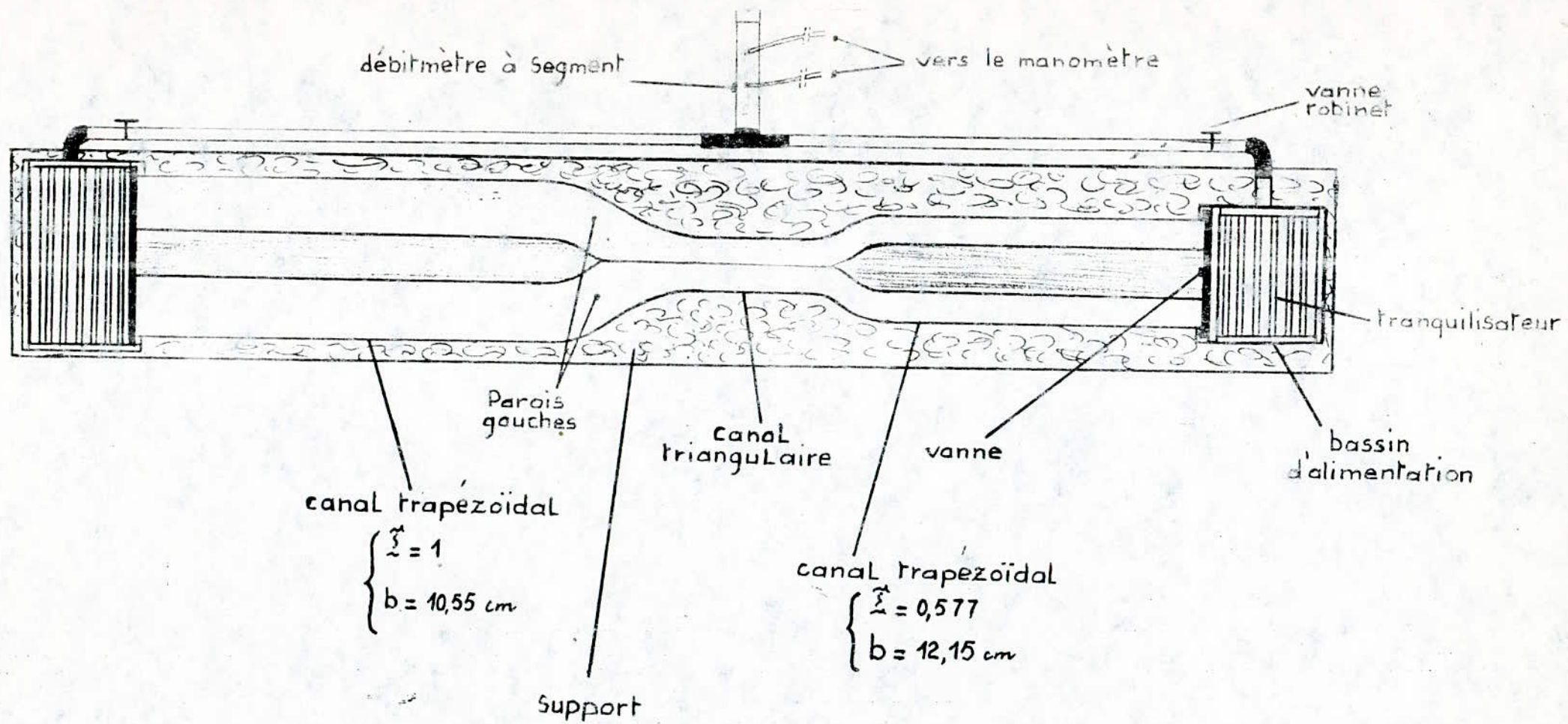




débitmètre à seuil : vue en plan

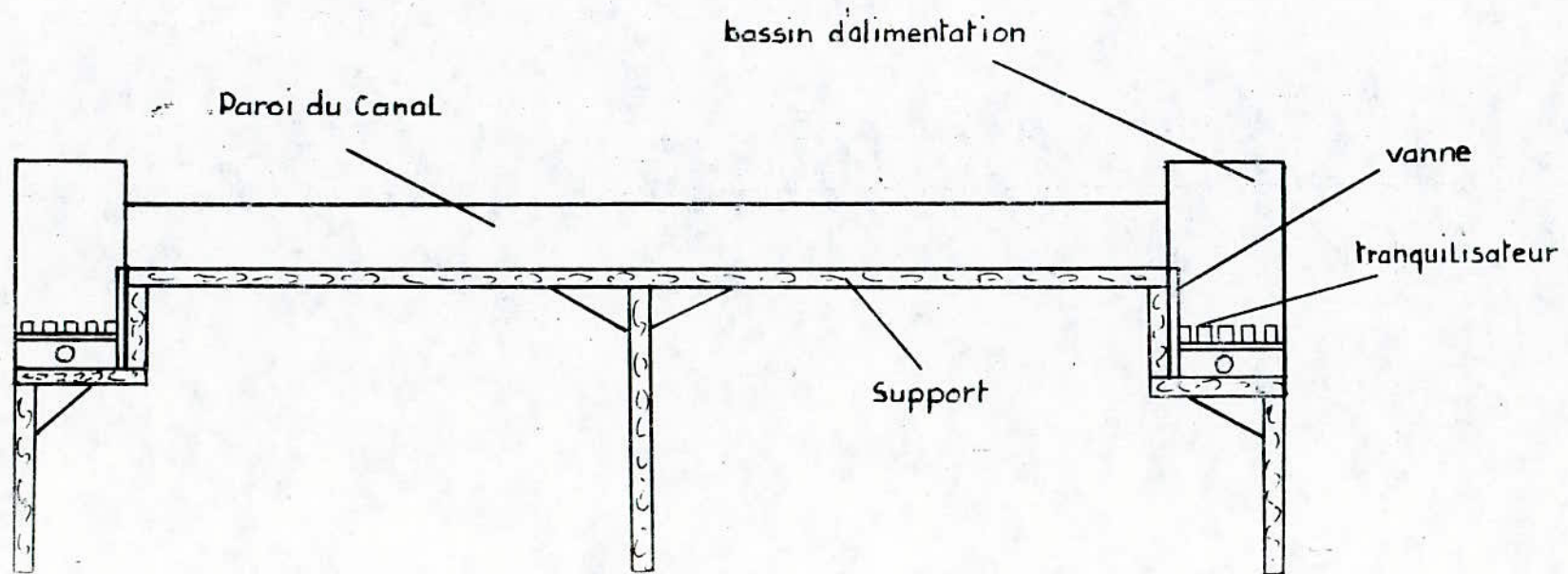


débitmètre à seuil : coupe longitudinale



DEBITMETRE SANS SEUIL : VUE EN PLAN

DEBITMETRE SANS SEUIL : PROFIL



Programme: Etabli sur TI 59, permettant de déterminer la profondeur du tirant d'eau h dans un canal trapézoidal. (partition 5 2nd OP 17)

Symboles utilisés

J : gradient de perte de charge.
 Q : débit volume. (mètre-cube par seconde)
 E : rugosité absolue (mètre)
 ν : viscosité cinématique (mètre-carré par seconde)

2nd LBL A (RCL 03 x (RCL 04 + RCL 05 x RCL 03)) STO 07 (2 x (RCL 05 x² + 1) √ X) STO 06 (RCL 06 x RCL 03 + RCL 04) STO 08 (4 x RCL 07 + RCL 08) STO 09 (RCL 10 + RCL 09) STO 11 (4 x RCL 01 + RCL 08 + RCL 00) STO 15 (RCL 11 ln X x .86 - I,14) X² 1/X STO 13 STO 14 INV SBR

2nd LBL BA (RCL 13 + RCL 09 x RCL 01 X² + RCL 07 X² + 19,6) STO 12 INV SBR

