

DEBITMETRE SEMI MODULAIRE A SEUIL EPAIS TRIANGULAIRE

M.T. BOUZIANE, S. BOUSLAH, B. ACHOUR

Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS)
Département d'hydraulique, Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur
Université de Biskra, B.P. 145, R.P., 07000, Biskra, Algérie
Email : info@larhyss.net

RESUME

Cette étude s'intéresse à un débitmètre semi modulaire à seuil épais de forme triangulaire, inséré dans un canal d'amenée rectangulaire. Basée sur l'équation de la quantité de mouvement et sur un schéma de définition, une approche théorique est proposée en tenant compte de la réaction de la paroi amont du dispositif. Il a été alors possible d'exprimer l'expression de la loi hauteur – débit ainsi que celle du coefficient de débit sous l'influence de la vitesse d'approche de l'écoulement.

1 INTRODUCTION

Dans le domaine de l'hydraulique à surface libre, la mesure du débit écoulé par un canal est un problème couramment rencontré dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien. La connaissance du débit est requise pour la détermination de la capacité d'évacuation d'un canal donné ou pour l'établissement de la courbe synthétique de la loi hauteur-débit du canal.

Dans le cas d'un écoulement uniforme, Il est admis que le débit volume écoulé par un canal donné dépend de cinq paramètres qui sont : la profondeur de l'écoulement, la pente géométrique du canal, la rugosité absolue des parois du canal, les dimensions linéaires du canal et enfin la viscosité du liquide en écoulement. A partir de ces cinq paramètres, le calcul du débit est alors possible par l'emploi d'une des formules usuelles de l'écoulement uniforme.

Cependant, dans la pratique, plusieurs dispositifs peuvent être utilisés pour estimer le débit volume écoulé par un canal donné et qui est le même que celui qui transite par le dispositif utilisé. Parmi la grande variété des dispositifs disponibles à l'heure actuelle, il est possible de trouver celui qui répondrait le mieux aux exigences imposées par l'utilisateur et capable notamment de fournir la précision requise dans la mesure du débit recherché. Les dispositifs les plus utilisés sont soit constitués par une plaque mince de forme rectangulaire ou échancrée, soit par un seuil large dont la forme la plus répandue est rectangulaire. Leur mise en place au travers d'un écoulement provoque un exhaussement du plan d'eau amont dont le libre déversement à l'aval est obtenu par l'intermédiaire des dispositifs à paroi mince. Le plus connu d'entre eux est certainement le déversoir à échancrure triangulaire de précision suffisante aussi bien pour les faibles que pour les forts débits.

De manière générale, l'emploi des dispositifs ci-dessus mentionnés consiste à mesurer la profondeur de l'écoulement dans une section amont après leur mise en place dans le canal d'amenée. Grâce à la mesure de cette profondeur et aux caractéristiques géométriques connues du dispositif, il est alors possible d'estimer le débit volume par application de la loi hauteur-débit.

En ce qui concerne les dispositifs de mesure de débit dotés d'un seuil large, la recherche bibliographique a montré que les études effectuées à l'heure actuelle n'ont concerné que le seuil large de forme rectangulaire, dotée ou non d'une contraction latérale.

La présente étude se propose d'analyser le seuil large à échancrure de forme triangulaire doté d'une hauteur de pelle et d'en définir notamment la loi hauteur-débit. Afin de déterminer cette la loi ainsi que l'expression du coefficient de débit, une analyse théorique est proposée.

Les relations issues du développement théorique ont été soumises à un programme expérimental intense (*Bouslah, 2004*) qui nous a permis de conclure à la fiabilité et à la validité des relations proposées.

2 REVUE DE LA LITTERATURE

La mesure du débit écoulé 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.

Deux catégories d'appareils de mesure des débits peuvent être citées. La première concerne les appareils dits classiques et qui utilisent le libre déversement et ils appelés alors *déversoirs*. La seconde englobe concerne quant à elle les appareils qui s'appuient sur la capacité du ressaut hydraulique à surélever le plan de charge aval. Ils sont appelés *jaugeurs à ressaut* (Achour, 1989).

