

DEBITMETRE TRIANGULAIRE A PAROI EPAISSE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE (Première partie)

B. ACHOUR, T. BOUZIANE, K. NEBBAR
Université de Biskra, B.P. 145, R.P, 07000 – Algérie
Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface
(LARHYSS)
www.larhyss.org, info@larhyss.net

PREMIERE PARTIE

Recherche Bibliographique

I.1. Introduction

I.2. Déversoirs

I.2.1. Définition

I.2.2. Déversoir rectangulaire en mince paroi sans contraction latérale - Coefficient de débit

I.2.3. Déversoir rectangulaire en mince paroi à contraction latérale.

I.2.4. Déversoir triangulaire en mince paroi à contraction latérale.

I.2.5. Déversoir à seuil épais à profil en long triangulaire

I.3. Jaugeurs à ressaut.

I.3.1. Canal jaugeur type "*Parshall* "

I.3.2. Canal jaugeur type "*Venturi* "

I.3.3. Jaugeur "*Achour*"

I.4. Conclusion

I.1. INTRODUCTION

La mesure du débit véhiculé par un canal de forme donnée se rencontre souvent dans la pratique de l'Ingénieur hydraulicien. Les moyens de mesure du débit sont actuellement nombreux et chacun d'entre eux présente ses propres particularités, ses inconvénients et ses avantages. Que l'écoulement ait lieu dans une conduite ou dans un canal à surface libre, les moyens de mesure du débit diffèrent.

La première partie de cette recherche se propose de passer en revue les plus importants appareils de mesure des débits dans les canaux ouverts, habituellement utilisés dans la pratique. Les appareils seront schématiquement décrits en mettant l'accent sur les limites de leur utilisation. Notre attention portera également sur le coefficient de débit, dont les principales relations seront exposées et discutées. Notre recherche bibliographique englobe aussi bien les appareils de mesure de débit classiques utilisant le libre déversement et pour lesquels la charge aval est faible, que ceux s'appuyant sur la capacité du ressaut hydraulique à surélever le plan de charge aval. Les premiers sont désignés par *déversoirs*, tandis que les seconds sont dits *jaugeurs à ressaut*.

I.2. DEVERSOIRS

I.2.1. Définition

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 se basent sur une contraction verticale de l'écoulement. Cette paroi peut présenter une échancrure rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale ou circulaire. Le débit véhiculé par le canal et alors déterminer par une simple lecture limnimétrique du plan d'eau amont au-dessus de l'arête du déversoir ainsi que par les caractéristiques du canal et du dispositif de mesure.

I.2.2. Déversoir rectangulaire en mince paroi sans contraction latérale - Coefficient de débit

Le déversoir est défini par sa géométrie simple représentée par une paroi verticale en mince paroi dont les caractéristiques géométriques sont indiquées sur la figure 1. Ce type de déversoir est l'un des plus anciens, puisque les premières recherches sur ce dispositif sont dues à *Poleny* au 18^{ème} siècle.

Les résultats ont pu conduire à l'établissement de la relation liant la hauteur h de déversement au-dessus de l'arête et le débit unitaire $q = Q/B$, où Q et B représentent respectivement le débit volume et la largeur du canal rectangulaire dans lequel est inséré le dispositif.

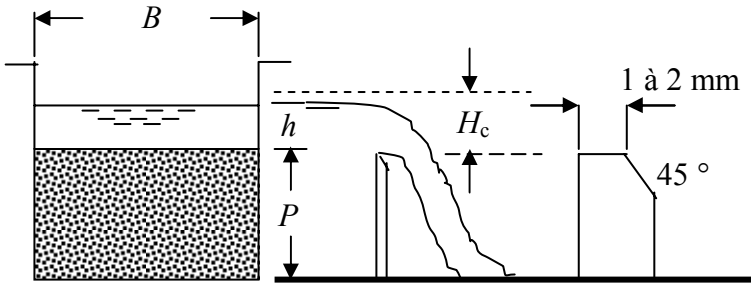


Figure1: Schéma de définition et détails du déversoir rectangulaire en mince paroi sans contraction latérale

Le débit unitaire est donné par la relation :

$$q = \frac{2}{3} \mu \sqrt{2g} h^{3/2} \quad (1)$$

μ désigne le coefficient de débit et g est l'accélération de la pesanteur.

En admettant que le déversoir est franchi par un écoulement en régime critique de profondeur h_c et de charge totale H_c , on peut écrire en vertu de la condition de criticité $h_c = (q^2/g)^{1/3} = (2/3)H_c$

$$q = \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{2g} H_c^{3/2} \quad (2)$$

En admettant également en première approximation que H_c est égale à la hauteur h de déversement les relations (1) et (2) permettent d'écrire que

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,577. \text{ Cependant, les observations de } Poleny \text{ indiquent que } \mu = 0,64,$$

ce qui permet de conclure à un écart d'environ 11%. Cet écart a été attribué par *Boussinesq* (1877) à l'effet de la courbure des filets liquides franchissant l'arête du déversoir. Cette courbure joue un rôle significatif et l'augmentation de la valeur du coefficient de débit μ est essentiellement due à son effet. Les résultats de *Boussinesq* (1877) ont permis d'écrire que :

$$\mu = 0,65 \left(1 - 0,391 \frac{i}{\pi} \right) \quad (3)$$

où i désigne l'angle d'inclinaison du déversoir par rapport à la verticale comme l'indique la figure2. La relation (3) ne peut être appliquée que si $P/h \gg 1$.

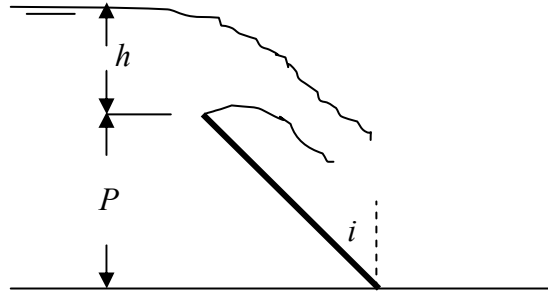


Figure 2 : Déversoir en mince paroi incliné d'un angle i par rapport à la verticale. Lamme d'eau inférieure complètement aérée.

Dans la pratique, le cas usuel d'un déversoir en mince paroi consiste en une plaque verticale dont la largeur est égale à celle amont et aval du canal dans lequel elle est insérée.

Plusieurs relations du coefficient de débit μ ont été proposées par le passé et dont les plus importantes sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Coefficient de débit μ de l'équation (1) selon quelques auteurs.

Auteur	Année	Coefficient de débit μ
<i>Bazin</i>	1898	$\mu=0,6075\left(1+\frac{0,074}{h}\right)\left[1+0,55\left(\frac{h}{h+P}\right)^2\right]$ (4)
<i>Rehbock</i>	1913	$\mu=0,6050\left(1+\frac{0,0019}{h}\right)\left(1+0,138\frac{h}{P}\right)$ (5)
<i>SLA</i>	1924	$\mu=0,615\left(1+\frac{0,001}{h}\right)\left[1+0,5\left(\frac{h}{h+P}\right)^2\right]$ (6)
<i>Kindsvater - Carter</i>	1957	$\mu=0,602\left(1+0,125\frac{h}{P}\right)$ (7)
<i>Sarginson</i>	1972-1973	$\mu=0,613\left(1+\frac{2,33}{W}+0,122\frac{h}{P}\right)$ (8)

Dans la relation (8) de *Sarginson*, le paramètre W représente le nombre de *Weber* tel que $W = \rho h^2 / \sigma$ où ρ est la masse volumique du liquide et σ est la tension superficielle exprimée en kg/m. On peut également écrire que $W = \rho g h^2 / \sigma$ où σ est en N/m. On peut constater à partir du tableau 1 que toutes les relations, à l'exception de la formule de *Kindsvater-Carter*, contiennent trois termes :

- a) Une constante dont la valeur moyenne est de l'ordre de 0,61.
- b) Un terme qui tient compte de l'effet de la tension superficielle et proportionnel à $1/h$ où h est exprimé en mètres. Ce terme se retrouve, à travers le nombre de *Weber*, dans la relation (8) de *Sarginson*.
- c) Un terme qui tient compte de l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement à travers le rapport h/P . Lorsque $h/P \ll 1$, la hauteur capable de la vitesse d'approche de l'écoulement est faible ($V^2/2g \approx 0$).

Le coefficient de débit μ de *Kindsvater-Carter* (1957), donné par la relation (7), se rapporte à la formule :

$$q = \mu \sqrt{g h_e^3} \quad (9)$$

où $h_e = h + 0,9$ (mm). La valeur 0,9 mm a été introduite pour représenter l'effet de la tension superficielle.

La relation du débit unitaire la plus acceptée de nos jours est la deuxième version de la formule de *Rehbock* (1929) :

$$q = 0,4023 \sqrt{2g(h+0,0011)^3} \left(1 + 0,135 \frac{h}{P}\right) \quad (10)$$

Dans cette dernière relation, h s'exprime en mètres.

La relation (10) est applicable pour $h/P < 0,5$. La précision obtenue sur la mesure du débit varie entre 0,1 et 0,2%, à condition que la géométrie du déversoir soit respectée pour être conforme à celle de la figure 1, et que la nappe liquide à l'aval soit complètement aérée.

Notons également la deuxième version de *Kindsvater-Carter* (1959) concernant le calcul du débit Q véhiculé par le canal. En considérant le coefficient de débit donné par la relation (7) du tableau 1, *Kindsvater-Carter* (1959) propose d'évaluer le débit Q par la relation :

$$Q = \frac{2}{3} \sqrt{2g} \mu (B - 0,001) (h + 0,001)^{3/2} \quad (11)$$

Cette relation est applicable sous les conditions suivantes :

- Hauteur de pelle $P > 0,1$ m
- Hauteur de la lame déversante h (minimale) $> 0,08$ m
- Hauteur relative $h/P < 0,25$

I.2.3. Déversoir rectangulaire à paroi mince et à contraction latérale

Le cas le plus général rencontré en pratique est le déversoir en mince paroi à contraction latérale schématiquement représenté sur la figure 3.