2nd LBL CA RCL 02 x RCL 09 x 19,6 + RCL 13 = √ X x RCL 07 = STO 21 R/S

2nd LBL DB RCL 12 + RCL 02 = y^x .25 x RCL 03 = STO 03 RCL 02 - RCL 12 = 2nd | X | 2nd X > t D RCL 03 STO 23 R/S

2nd LBL √ X A (19,6 x RCL 42 x RCL 09 x RCL 07 X² + RCL 41 X²) STO 13 INV SBR

2nd LBL E I,14 - RCL 13 √ X 1/X = + .86 = INV lnX x RCL 09 = STO 20 R/S

2nd LBL 2nd A' B ((2,51 + RCL 15 + RCL 13 √ X + RCL 11 + 3,7) lnX x .86) X² 1/X STO 17 ((RCL 17 + RCL 13) y^x .86 x RCL 13) STO 13 (RCL 17 - RCL 13) 2nd | X | 2nd X > t 239 RCL 13 INV SBR

2nd LBL 2nd B' 2nd A' (RCL 13 + RCL 14 x RCL 12) STO 22 INV SBR

2nd LBL 2nd C' 2nd B' RCL 02 + RCL 22 = √ X x RCL 01 = STO 01 RCL 02 - RCL 22 = 2nd | X | 2nd X > t 2nd C' R/S

2nd LBL 2nd D' 2nd B' RCL 22 + RCL 02 = y^x .3 x RCL 03 = STO 03 RCL 02 - RCL 22 = 2nd | X | 2nd X > t D RCL 03 STO 33 R/S