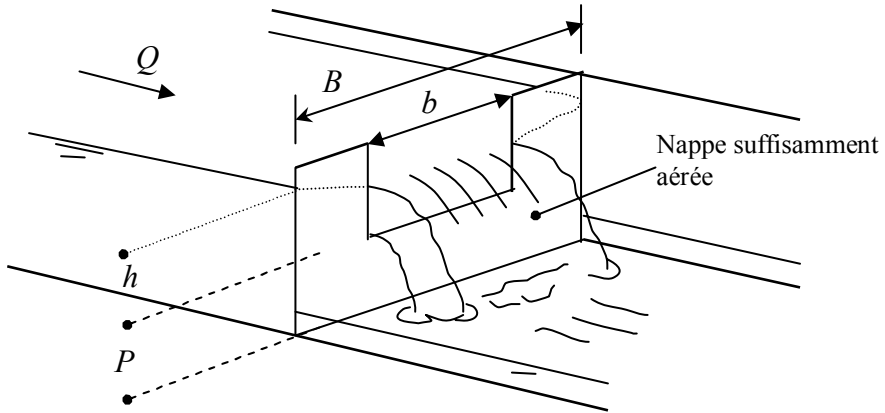


Figure 3 : Déversoir rectangulaire à paroi mince et à contraction latérale
Schéma de définition

La largeur b de l'échancrure du déversoir est inférieure à la largeur B du canal d'amenée de forme rectangulaire. Ces deux paramètres géométriques définissent par leur rapport $\beta = b/B$ la valeur du taux de contraction. Pour ce type de déversoir, de très nombreux tests ont été effectués par SIA (1926). Ces tests ont montré que le débit unitaire q pouvait être calculé en application de la relation (1), en tenant compte du fait que le coefficient de débit μ est tel que:

$$\mu = 0,578 \left(1 + 0,065\beta^2 + \frac{6,25 - 5,19\beta^2}{1000(h + 0,016)} \right) \left[1 + 0,5\beta^4 \left(\frac{h}{h+P} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Dans la relation (12), le taux de contraction est tel que $\beta < 1$, mais doit être supérieur ou égal à 0,30 ($\beta \geq 0,30$), soit $0,30 \leq \beta < 1$. La relation (12) est composée de quatre termes :

- Le premier terme est représenté par la constante 0,578.
- Le second terme est représenté par le taux de contraction β .
- Le troisième terme tient compte de l'effet de la tension superficielle, proportionnelle à $1/h$ (h est exprimé en mètres).
- Le quatrième terme tient compte de l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement, à travers le rapport h/P . En effet, le terme $h/(h + P)$ figurant dans la relation (12) peut s'écrire $h/(h + P) = (h/P)/(1 + h/P)$.

Il est à noter que pour $\beta = 1$, les relations (6) et (12) sont identiques.

D'autres formules du débit ont été également proposées par plusieurs chercheurs, mais ces formules convergent dans leur ensemble vers la même valeur du débit unitaire calculé par application des relations que nous venons de citer. Notons surtout que toutes ces formules doivent être appliquées sous les conditions suivantes :

- $B - b \geq 4h$
- $\frac{h}{P} \leq 0,5$
- $\frac{h}{b} \geq 0,5$
- $P \geq 0,30 \text{ m}$
- $\frac{0,025}{\beta} \geq h \geq 0,80 \text{ m}$
- $b \geq 0,30 \text{ m}$

Si l'une de ces conditions n'est pas respectée, la valeur calculée du débit peut être entachée d'une erreur significative.

I.2.4. Déversoir triangulaire à paroi mince

Le déversoir triangulaire à paroi mince est constitué d'une plaque verticale découpée selon le schéma de la figure 4. Une échancrure est opérée suivant un angle d'ouverture θ . Le dispositif est généralement placé dans un canal rectangulaire de largeur constante B .

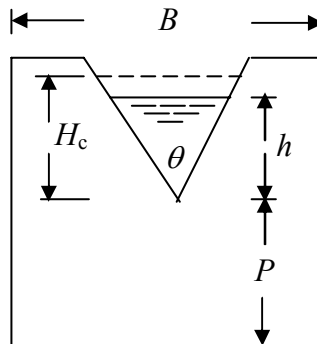


Figure 4 : Déversoir triangulaire à paroi mince – Schéma de définition –

Le déversoir à échancrure triangulaire est l'un des dispositifs de mesure le plus précis, englobant une large gamme de valeurs du débit.

En admettant que le déversoir est franchi par un écoulement en régime critique de charge totale H_c , on peut écrire que $H_c = 5h_c/4$ où h_c est la profondeur critique telle que, en vertu de la condition de criticité, $h_c = [2Q^2/(gm^2)]^{1/5}$, où m est la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois de l'échancrure par rapport à l'horizontale, ou bien $m = tg(\theta/2)$. En tenant compte de ces considérations, le débit Q s'écrit :

$$Q = \frac{16}{25} m \sqrt{\frac{2}{5} g H_c^5} \quad (13)$$

En admettant en outre que la vitesse d'approche de l'écoulement est faible, on peut écrire que En admettant en outre que la vitesse d'approche de l'écoulement est faible, on peut écrire que $H_c = H \approx h$. La relation (13) devient alors :

$$Q = \frac{16}{25} tg(\theta/2) \sqrt{\frac{2}{5} g h^5} \quad (14)$$

ou bien :

$$Q = \frac{8}{15} \mu tg(\theta/2) \sqrt{2gh^5} \quad (15)$$

avec $\mu = \frac{6}{5\sqrt{5}} \approx 0,537$.

La relation (15) est due à *Thomson* et le déversoir triangulaire est également appelé *déversoir Thomson*.

Lorsque la hauteur relative $h/P \leq 0,40$ et que $P/B \leq 0,20$, la contraction est dite pleine et le coefficient de débit μ figurant dans la relation (15) ne dépend que de l'angle θ . Le tableau 2 regroupe les valeurs de μ pour quelques valeurs de l'angle θ .

Tableau 2 : Coefficient de débit μ de l'équation (15) en fonction de θ

θ (°)	20	40	60	80	90	100
μ	0,597	0,582	0,577	0,577	0,578	0,580

Nous avons représenté sur la figure 5 la variation du coefficient de débit μ en fonction de l'angle θ , selon les valeurs données au tableau 2. Nous pouvons observer que la courbe obtenue est une courbe en cloche, qui se compose d'une branche descendante et d'une autre ascendante. Le coefficient de débit μ passe par un minimum tel que $\mu = \mu(\text{minimum}) \approx 0,577$ pour $\theta = 70^\circ$.

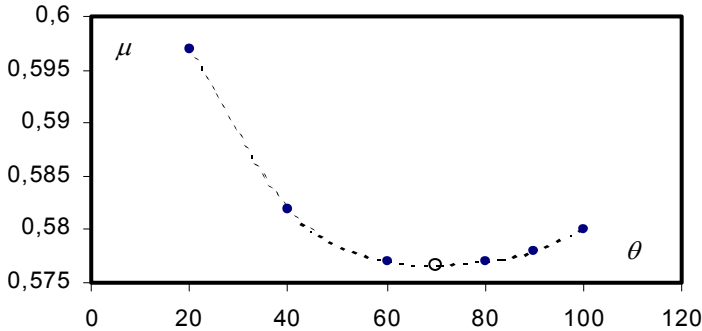


Figure 5 : Variation du coefficient de débit en fonction de l'angle d'ouverture de l'échancrure d'un déversoir triangulaire à paroi mince pour une contraction pleine.

Lorsque :

- la hauteur relative $h/P \leq 1,20$
- $h/B \leq 0,40$
- $0,05 \leq h \leq 0,60$ m
- $P \geq 0,10$ m
- $B \geq 0,60$ m

La contraction est dite partielle. La vitesse d'approche de l'écoulement ainsi que la largeur B du canal d'aménée ont alors un effet très important sur le coefficient de débit μ . Pour illustrer cet effet, des essais ont été effectués sur un déversoir triangulaire à échancrure de 90° (Bos, 1976). La figure 6 montre la variation du coefficient de débit μ en fonction de h/P et P/B . Il est à noter que le canal d'aménée doit être de forme rectangulaire ou pouvant être assimilé comme telle.

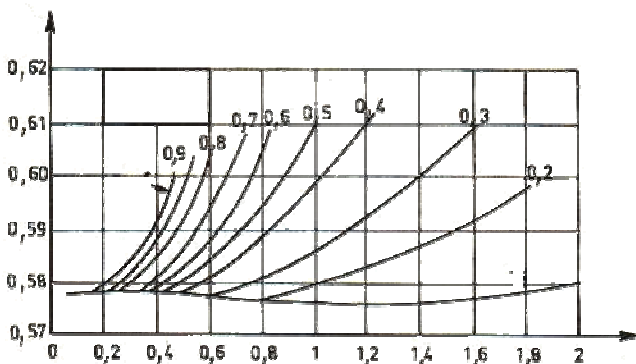


Figure 6 : Déversoir à échancrure triangulaire ($\theta = 90^\circ$) – Coefficient de débit μ pour une contraction partielle en fonction de h/P et P/B selon Bos (1976)

Le déversoir triangulaire à paroi mince a également fait l'objet d'investigations de la part de *Lenz* (1943) qui s'est intéressé en particulier aux effets de la viscosité du liquide et de la tension superficielle sur le coefficient de débit μ .

De même, *Ramponi* (1949) analyse les effets du canal d'amenée sur les caractéristiques de l'écoulement, tandis que *De Coursey* et *Blanchard* (1970) ont étudié les caractéristiques de l'écoulement déversant par dessus de larges déversoirs triangulaires.

Plusieurs types de déversoirs ont été également proposés et testés tel que le déversoir de *Cipoletti* (1963) dont l'échancrure est de forme trapézoïdale. Nous pouvons également citer le déversoir circulaire à paroi mince appelé aussi déversoir proportionnel en raison de la linéarité qu'il induit entre le débit et la lame liquide franchissant le dispositif.

Mais ces appareils de mesure de débit sont rarement utilisés en pratique et ne seront pas exposés dans notre mémoire.

I.2.5. Déversoir à paroi mince à profil en long triangulaire

Il s'agit d'un déversoir créant une contraction verticale de l'écoulement par sa surélévation en formant un seuil dit " seuil épais " (figure 7). Il est en général inséré dans un canal d'amenée de section rectangulaire et l'écoulement s'y étend sur toute la largeur et reste en contact avec le seuil sur une certaine longueur.