2nd LBL 2nd E' SBR √ X .86 1/X + RCL 13 √ X = INV lnX - 2,51 + RCL 15 + RCL 13 √ X = x 3,7 x RCL 09 = STO 30 R/S

2nd LBL I/X SBR \sqrt{X} I/X \sqrt{X} + .86 = INV lnX I/X - RCL II
 + 3,7 = I/X x 2,5I + RCL I3 \sqrt{X} = STO 33 I/X x 4 x RCL 4I +
 RCL 08 = STO 47 R/S

2nd LBL X \leftarrow t RCL 40 STO 00 RCL 4I STO 0I RCL 42 STO 02 RCL
 43 STO 03 RCL 44 STO 04 RCL 45 STO 05 RCL 46 STO IO .00000I
 X \leftarrow t R/S

Utilisation du programme :

Stocker :

V en mémoire 40
 Q en mémoire 4I
 J en mémoire 42
 b (largeur du trapèze) en mémoire 44
 L (inclinaison du talus) en mémoire 45
 E en mémoire 46

Appuyer sur : SBR X \leftarrow t 2nd D'

Affiche : h

Programme : établi sur TI 59, permettant de déterminer le talus maximum de la section retrécie de l'appareil.

2nd LBL A RCL 01 x (RCL 02 + RCL 03 x RCL 01) = I/X x

RCL 04 = $X^2 \div 19,6 + RCL 01 = STO 05$ R/S

2nd LBL B RCL 05 x I,I = STO 06 x 0,8 = STO 07 R/S

2nd LBL C RCL 04 $X^2 \div 4,9 \div RCL 07 y^x 5 = \sqrt{X}$ STO 08 R/S

2nd LBLD (RCL I9 E $\div ((RCL I9 x .999999) E - (RCL I9 x I,000001) E) x RCL I9 x .000002) SUM I9 2nd |X| -$

.000001 = 2nd X \gg t D RCL I9 R/S

Utilisation du programme:

Stocker :

h en mémoire 01
b en mémoire 02
 \bar{h} du trapèze , en mémoire 03
Q en mémoire 04

Appuyer sur :

A : affiche \bar{h}_{max} .

RCL 05 : affiche H (charge primitive)

RCL 06 : affiche H_{am} .

B : affiche k_v

D : affiche h_f

Programme : établi sur TI 59, permettant de déterminer la profondeur du tirant d'eau critique k dans un canal trapézoïdal .

2nd LBL 1nX ((RCL 44 + 2 x RCL 45 x RCL 43) \div ((RCL 44 + RCL 45 x RCL 43) x RCL 43) y^x 3) STO 25 (RCL 25 x RCL 41 x^2 \div 9,8) STO 27 INV SBR

2nd LBL A SBR 1nX .000001 X \leftarrow t RCL 27 y^x .298 x RCL 43 = STO 43 RCL 27 - 1 = 2nd |X| 2nd X \geq t A RCL 43 R/S

2nd LBL B SBR 1nX 9,8 \div RCL 25 = \sqrt{X} STO 34 R/S

2nd LBL C SBR 1nX .000001 X \leftarrow t RCL 27 x RCL 44 = STO 44 RCL 27 - 1 = 2nd |X| 2nd X \geq t C RCL 44 R/S

Utilisation du programme:

Stocker :

b en mémoire 44

Σ en mémoire 45

Q en mémoire 41

une valeur approximative de k en mémoire 43

Appuyer sur : A

Affiche : la valeur exacte de k .

Programme : établi sur TI 59, permettant la détermination des caractéristiques du ressaut dans un canal trapézoïdal. (partition 5 2nd OP I7)

2nd LBL 2nd A' RCL 29 \div RCL 28 = STO 22 \sqrt{X} x RCL 22 \div RCL 28 =
STO 25 x RCL 31 = STO 21 RCL 30 x RCL 22 = STO 00 R/S

2nd LBL A (1 + 2 x RCL 00) STO 05 (RCL 00 + RCL 00 X^2) STO 10
(RCL 10 y^x 3 \div RCL 05 x 9,8) \sqrt{X} STO 01 INV SBR

2nd LBL B A RCL 21 \div RCL 01 = \sqrt{X} x RCL 00 = STO 00 RCL 21 -
RCL 01 = 2nd |X| 2nd X \gg t B RCL 00 R/S

2nd LBL C RCL 37 x RCL 22 = STO 07 + RCL 07 X^2 = STO 09 X^2 1/X x
RCL 01 X^2 \div 19,6 + RCL 07 = STO 06 x RCL 00 = \sqrt{X} STO 08 .99 x
RCL 06 = STO 15 RCL 06 R/S

2nd LBL D RCL 07 X^2 \div 6 x (2 x RCL 07 + 3) + RCL 01 X^2 \div 9,8
 \div RCL 09 = STO 12 R/S