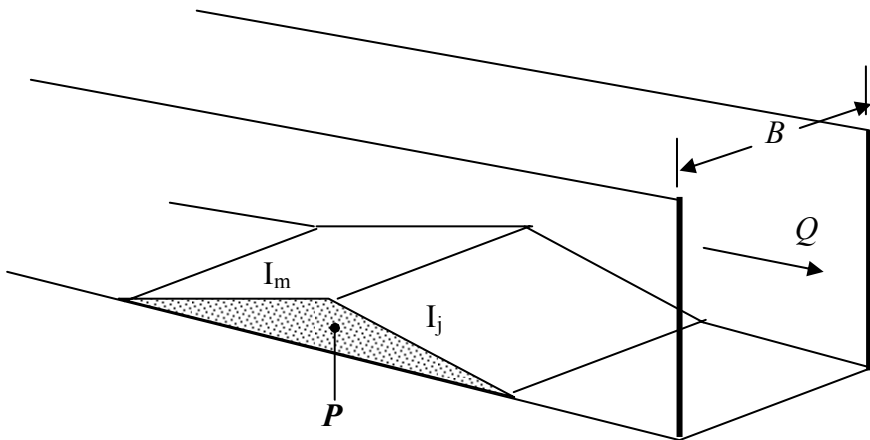


Figure 7 : Représentation schématique du déversoir à paroi mince à profil en long triangulaire

Le débit est donné après étalonnage de l'appareil par mesure de la profondeur de la lame déversante.

Si B est la largeur du canal d'amenée, sur une longueur d'au moins $10B$ les caractéristiques suivantes doivent être respectées :

- Le canal d'amenée doit être rectiligne.
- La section transversale du canal d'amenée doit être rectangulaire et constante.
- La pente du canal d'amenée doit être inférieure à 2%.
- Les parois du canal d'amenée doivent être lisses.
- L'arête déterminée par l'intersection des parements amont et aval de pente respective I_m et I_j doit être horizontale avec cependant une tolérance de 0,2%.

I.2.5.1. Déversoir à seuil épais à profil triangulaire type *Bazin*

Les caractéristiques de l'appareil, basé sur une contraction verticale telle que représentée par la figure 7, sont :

- Hauteur de pelle $P = 50$ cm en admettant une tolérance de 2 cm.
- Le bon fonctionnement de l'appareil est conditionné par les quatre combinaisons suivantes des pentes des parements amont et aval I_m et I_j :

Tableau 3 : Valeurs de pentes amont et aval du déversoir à seuil épais à profil triangulaire type *Bazin*

I_m	1/1	1/1	1/1	1/2
I_j	1/1	1/2	1/3	1/2

Le débit passant par l'appareil se calcule par la relation suivante :

$$Q = \mu B \sqrt{2gh}^{3/2} \quad (16)$$

Rappelons que μ est le coefficient de débit et que B est la largeur du canal dans lequel est inséré le dispositif de mesure. La profondeur h correspond à l'épaisseur de la lame d'eau et doit être mesurée à 2,5 fois la profondeur h max. à l'amont. Afin de simplifier les calculs, la formule du débit peut également s'écrire :

$$Q = KBh^{3/2} \quad (17)$$

où $K = \mu \sqrt{2g}$. Dans la relation (17), la profondeur h ainsi que la largeur B sont mesurées en centimètres et le débit Q est exprimé en litres par seconde.

Les valeurs de K sont consignées dans le tableau 4, en fonction de h et des pentes I_m et I_j des parements amont et aval du seuil.

Tableau 4 : Valeurs du paramètre K de la relation (17) en fonction de h , I_m et I_j

h (cm)	$I_m = 1/1$ $I_j = 1/1$	$I_m = 1/1$ $I_j = 1/2$	$I_m = 1/2$ $I_j = 1/3$	$I_m = 1/2$ $I_j = 1/2$
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.2.5.2. Déversoir à seuil épais à profil triangulaire type *Crump*

La forme de ce déversoir est également caractérisée par un profil en long triangulaire mais les pentes amont et aval du seuil ont des valeurs différentes de celles du seuil à profil triangulaire de type *Bazin* que nous avons décrit précédemment. La figure 8 représente schématiquement ce déversoir.

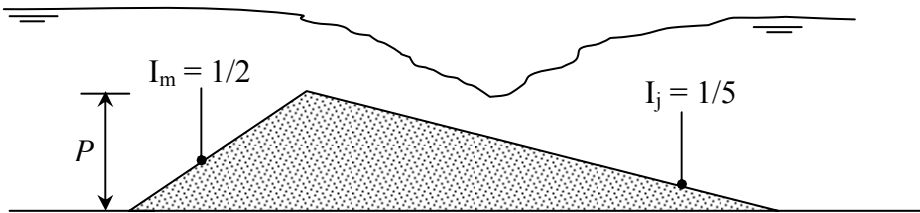


Figure 8 : Déversoir à seuil épais à profil triangulaire de type *Crump*.
Représentation schématique de l'écoulement

Le dispositif de mesure ainsi décrit possède des limites d'utilisation comme tous ses homologues. Celles-ci sont :

- Charge relative maximale: $h/P < 3$.
- Charge minimale h : $h > 8$ cm.

La formule du débit issue de l'étalonnage de l'appareil est :

$$Q = C_e C_v \sqrt{g} B h^{3/2} \quad (18)$$

- C_e est un coefficient sans dimension et dont la valeur est 0,626.
- C_v désigne le coefficient de vitesse, fonction de la largeur B , de la hauteur du plan d'eau h et de la hauteur de pelle P .
- La hauteur du plan d'eau h doit être mesurée entre 3 et 4 fois la hauteur maximale du plan d'eau à l'amont de la crête du déversoir.

I.3. JAUGEURS A RESSAUT

I.3.1. Définition

Ce sont des appareils présentés sous forme d'un canal plus ou moins long et qui présentent une diminution locale de la section ou une section minimale de la section. Cette diminution de la section est considérée comme une singularité et selon le type de jaugeur celle-ci peut être longue ou extrêmement réduite et peut être caractérisée par une variation géométrique graduelle ou brusque. La forme de la section transversale de la singularité peut être arbitrairement choisie, mais il est recommandé qu'elle soit simple afin d'éviter les difficultés dans son exécution. Le fond du canal jaugeur peut être horizontal ou présentant des discontinuités. Pour illustrer cette définition, nous avons représenté sur la figure 9 quelques types de géométries de jaugeurs en canal rectangulaire.

Sur la figure 9.a, le canal jaugeur est caractérisé par un fond plat horizontal et sa section subit une variation graduelle qui se traduit par une contraction latérale jusqu'à une section minimale. Sur la figure 9.b, le canal jaugeur est caractérisé par une surélévation du fond qui se traduit par un seuil déversant dans la section minimale contractée. Enfin, sur la figure 9.c le fond du canal jaugeur est caractérisé par trois tronçons qui forment une ligne brisée. Les tronçons situés à l'amont et à l'aval du canal sont horizontaux, tandis que le tronçon intermédiaire est légèrement incliné.

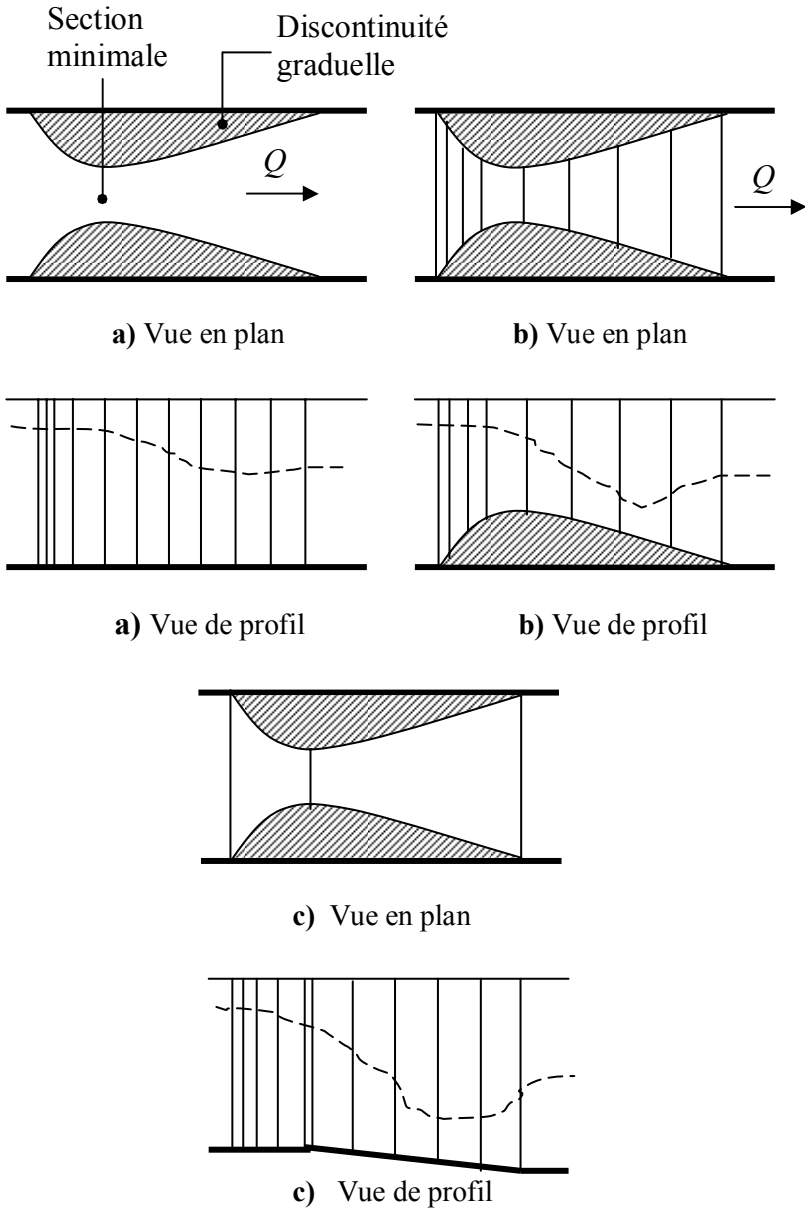


Figure 9 : Géométries typiques des jaugeurs (Hager, 1986).

a) Fond horizontal du canal jaugeur, b) Fond à seuil, c) Fond en pente
 (- - -) Profil en long de l'écoulement avec formation d'un ressaut à l'aval

La section contractée est localisée à la limite des deux premiers tronçons.
La géométrie représentée par la figure 9.a présente des avantages certains par rapport aux autres, car elle occasionne un minimum de perte de charge et permet l'évacuation aisée des sédiments qui pourraient s'accumuler en présence d'un seuil tel que celui représenté par la figure 9.b.
Ces types de jaugeurs sont dits à ressaut car il provoque dans leur partie aval un ressaut hydraulique par transformation de l'écoulement torrentiel, à l'aval immédiat de la section contractée, en un écoulement fluvial dans la partie aval évasée du canal.

I.3.2. Canal jaugeur de type *Parshall*

I.3.2.1. Caractéristiques et expression du débit

Les jaugeurs présentant des rétrécissements et des élargissements de section sont largement utilisés en pratique. Lorsque la géométrie de ces rétrécissements et élargissements n'est pas profilée mais plane, des zones de séparation de l'écoulement ou des zones d'eau morte apparaissent aux abords des discontinuités. Cet aspect est schématiquement décrit sur la figure 10.

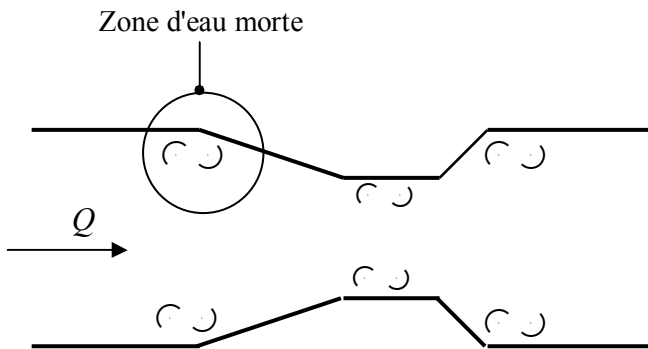
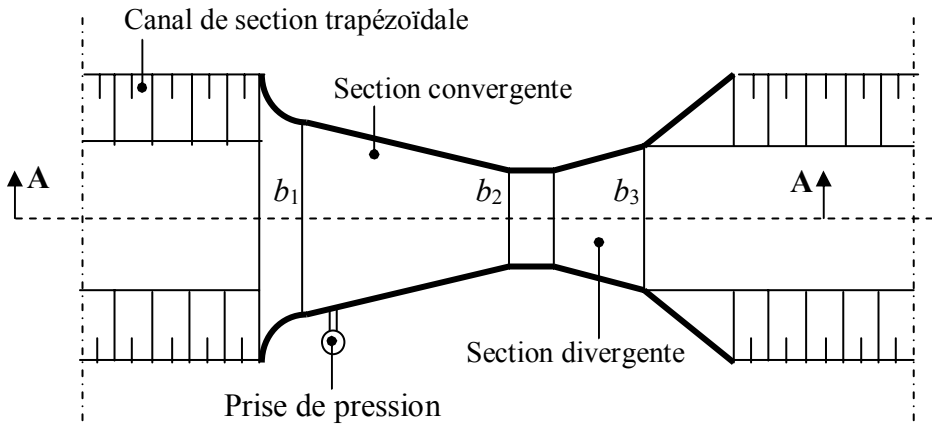
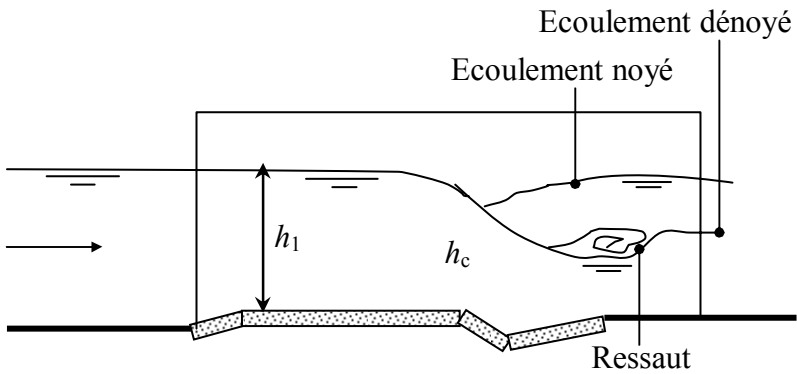


Figure 10 : Vue en plan d'un canal jaugeur de section rectangulaire avec apparition de zones d'eau morte

L'appareil dit jaugeur *Parshall* est un dispositif dont la géométrie s'appuie sur le principe schématiquement décrit sur la figure 10. Il est doté d'une section convergente qui se termine par une section rétrécie appelée col, suivie d'une marche négative. Celle-ci se prolonge par un tronçon court ascendant constituant le fond d'une section légèrement divergente. Le schéma simplifié du jaugeur de type *Parshall* est décrit sur la figure 11.



Vue en plan



Vue suivant A – A

Figure 11 : Jaugeur de type *Parshall* – Représentation schématique en plan et de profil.

Le jaugeur *Parshall* est étalonné sous une hauteur piézométrique h mesurée à quelques centimètres de l'entrée de la section convergente.

La section rétrécie ou divergente a pour effet l'apparition d'un écoulement torrentiel s'écoulant par dessus la marche. Un écoulement de profondeur critique h_c apparaît au droit du col. La section divergente située à l'aval du dispositif permet de transformer l'écoulement torrentiel en un écoulement fluvial par l'intermédiaire d'un ressaut hydraulique. Dans la section initiale de largeur b_1 (figure 11), la charge totale est, en considérant le coefficient de coriolis égal à l'unité :

$$H_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (19)$$

En règle générale, le terme $V_1^2/(2g)$ qui représente la hauteur capable de la vitesse d'approche de l'écoulement est négligé en raison du caractère fluvial de l'écoulement dans la section d'entrée de l'appareil de largeur b_1 , ce qui permet d'écrire que $H_1 \approx h_1$. En outre, la charge critique au droit du col est, pour une section rectangulaire, $H_c = (3/2)h_c$.

Le dispositif de mesure est conçu tel que la longueur de la section divergente séparant b_1 et b_2 est suffisamment courte. Cette particularité nous permet d'écrire que la perte de charge occasionnée sur la distance séparant b_1 et b_2 est négligée. En d'autres termes, $H_1 = h_1 = H_c = (3/2)h_c$, soit :

$$h_c = \frac{2}{3}h_1 \quad (20)$$

Au droit du col de largeur b_2 et de profondeur h_c , la condition de criticité permet d'écrire :

$$Q = \sqrt{g} b_2 h_c^{3/2} \quad (21)$$

En tenant compte de (20), la relation (21) devient :

$$Q = 1,704 b_2 h_1^{3/2} \quad (22)$$

Tenant compte des approximations effectuées lors de l'établissement de la relation (22) celle-ci est affectée d'un coefficient de correction C légèrement inférieur à l'unité et l'on peut alors écrire :

$$Q = 1,704 C b_2 h_1^{3/2} \quad (23)$$

I.3.2.2. Formule pratique du débit

La formule proposée par *Parshall* pour évaluer le débit transitant par le dispositif et dont les termes ont été exprimés en unités techniques, est :

$$Q = 372 b_2 h_1^x 3,28^x \quad (24)$$

Dans la relation (24) :

- Q est en litres par seconde
- b_2 est exprimé en mètres et généralement compris entre $b_1/3$ et $b_1/2$
- h_1 est mesuré en mètres aux $2/3$ de la distance séparant l'entrée de la section convergente et celle du col
- l'exposant x est fonction de la largeur du col b_2 et dont les valeurs sont consignées dans le tableau 5.

Tableau 5 : Valeurs de l'exposant x de la relation (24) en fonction de la largeur b_2

b_2 (m)	0,20	0,60	0,80	1,00	2,00	2,60
x	1,506	1,548	1,560	1,569	1,598	1,609

I.3.3. Canal jaugeur *Venturi* à fond plat – Caractéristiques géométriques et expression du débit

La figure 12 montre une représentation schématique en plan de ce dispositif ainsi que ses principales caractéristiques.

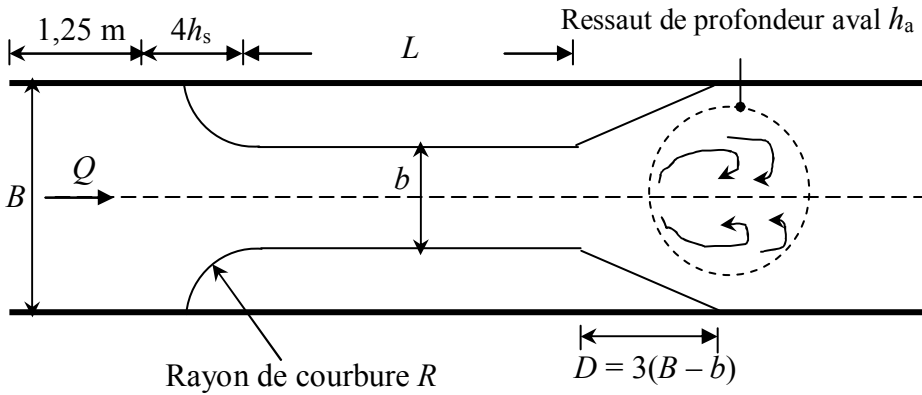


Figure 12 : Canal jaugeur *Venturi* à fond plat – Caractéristiques géométriques

Comme le montre la figure 12, le canal jaugeur *Venturi* à fond plat est constitué

- d'un canal de section rectangulaire à radier horizontal de largeur B qui s'étend sur une longueur égale au minimum à $(1,25 \text{ m} + 4h_s)$, où h_s est la hauteur du plan d'eau maximum.
- d'un tronçon de canal rectiligne de section rectangulaire de largeur b comprise entre 10 centimètres et $0,70B$ et qui s'étend sur une longueur $L \geq 1,5h_s$. L'axe longitudinal de ce tronçon doit se confondre avec celui du canal. On pourra tolérer cependant un écart de 2 cm.
- d'un divergent d'une longueur $D = 3 (B - b)$ qui pourra dans le cas échéant être réduite de moitié, c'est à dire $D = 1,5 (B - b)$.

Les parois du canal jaugeur *Venturi* doivent être lisses et verticales avec une tolérance de 0,2%. Toutes les dimensions du dispositif doivent être respectées avec une tolérance ne dépassant pas 2 mm.

La formule développée du débit transitant par le canal *Venturi* à fond plat est la suivante :

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} C_e C_v b h^{3/2} \quad (25)$$

Dans la relation (25) :

- le coefficient C_e dépend des pertes dues aux frottements et à la turbulence et il est fonction de h , b et L . Il dépend en fait des rapports L/b et h/L . Bien que C_e ait été déterminé pour des valeurs de L/b comprises entre 0,20 et 5, la valeur $L/b = 2$ adoptée par certains fabricants semble être la plus utile.
- le coefficient C_v dépend de la vitesse de l'écoulement dans le canal amont.