2nd LBL E (RCL 08 X^2 + RCL 08 - RCL 01 X^2 \div 9,8 x (2 x RCL 08
+ 1)) \div (RCL 08 X^2 + RCL 08) y^2) : (RCL 08 X^2 \div 3 + RCL 08
 \div 2 + RCL 01 X^2 \div 9,8 \div (RCL 08 y^x 3 + RCL 08 X^2)) = 1/X
STO 14 (RCL 08 + RCL 08 X^2) STO 11 (RCL 08 X^2 \div 6 x (2 x
RCL 08 + 3) + RCL 01 X^2 \div 9,8 \div RCL 11) STO 17 (RCL 12 \div RCL
17) y^x RCL 14 x RCL 08 = STO 08 (RCL 12 - RCL 17) 2nd |X| 2nd
X \gg t E RCL 08 R/S

2nd LBL 2nd B' RCL 08 + (RCL 01 \div RCL 11) X^2 \div 19,6 = STO 18
RCL 06 - RCL 18 = STO 19 R/S

2nd LBL 2nd C' RCL 01 X^2 \div 19,6 \div (RCL 15 + RCL 15 X^2) X^2 =
STO 16 RCL 06 \div (RCL 15 + RCL 16) = x RCL 15 = STO 15 RCL 06 -
RCL 15 - RCL 16 = 2nd |X| 2nd X \gg t 2nd C' RCL 15 R/S

2nd LBL 2nd D' RCL 00 \div RCL 22 = STO 30 RCL 01 \div RCL 25 = STO 31
RCL 06 \div RCL 22 = STO 36 RCL 08 \div RCL 22 = STO 38 RCL 19 \div
RCL 22 = STO 39 RCL 15 \div RCL 22 = STO 35 R/S

Utilisation du programme:

Stocker : la précision voulue en X \leftarrow t

b en mémoire 28

I en mémoire 29

une valeur approximative de k, en mémoire 30

Q en mémoire 31

h_t en mémoire 37

Appuyer sur :

2nd A' : affiche la valeur exacte de k_I

A : affiche Q_I

B : affiche k_I

C : affiche H_{tI}

RCL 07: affiche h_{tI}

RCL 09: affiche A_{tI}

RCL 08: affiche une valeur approximative de h_{rI}

RCL 15: affiche une valeur approximative de h_{fI}

D : affiche Z

E : affiche la valeur exacte de h_{rI}

RCL 14: affiche ϑ

2nd B': affiche ΔH_I

RCL 18: affiche H_{rI}

2nd C': affiche la valeur exacte de h_{fI}

RCL 16: affiche H_{fI}

2nd D': affiche h_f

RCL 30: affiche k

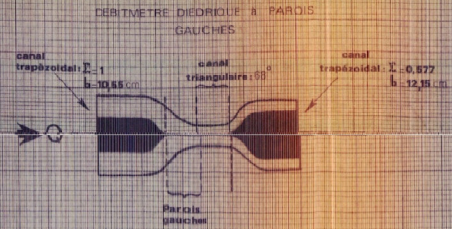
RCL 31: affiche Q

RCL 36: affiche H_t

RCL 38: affiche h_r

RCL 39: affiche ΔH

CARACTERISTIQUES REELLES DU MODELE REDUIT



$h, H_{\text{av}}, \text{cm}$

$Q \text{ l/s}$

$H_{\text{av}} = f(Q)$
 $h = f(Q)$
 $H_{\text{av}} = f(H)$

$\Delta H_{\text{lim}} = f(Q)$

$H_{\text{av}} = 6,666 \cdot Q^{0,388}$
(cm) (l/s)

$H_{\text{lim}} = 7,196 \cdot Q^{0,4}$
(cm) (l/s)

$h_{\text{lim}} = 6,918 \cdot Q^{0,398}$
(cm) (l/s)

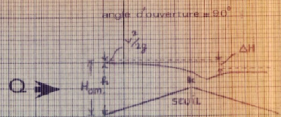
$\Delta H_{\text{lim}} = 4,522 \cdot Q^{0,559}$
(mm) (l/s)

fig. 9

$\Delta H_{\text{lim}}, \text{cm}$

DEBITMETRE DIEDRIQUE à RESSAUT à PAROIS PLANES
AVEC SEUIL

CARACTERISTIQUES REELLES DU
MODELE REDUIT



$$R_{exp} = 5,9 Q^{0,381} \quad R_{th} = 5,368 Q^{0,384}$$

$$H_{am} = 5,577 Q^{0,393}$$

$$\Delta H_{Rm} = 3,577 Q^{0,353}$$

R, H en cm

ΔH en mm

Q en l/s