Pour tous les débits à mesurer au moyen du canal jaugeur *Venturi* à fond plat, les conditions suivantes doivent être respectées :

- si b/B est supérieur à 0,35 , la hauteur h du plan d'eau amont doit être supérieure ou à la limite égale à $1,20h_a$, où h_a est la hauteur aval du ressaut (figure 12).
- si b/B est inférieur à 0,35 , h doit être supérieure ou égale $1,30h_a$.

I.3.4. Jaugeur en canal triangulaire de type *Achour*

I.3.4.1. Présentation du dispositif

Les figures 13 et 14 montrent de manière schématique le dispositif ainsi que ses caractéristiques géométriques. L'appareil est composé des surfaces gauches OABCO et OA'B'CO constituant la partie convergente du dispositif (figure 13). Ces surfaces sont conçues de telle manière que toute section transversale soit représentée par un triangle isocèle. Le tronçon B'A'AB constitue donc un canal de section 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. Tout l'ensemble ainsi décrit présente un fond unique de pente nulle et un seul axe longitudinal.

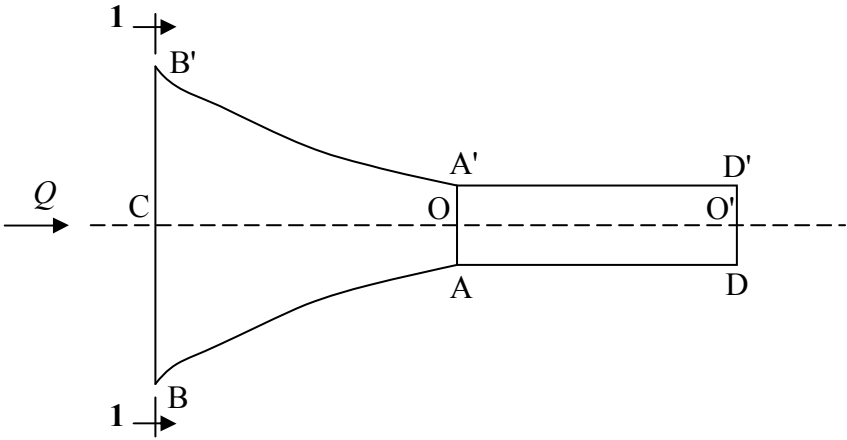


Figure 13 : Jaugeur triangulaire de type *Achour* - Vue en plan de l'appareil.

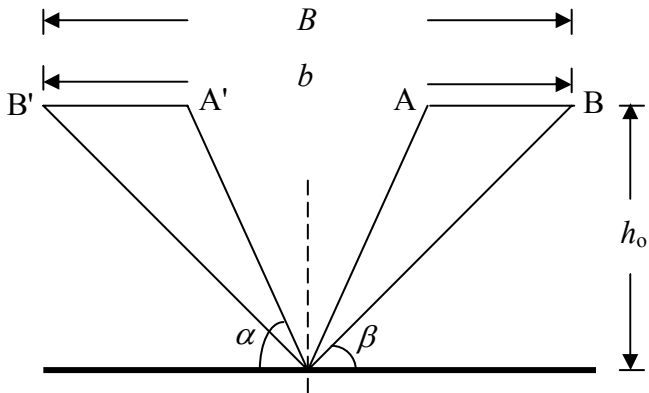


Figure 14 : Jaugeur triangulaire de type *Achour* –
Vue de face de l'appareil suivant 1-1.

I.3.4.2. Etude théorie de l'appareil et expression du débit

L'étude théorique porte sur le tronçon B'A'AB de l'appareil (figure 13) où l'angle d'ouverture de la section triangulaire varie depuis $(\pi - 2\beta)$ jusqu'à $(\pi - 2\alpha)$ constituant l'angle d'ouverture de la section rétrécie de l'appareil (figure 14). En désignant par :

- h_o la hauteur géométrique de l'appareil qui correspond également à la hauteur géométrique du canal dans lequel est inséré le dispositif,
- B la largeur de la section triangulaire d'angle d'ouverture $(\pi - 2\beta)$,
- b la largeur de la section triangulaire d'angle d'ouverture $(\pi - 2\alpha)$,
- m_1 le talus de la section d'entrée BB' de l'appareil défini par la $\cotg\beta$,
- m_2 le talus de la section rétrécie AA' de l'appareil défini par la $\cotg\alpha$,

Nous pouvons alors établir géométriquement les relations suivantes :

$$m_1 = \cotg\beta = \frac{B/2}{h_o} \quad (26)$$

$$m_2 = \cotg\alpha = \frac{b/2}{h_o} \quad (27)$$

Le rapport des relations (26) et (27) conduit à écrire que :

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{B}{b} \quad (28)$$

La variation progressive de l'angle d'ouverture de la section divergente de l'appareil (figure 13) permet d'obtenir une infinité de profondeurs critiques. On peut alors exprimer ces profondeurs, pour les sections triangulaires BB' et AA' respectivement, par les relations :

$$h_{c1} = \left[\frac{2Q^2}{gm_1^2} \right]^{1/5} \quad (29)$$

$$h_{c2} = \left[\frac{2Q^2}{gm_2^2} \right]^{1/5} \quad (30)$$

dans lesquels Q est le débit passant par l'appareil et g est l'accélération de la pesanteur. Les relations (29) et (30) découlent de la condition de criticité bien connue $Q^2 e / (gA^3) = 1$, où e est la largeur du plan d'eau tel que $e = 2mh_c$ et A est l'aire de la section mouillée critique telle que $A = mh_c^2$. La combinaison des relations (29) et (30) permet d'écrire :

$$h_{c1} = h_{c2} \left(\frac{b}{B} \right)^{2/5} \quad (31)$$

Si le régime initial de l'écoulement avant la mise en place de l'appareil est torrentiel, il se transformera en fluvial à l'amont de l'appareil, après la mise en place de ce dernier. Cette transformation se fera moyennant un ressaut. Par conséquent, l'écoulement se produisant dans la section d'entrée BB' est en régime fluvial. En désignant par h_1 la profondeur de l'écoulement dans la section BB', nous pouvons écrire que $h_1 > h_{c1}$.

Par contre, si le régime primitif de l'écoulement est fluvial, il gardera son caractère après la mise en place de l'appareil. Par conséquent, l'écoulement se produisant dans la section d'entrée BB' est en régime fluvial et nous pouvons écrire $h_1 > h_{c1}$.

Dans les deux cas ci-dessus indiqués, la profondeur h_1 diminue au fur et à mesure que l'on passe de la section d'entrée BB' de l'appareil à sa section rétrécie AA' qui sera le lieu d'un écoulement critique. En désignant par h_2 la profondeur de l'écoulement dans la section AA', nous pouvons écrire que $h_2 = h_{c2}$. La profondeur critique h_{c2} est définie par la relation (30). La section rétrécie AA' de l'appareil est alors une section de contrôle. En désignant respectivement par H_1 et H_2 la charge totale dans la section BB' et AA' et en négligeant la perte de charge se produisant entre les deux sections, nous pouvons écrire $H_1 = H_2$. La section rétrécie AA' de l'appareil étant critique ($h_2 = h_{c2}$) et de forme triangulaire, la charge totale H_2 s'exprime par la relation $H_2 = (5/4)h_{c2} = H_1$, soit

$$h_{c2} = \frac{4}{5} H_1 \quad (32)$$

En substituant (32) dans (31), nous pouvons écrire :

$$h_{c1} = \frac{4}{5} h_1 \left[\frac{b}{B} \right]^{2/5} \quad (33)$$

En rapportant la charge totale H_1 à la profondeur critique h_{c1} , la relation (33) devient :

$$\frac{H_1}{h_{c1}} = H_{1X} = \frac{5}{4} \left[\frac{B}{b} \right]^{2/5} \quad (34)$$

Ainsi, le paramètre sans dimension H_{1X} ne dépend que des caractéristiques géométriques B et b de l'appareil étudié.

En considérant le facteur de correction de l'énergie cinétique égal à l'unité, la charge totale H_1 s'exprime, pour la section triangulaire BB', par la relation :

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2g(m_1 h_1^2)^2}$$

soit :

$$\frac{H_1}{h_{c1}} = \frac{h_1}{h_{c1}} + \frac{Q^2}{2gh_{c1}(m_1 h_1^2)^2}$$

En tenant compte de la relation (29), la relation ci-dessus devient :

$$\frac{H_1}{h_{c1}} = \frac{h_1}{h_{c1}} + \frac{h_{c1}^4}{4h_1^4} = \frac{h_1}{h_{c1}} + \frac{1}{4(h_1/h_{c1})^4}$$

Or, par définition, $H_1/h_{c1} = H_{1X}$ et $h_1/h_{c1} = h_{1X}$. Ainsi, le paramètre H_{1X} s'exprime par la relation :

$$H_{1X} = h_{1X} + \frac{1}{4h_{1X}^4} \quad (35)$$

Nous pouvons déduire de (34) et (35) que :

$$\frac{5 \left[\frac{B}{b} \right]^{2/5}}{4 \left[\frac{b}{B} \right]} = h_{1X} + \frac{1}{4h_{1X}^4} \quad (36)$$

Etant donné que les paramètres géométriques B et b sont connus, la relation (36) permet d'évaluer h_{1X} pour n'importe quel canal de type étudié.

La forme de l'appareil est telle que $B/b > 1$, par conséquent la relation (36) nous montre que :

$$h_{1X} + \frac{1}{4h_{1X}^4} > 5/4$$

Nous pouvons ainsi en déduire que le paramètre sans dimension h_{1X} est différent de l'unité ($h_{1X} \neq 1$). Cependant, compte tenu du fait que le régime d'écoulement dans la section BB' d'entrée de l'appareil est fluvial ($h_1 > h_{c1}$), le paramètre h_{1X} est strictement supérieur à l'unité ($h_{1X} > 1$).

Les relations (28) et (29) permettent d'écrire :

$$Q^2 = \frac{g}{2} m_2^2 \left[\frac{B}{b} \right]^2 h_{c1}^5 \quad (37)$$

Puisque $h_{c1} = h_1/h_{1X}$, la relation (37) devient :

$$Q = \sqrt{\frac{g}{2}} \frac{m_2}{(b/B) h_{1X}^{5/2}} h_1^{5/2} \quad (38)$$

C'est l'expression du débit qui prend la forme définitive suivante :

$$Q = a \sqrt{\frac{g}{2}} m_2 h_1^{5/2} \quad (39)$$

avec $a = \frac{1}{(b/B) h_{1X}^{5/2}}$.

Le paramètre a n'est fonction que du rapport b/B , donc des caractéristiques géométriques de l'appareil. Le débit est alors déterminé par une simple lecture limnimétrique de la profondeur h_1 de l'écoulement à l'entrée de l'appareil, correspondant à la section BB' de la figure 13 et moyennant les caractéristiques géométriques de ce dernier. Ceci est d'ailleurs conforme aux appareils semi-modulaires.

I.4. CONCLUSION

La première partie de notre étude a eu pour objectif de passer en revue les principaux appareils de mesure du débit dans les canaux ouverts utilisés dans la pratique de l'ingénieur.

Nous pouvons noter que ces appareils présentent tous une loi *hauteur – débit*. Cette hauteur correspond à l'épaisseur de la lame d'eau franchissant l'appareil et elle est mesurée à l'amont.

Notre étude a montré deux grandes catégories d'appareils. La première catégorie correspond aux appareils utilisant le libre déversement par dessus une paroi plane verticale placée en travers de l'écoulement. Ces appareils sont appelés déversoirs et sont dotés soit d'une échancrure de forme rectangulaire, soit d'une échancrure de forme triangulaire. Ce sont ces deux formes qui sont les plus utilisées. Lorsque le déversoir est doté d'une échancrure rectangulaire, le débit volume Q est proportionnel à la puissance $3/2$ de la hauteur de déversement mesurée à l'amont. Par contre, lorsque le déversoir est doté d'une échancrure de forme triangulaire, le débit volume Q est proportionnel à la puissance $5/2$ de la hauteur de déversement.

Notre avons montré que toutes les relations exprimant le débit transitant à travers ces déversoirs contiennent des termes correctifs. Le plus important d'entre eux est sans aucun doute le coefficient de débit μ . Nous avons alors indiqué les paramètres dont dépend ce coefficient et nous avons également présenté les relations qui permettent de l'évaluer, selon divers auteurs.

Le déversoir à paroi mince et à échancrure rectangulaire peut être avec contraction latérale ou sans contraction latérale. Le coefficient de débit correspondant dépend essentiellement de la hauteur relative h/P , où h est la hauteur de déversement et P est la hauteur de pelle du déversoir. Certains auteurs ont pu définir l'influence de la tension superficielle sur le coefficient de débit μ et cette influence est appréhendée par le terme $1/h$.

Nous avons tenté de définir aussi clairement que possible les limites d'applicabilité des divers déversoirs présentés en indiquant les gammes de valeurs des paramètres hydrauliques de l'écoulement et géométriques de l'appareil.

Les déversoirs présentent un certain nombre de contraintes liées d'une part aux dépôts solides qui s'y accumulent et nécessitent alors un nettoyage périodique. D'autre part, en raison du caractère déversant de l'écoulement, la charge à l'amont se transforme à l'aval en énergie cinétique dans sa quasi globalité. Toute la charge amont est ainsi perdue à l'aval et cela constitue un inconvénient certain surtout dans les zones à faible déclivité.

Pour éliminer ces inconvénients, certains chercheurs ont tenté de concevoir d'autres types d'appareils. Ce sont les jaugeurs dits à ressaut qui utilisent la particularité de ce dernier à surélever le plan de charge aval. Notre étude a alors présenté les plus importants d'entre eux, notamment les canaux jaugeurs de type *Parshall*, *Venturi* et *Achour*.

Les caractéristiques géométriques et les formules pratiques du débit de ces jaugeurs ont été largement discutées et leur limite d'applicabilité a été définie.

Cette catégorie d'appareils présente en règle générale une géométrie plane, à l'exception du jaugeur *Achour* dont les parois sont gauches. Les jaugeurs *Venturi* et *Parshall* sont caractérisés par une section droite rectangulaire qui diminue dans un premier temps pour former un convergent, puis augmente dans un second temps pour former un divergent. Entre ces deux tronçons est insérée une partie rectiligne également de section transversale rectangulaire et qui est souvent appelée col. A l'entrée de l'appareil, l'écoulement est fluvial et garde ce caractère tout le long du tronçon convergent. Au droit du col, l'écoulement est critique et il est suivi par un écoulement en régime torrentiel. Le tronçon divergent a la particularité de transformer l'écoulement torrentiel en un écoulement fluvial par l'intermédiaire d'un ressaut hydraulique.

Le débit transitant par les jaugeurs *Parshall* et *Venturi* dépend de la profondeur de l'écoulement à l'entrée de l'appareil ainsi que des caractéristiques géométriques de celui-ci. Les formules pratiques exprimant ce débit ont été présentées et discutées.

Etant donné que ces jaugeurs sont caractérisés par une section droite rectangulaire, la précision dans la mesure du débit dépend fortement de celle commise sur la mesure de la profondeur d'entrée de l'écoulement. Une bonne précision n'est obtenue que pour les fortes profondeurs, c'est à dire pour les forts débits. Pour les faibles profondeurs, l'erreur commise sur la mesure du débit peut être significative.

Afin d'éliminer cet inconvénient, *Achour* (1989) propose un jaugeur dont la section droite demeure triangulaire tout le long de l'appareil. Celui-ci est également composé d'une partie convergente où l'écoulement est de nature fluviale. Cette partie est ensuite suivie d'un tronçon rectiligne de section droite triangulaire constante dans lequel le régime d'écoulement est critique.

A l'extrémité aval du dispositif, un tronçon de section droite divergente est inséré, ayant pour rôle la transformation, par l'intermédiaire d'un ressaut, de l'écoulement torrentiel prenant naissance à l'aval immédiat du tronçon rectiligne en un écoulement fluvial.

Le débit transitant par le jaugeur *Achour* dépend de la profondeur de l'écoulement à l'entrée immédiate de l'appareil ainsi que des caractéristiques géométriques de celui-ci.

Les jaugeurs *Parshall*, *Venturi* et *Achour* sont des appareils dits semi-modulaires, car le débit est fonction à la fois de la profondeur de l'écoulement et de leur géométrie. Leur fond est plat et leur axe longitudinal se confond avec celui du canal dans lequel ils sont insérés. Cette particularité confère à ces appareils un caractère auto-dégrevant.

La seconde partie de notre étude se propose d'examiner un nouveau type de jaugeur, basé sur une section droite triangulaire à seuil large et sans surélévation du fond. Les parois du dispositif sont planes, ce qui permet une mise en oeuvre aisée. Nous examinerons les possibilités offertes par cet appareil à travers une approche expérimentale et nous tenterons de définir le débit ainsi que le coefficient de débit par une approche théorique rigoureuse.

DEUXIEME PARTIE

Conception et réalisation d'un débitmètre triangulaire à large seuil

II.1. Introduction

II.2. Description de l'appareil

II.3. Etude théorique de l'appareil

II.3.1. Expression du débit

II.3.2. Expression du coefficient de débit

II.4. Conclusion

II.1. INTRODUCTION

La présente partie de notre étude a pour objectif principal de proposer un nouveau type de débitmètre de section triangulaire, d'établir les expressions théoriques du débit Q et du coefficient de débit μ et de les vérifier par une approche expérimentale sur quelques modèles physiques.

L'approche théorique tiendra compte de tous les paramètres influençant la mesure du débit à l'exception de la tension superficielle. Celle-ci sera éventuellement observée lors des essais et son effet pourra alors être quantifié. Le développement théorique prendra en compte l'influence de la vitesse d'approche de l'écoulement à l'amont de l'appareil étudié, représentée par la quantité $V^2/(2g)$. Habituellement, dans l'étude des déversoirs, cette quantité est négligée et la charge totale de l'écoulement à l'amont est assimilée à la profondeur de celui-ci. Ceci constitue une approche simplifiée qui mène parfois à des résultats entachés d'une erreur non négligeable.

Dans un premier temps, l'appareil étudié sera décrit puis les équations qui régissent l'écoulement qui y transite seront présentées. Nous établirons en particulier l'expression théorique du coefficient de débit et nous représenterons sa variation en fonction des paramètres dont il dépend. L'influence de la contraction verticale, due à la présence du dispositif, sera également prise en considération et son expression sera définie de manière analytique.

Dans un second temps, notre travail s'orientera vers la conception, la réalisation et l'expérimentation de modèles physiques du dispositif de mesure de débit proposé. Nous testerons au laboratoire quelques modèles de caractéristiques géométriques différentes, ce qui nous permettra de vérifier les limites de fiabilité des relations théoriques que nous avons établies.

Afin d'observer l'influence de la tension superficielle sur la mesure du débit, le dispositif de mesure étudié sera volontairement testé sous de faibles charges.

Enfin, Les résultats expérimentaux seront présentés puis analysés et des conclusions seront tirées, notamment en ce qui concerne les limites de validité de la loi " hauteur – débit ".

II.2. DESCRIPTION DE L'APPAREIL

II.2.1. Géométrie du débitmètre

Comme dans le cas du déversoir *Thomson*, représenté sur la figure 4 de la première partie, le dispositif de mesure de débit que nous proposons est également caractérisé par une section droite de forme triangulaire. Cependant, ce dispositif s'étend sur une certaine longueur à l'inverse du déversoir *Thomson* dont la longueur se réduit simplement à l'épaisseur d'une paroi plane mince.

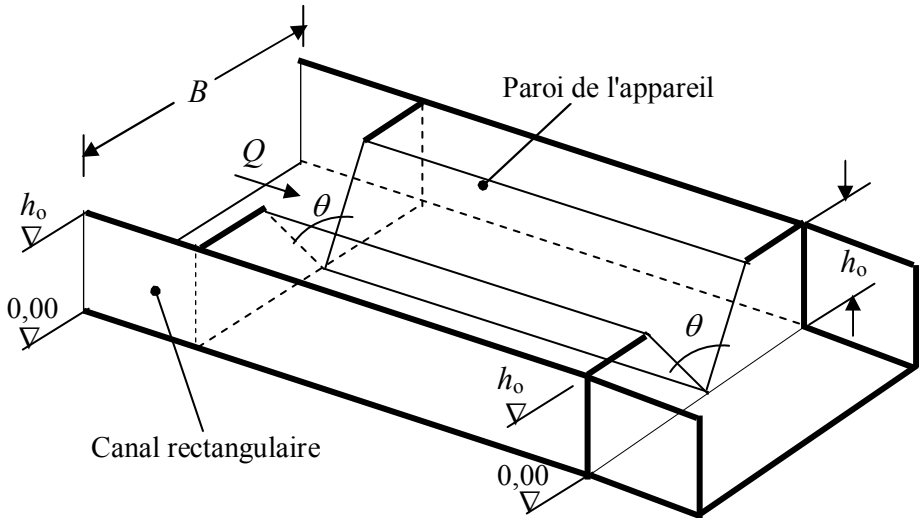


Figure 15 : Schéma simplifié en 3D du débitmètre étudié placé dans un canal rectangulaire

La figure 15 montre en perspective le schéma du débitmètre, placé dans un canal d'amenée horizontal de section rectangulaire de largeur B . Il est composé d'un canal court de section droite triangulaire à parois planes d'angle d'ouverture constant θ . La valeur maximale de l'angle θ sera dictée par les caractéristiques géométriques B et h_o du canal d'amenée, puisque $\text{tg}(\theta \text{ max} / 2) = m = B/(2h_o)$. Le fond du débitmètre se confond avec celui du canal rectangulaire dans lequel il est inséré. L'écoulement dans le canal d'amenée est fluvial et devient critique à l'entrée du débitmètre.

II.2.2. Description de l'écoulement

La figure 16 montre le profil en long de l'écoulement. Nous pouvons observer que la nature de celui-ci est :

- Fluvial dans le canal d'amenée, c'est à dire à l'amont du dispositif.
- Critique dans une section donnée pouvant être située aux alentours de la section 3-3 située à l'aval de la section d'entrée du dispositif.
- Torrentielle à l'aval de la section 3-3.

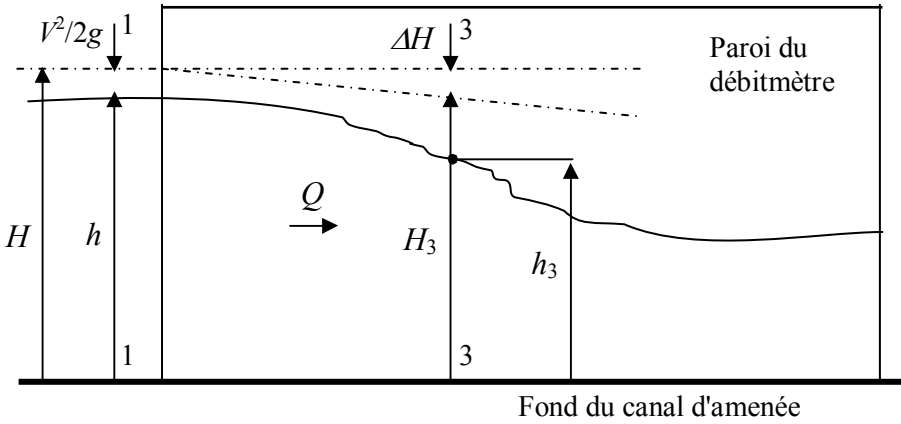


Figure 16: Profil en long de l'écoulement dans le débitmètre.

II.3. CONSIDERATIONS THEORIQUES

II.3.1. Application de l'équation de la quantité de mouvement

L'équation de la quantité de mouvement peut être appliquée entre les sections 1-1 et 3-3 indiquées sur la figure 16. Cette équation doit prendre en considération la force de réaction de la face amont du dispositif correspondant au rétrécissement brusque de la section droite du canal d'amenée. En considérant d'une part une répartition hydrostatique des pressions dans toute section et que la condition de criticité est satisfaite dans la section 3-3 d'autre part, l'application de l'équation de la quantité de mouvement aboutit à :

$$h_1^{*5} - \frac{5}{3M_1} h_1^{*3} + \frac{2}{3M_1} = 0 \quad (40)$$

où $h_1^* = h_1/h_c$ $M_1 = mh_1/B$. Nous rappelons que h_c est la profondeur critique dans la section triangulaire du débitmètre.

La relation (40) montre ainsi que h_1^* est lié au seul paramètre M_1 par une équation implicite de degré cinq. Cette équation est représentée graphiquement sur la figure 17 et montre que h_1^* augmente avec l'accroissement de M_1 . Nous pouvons également constater que dans toute la gamme $0 \leq M_1 \leq 0,5$, le paramètre h_1^* varie dans la gamme relative réduite $0,737 < h_1^* < 0,79$.

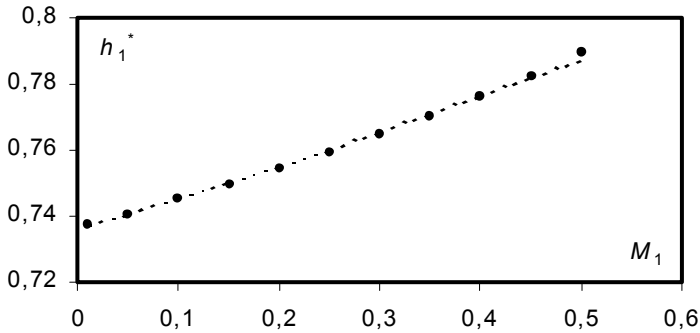


Figure 18 : Variation de h_1^* en fonction de M_1 selon la relation (40).
(- - -) Courbe d'ajustement

Un ajustement, basé sur la méthode des moindres carrés non linéaires, a permis de proposer une excellente relation approchée en remplacement de l'équation (40), avec une erreur relative maximale de 0,6% correspondant à $M_1 = 0,5$:

$$h_1^* \cong 0,11M_1^{9/8} + 0,737 \quad (41)$$

Ainsi, on pourra noter que la charge totale dans la section 1-1 est :

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gB^2h_1^2} \quad (42)$$

En rapportant les termes de la relation (42) à la profondeur critique h_c dans la section triangulaire, il vient que :

$$H_1^* = h_1^{*-1} + \frac{1}{4}M_1^2 h_1^{*4} \quad (43)$$

où $H_1^* = H_1 / h_c$. Les relations (40) et (43) montrent que la charge relative H_1^* ne dépend que du paramètre adimensionnel M_1 . Nous représentons sur la figure 19, la variation de H_1^{*-1} en fonction de M_1 . Nous pouvons alors observer que la courbe obtenue peut être assimilée, avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,9996$, à une droite d'équation :

$$H_1^{*-1} = \frac{h_c}{H_1} = 0,0757M_1 + 0,7372 \quad (44)$$

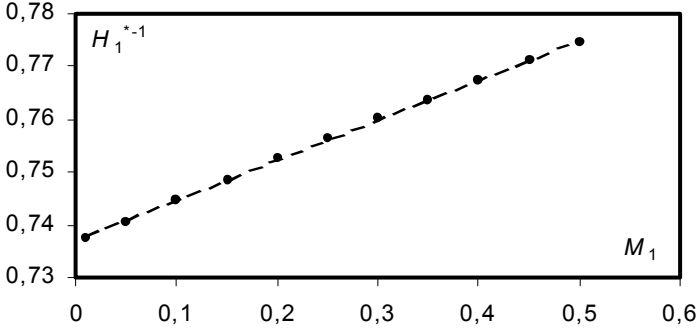


Figure 19 : Variation de H_1^{*-1} en fonction de M_1 selon les relations (40) et (43)

II.3.2. Expression théorique du coefficient de débit

La relation (41) peut s'écrire, en tenant compte de la condition de criticité dans la section triangulaire de l'appareil :

$$h_c = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{gm^2}} = [0,11M_1^{9/8} + 0,737] h_1 \quad (45)$$

ou bien :

$$Q = \frac{1}{2} m \sqrt{2g} [0,11M_1^{9/8} + 0,737]^{5/2} h_1^{5/2} \quad (46)$$

Cette dernière relation peut également s'écrire :

$$Q = \frac{1}{2} m \sqrt{2g} B M_1 [0,11M_1^{9/8} + 0,737]^{5/2} h_1^{3/2} \quad (47)$$

où l'on rappelle que B est la largeur du canal rectangulaire dans lequel est insérée le dispositif triangulaire étudié. Le débit unitaire $q = Q/B$ qui transite par ce canal est donc :

$$q = \frac{1}{2} \sqrt{2g} M_1 [0,11M_1^{9/8} + 0,737]^{5/2} h_1^{3/2} \quad (48)$$

On peut exprimer la relation (48) sous la même forme que l'équation (17) , soit $q = K h_1^{3/2}$, où K est :

$$K = \frac{1}{2} \sqrt{2g} M_1 [0,11M_1^{9/8} + 0,737]^{5/2} = \mu \sqrt{2g} \quad (49)$$

Le coefficient de débit μ n'est donc fonction que du seul paramètre adimensionnel M_1 , soit :

$$\mu = \frac{1}{2} M_1 [0,11M_1^{9/8} + 0,737]^{5/2} \quad (50)$$

La relation (50) représente ainsi l'expression théorique du coefficient de débit du dispositif étudié. Pour la valeur maximale $M_1 = 0,5$, la relation (50) indique que $\mu = 0,1375$, tandis que la relation (49) indique que $K = 0,609$. La relation (50) est représentée graphiquement sur la figure 20. Elle montre que μ augmente avec l'accroissement de M_1 . En pratique, il n'y a aucune difficulté à évaluer le paramètre $M = mh_1/B$, après avoir mesurer la profondeur h_1 de l'écoulement dans le canal d'amenée rectangulaire à l'amont du dispositif étudié. L'évaluation du paramètre M_1 et la mesure limnimétrique de h_1 permettent alors d'estimer le débit unitaire, ou le débit volume, par application de la relation (48)

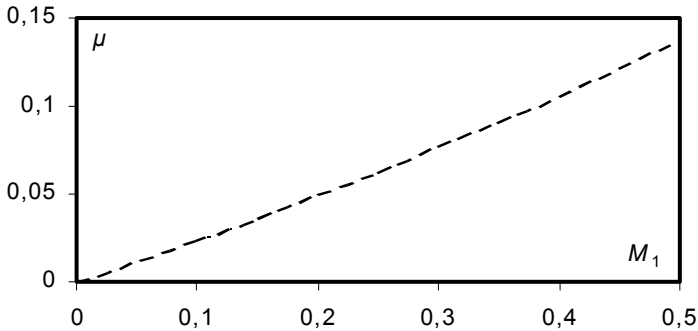


Figure 20 : Variation du coefficient de débit μ en fonction de M_1 selon la relation (50)

II.3.3. Effet de la vitesse d'approche de l'écoulement

Dans le domaine de la débitmétrie, l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement peut avoir une influence non négligeable sur la valeur du coefficient de débit μ . Afin de quantifier cet effet par une approche théorique, nous pouvons faire appel à la relation (44). La charge totale H_1 peut être remplacée par la quantité $(1+\delta) h_1$, où δ désigne la fraction de la charge en rapport avec l'énergie cinétique. L'équation (44) devient alors, en tenant compte de la condition de criticité dans la section triangulaire du dispositif étudié :

$$h_c = \sqrt[5]{\frac{2Q^2}{gm^2}} = \zeta (1 + \delta) h_1$$

où $\zeta = \zeta(M_1) = (0,0757M_1 + 0,7372)$. La relation précédente peut également s'écrire, en posant $C_M = M_1 \zeta^{5/2}$:

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{2g} BC_M (1 + \delta)^{5/2} h_1^{3/2} \quad (51)$$

Lorsque l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement devient négligeable, correspondant à $\delta \rightarrow 0$, la relation (48) est alors reproduite.

La charge totale H_1 s'écrit :

$$H_1 = (1 + \delta) h_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gB^2 h_1^2}$$

soit :

$$\delta = \frac{Q^2}{2gB^2 h_1^3} \quad (52)$$

En tenant compte de (51), la relation (52) permet d'écrire :

$$\delta = \frac{1}{4} C_M^2 (1 + \delta)^5$$

ou bien :

$$\frac{(1 + \delta)^5}{\delta} = \frac{4}{C_M^2} = \frac{4}{M_1^2 \zeta^5} \quad (53)$$

La relation (53) montre que le facteur cinétique δ ne dépend que du paramètre M_1 . Le calcul indique que dans toute la gamme $0 < M_1 \leq 0,5$, le facteur cinétique δ est inférieur à l'unité et l'on peut écrire que $(1 + \delta)^5 \approx (1 + 5\delta)$. Cette dernière remarque permet la simplification de la relation (53) qui s'écrit :

$$\delta = \frac{C_M^2}{4 - 5C_M^2}$$

soit :

$$(1 + \delta)^{5/2} = \left(\frac{1 - C_M^2}{1 - \frac{5}{4}C_M^2} \right)^{5/2} \quad (54)$$

Ainsi, en tenant compte de (54), le débit volume Q transitant par le canal est selon la relation (51) :

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{2g} BC_M \left(\frac{1 - C_M^2}{1 - \frac{5}{4}C_M^2} \right)^{5/2} h_1^{3/2} \quad (55)$$

La relation (55) peut se mettre sous la forme $Q = KBh_1^{3/2}$, avec :

$$K = \mu\sqrt{2g} = \frac{1}{2}\sqrt{2g} C_M \left(\frac{1 - C_M^2}{1 - \frac{5}{4}C_M^2} \right)^{5/2} \quad (56)$$

$$\mu = \frac{1}{2}C_M \left(\frac{1 - C_M^2}{1 - \frac{5}{4}C_M^2} \right)^{5/2} \quad (57)$$

La relation (57) exprime le coefficient de débit théorique μ , tout en tenant compte de l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement. Cet effet est quantifié par le terme entre les crochets. La relation (57) peut également s'écrire :

$$\frac{\mu}{\mu_0} = (1 + \delta)^{5/2} = \left(\frac{1 - C_M^2}{1 - \frac{5}{4}C_M^2} \right)^{5/2} = f(M_1) \quad (58)$$

Le coefficient μ_0 est le coefficient de débit correspondant à $\delta \rightarrow 0$, défini par la relation (50). La relation (58) est représentée graphiquement sur la figure 21 et montre que $\mu/\mu_0 > 1$ et augmente avec l'accroissement de M_1 . Nous pouvons également constater que lorsque $M_1 \rightarrow 0$, $\mu/\mu_0 \rightarrow 1$ et l'effet du facteur cinétique δ devient négligeable. Par contre, l'effet de δ est relativement significatif pour les valeurs plus élevées de M_1 . L'écart relatif, entre les coefficients de débit μ et μ_0 , atteint 5% environ pour la valeur maximale $M_1 = 0,5$. Pour évaluer le débit volume Q avec la plus grande précision possible, il est recommandé d'appliquer la relation (55).

L'effet de la tension superficielle peut également influencer sur la valeur du coefficient de débit et par conséquent sur celle du débit volume. Cet effet apparaît essentiellement pour les valeurs réduites de M_1 et une étude ultérieure tentera d'appréhender cet aspect du problème.

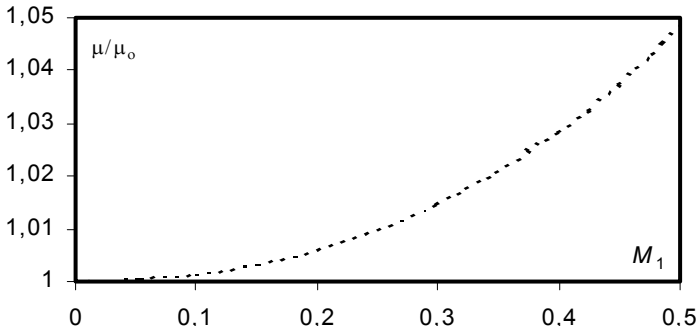


Figure 21 : Variation de μ/μ_0 en fonction de M_1 selon la relation (58)

CONCLUSION

Notre travail a eu pour objectif l'étude d'un appareil semi modulaire destiné à la mesure des débits dans les canaux ouverts.

Nous avons présenté dans un premier temps un état des connaissances sur les recherches antérieures relatives à la mesure des débits dans les canaux ouverts. La distinction a été faite entre les appareils de mesure à libre déversement et les jaugeurs à ressaut. Nous avons indiqué leurs avantages et leurs inconvénients et nous avons discuté les principales relations qui les régissent ainsi que leur domaine d'applicabilité.

Dans un second temps, Nous nous sommes intéressés à l'étude d'un nouveau type d'appareil semi modulaire. Notre choix s'est porté sur un élément de forme triangulaire à parois épaisses et d'angle d'ouverture constant. Il est dépourvu d'une hauteur de pelle et son axe longitudinal se confond avec celui du canal d'amenée dans lequel il est inséré.

Placé dans un canal de section droite rectangulaire constante, l'appareil provoque un rétrécissement brusque de la section. La veine liquide s'y écoulement subit une contraction latérale.

L'écoulement dans le canal d'amenée rectangulaire est en régime fluvial et se transforme en un écoulement en régime torrentiel à l'intérieur du dispositif. Cette transformation s'opère par une section de contrôle qui apparaît alors quelque part à l'aval du rétrécissement.

L'objectif principal de notre étude a été de définir l'expression théorique du débit transitant dans le canal d'amenée. Pour atteindre cet objectif, nous avons eu recours à l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a nécessité le choix d'une section droite prise dans le canal d'amenée ainsi que la section critique à l'intérieur de l'appareil.

Tenant compte de la réaction de la face amont du dispositif, l'application de l'équation de la quantité de mouvement a permis d'établir que la hauteur relative

$h_1^* = \frac{h_1}{h_c}$ n'était liée qu'au seul paramètre adimensionnel $M_1 = \frac{m h_1}{B}$, où h_1 est

la profondeur de l'écoulement dans le canal d'amenée de largeur B , h_c est la profondeur critique dans la section de contrôle de l'appareil et m est la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois de celui-ci par rapport à l'horizontale. L'équation obtenue est d'ordre cinq vis-à-vis de la variable h_1^* et un ajustement a permis de la remplacer, avec une excellente approximation, par une relation simple et explicite.

La condition de criticité dans la section de contrôle a permis d'écrire que le débit unitaire qui transite dans le canal d'amenée était de la forme $q = K h_1^{3/2}$.

Le paramètre K a été défini comme étant $K = \mu \sqrt{2g}$, où μ est le coefficient de débit. Une analyse théorique rigoureuse nous a permis de définir l'expression de μ , tout en tenant compte de l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement dans le canal d'amenée. Il a été alors établi que le débit volume Q obéit à la loi :

$$Q = \frac{1}{2} \sqrt{2g} B C_M \left(\frac{1 - C_M^2}{1 - \frac{5}{4} C_M^2} \right)^{5/2} h_1^{3/2}$$

Dans cette dernière relation, le paramètre sans dimension C_M est lié à M_1 par la relation :

$$C_M = M_1 (0,0757 M_1 + 0,7372)^{5/2}$$

L'expression du débit volume montre que l'appareil est de type semi-modulaire, dépendant des caractéristiques géométriques m et B et de la profondeur h_1 de l'écoulement dans le canal d'amenée.

Dans la seconde partie de notre travail, nous exposerons d'une part le protocole expérimental ayant servi à tester l'appareil étudié et les résultats expérimentaux d'autre part. Ceux-ci ont permis de vérifier, dans une large mesure, les relations issues du développement théorique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACHOUR B. (1989). Débitmètre à ressaut en canal de section droite triangulaire sans seuil, *J. Hydraulic Research*, Vol. 27, n°2, 205-214.
- BAZIN H. (1898). *Expériences nouvelles sur l'écoulement en déversoir*, Dunod, Paris.
- BOS M.G. (1976). *Discharge measurement structures*, hydraulic laboratory, Wageningen, The Netherlands, Rapport 4, May.
- BOUSSINESQ J.M. (1877). *Théorie des eaux courantes*, Mémoires présentés par divers savants, Académie des Sciences de France, Vol. 23.
- DE COURSEY D.E., BLANCHARD B.J. (1970). Flow analysis over large triangular weir, *Proc. ASCE, J. Hydraulics Division*, Vol. 96, HY7, 1435-1454.
- HAGER W.H. (1986). *Discharge measurement structures*, Communication 1, Département de Génie Civi, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- KINDSVATER C.E., CARTER R.W. (1957). Discharge characteristics of rectangular thin-plate weirs, *Proc. ASCE, J. Hydraulics Division*, Vol. 83, HY6, 1453/1-6.
- LENZ A.T. (1943). Viscosity and surface tension effects on V-notch coefficients, *Trans. ASCE*, Vol. 108, 759-781.
- RAMPONI F. (1949). Sulle forme di imbocco dei canali e delle opere di scarico superficiali, *L'Energia Electrica*, Vol. 26, 453-460.
- REHBOCK T. (1929). Wassermessung mit scharfkantigen Ueberfaellen, *Zeitschrift VdI*, Vol. 73, 817-823.
- SARGINSON E.J. (1972). The influence of surface tension on weir flow, *J. Hydraulic Research*, Vol. 10, 431-446.
- SARGINSON E.J. (1973). The influence of surface tension on weir flow, *J. Hydraulic Research*, Vol. 11, 299-306.
- SIA (1926). *Contribution à l'étude des méthodes de jaugeages*, Bull. 18, Schw. Bureau Wasserforschung, Bern, 1926.