Les déversoirs utilisent le libre déversement de l'écoulement par dessus une paroi verticale placée au travers d'une section droite du canal. Ils se basent ainsi sur une contraction verticale de l'écoulement et la paroi peut présenter une échancrure de formes diverses, telles que les formes rectangulaire, triangulaire, trapézoïdale ou circulaire. Le débit écoulé 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.

Les déversoirs se caractérisent par leur géométrie simple représentée par une paroi verticale mince et dont les caractéristiques géométriques sont bien définies. Ce type de déversoir et l'un des plus anciens, puisque les premières recherches sur ce dispositif sont dues à *Poleny* au 18^{ème} siècle. Si h est la hauteur de déversement au-dessus de l'arête du déversoir, 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, est donné par la relation :

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

Dans la relation (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 $h_c = (q^2/g)^{1/3} = (2/3)H_c$, que :

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

Il est admis, en première approximation, que la charge critique H_c est équivalente à la hauteur h de déversement et il découle alors des relations (1) et (2) que :

$$\mu = \frac{1}{\sqrt{3}} \approx 0,577$$

Cependant, les observations de *Poleny* 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), obtenus sur une série de déversoirs inclinés d'un angle $-i$ par rapport à la verticale, ont permis d'écrire que :

$$\mu = 0,651 \left(1 - 0,391 \frac{i}{\pi} \right) \quad (3)$$

La relation (3) ne peut être appliquée que si $P/h \gg 1$, où P est la hauteur de pelle du déversoir.

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 :

- *Bazin* (1988)

$$\mu = 0,6075 \left(1 + \frac{0,074}{h} \right) \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{h+P} \right)^2 \right] \quad (4)$$

- *Rehbock* (1913)

$$\mu = 0,6050 \left(1 + \frac{0,0019}{h} \right) \left(1 + 0,138 \frac{h}{P} \right) \quad (5)$$

- *SIA* (1924)

$$\mu = 0,6150 \left(1 + \frac{0,001}{h} \right) \left[1 + 0,5 \left(\frac{h}{h+P} \right)^2 \right] \quad (6)$$

- *Kindsvater – Carter* (1957)

$$\mu = 0,6020 \left(1 + 0,125 \frac{h}{P} \right) \quad (7)$$

- *Sarginson* (1972-1973)

$$\mu = 0,6130 \left(1 + \frac{2,33}{W} + 0,122 \frac{h}{P} \right) \quad (8)$$

Dans la relation (8), 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.

Nous pouvons constater, l'exception de la formule de *Kindsvater-Carter*, que toutes les relations contiennent trois termes :

- Une constante dont la valeur moyenne est de l'ordre de 0,61.
- 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*.
- 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 vitesse d'approche de l'écoulement est faible.

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

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

où $h_e = h + 0,9$ (mm). La valeur 0,9 mm a été introduite pour tenir compte de 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) :

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

où 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 conforme aux normes et que la nappe liquide déversée soit complètement aérée.

Notons également la deuxième version de la formule de *Kindsvater-Carter* (1959) :

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

La relation (11) 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 $h/P < 0,25$

Le cas le plus général rencontré en pratique est le déversoir en mince paroi à contraction latérale. La largeur b de son échancrure est inférieure à la largeur B du canal rectangulaire dans lequel le dispositif est inséré. Le rapport $\beta = b/B$ est le 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:

$$\mu = 0,5780 \left(1 + 0,065\beta^2 + \frac{6,25 - 5,19\beta^2}{1000(h + 0,016)} \right) \left[1 + 0,5\beta^4 \left(\frac{h}{h+P} \right)^2 \right] \quad (12)$$

Dans la relation (12), le taux de contraction est tel que $\beta < 1$, mais doit être supérieur ou égal à 0,30, 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 :

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

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

D'autres formes d'échancrures peuvent caractériser la paroi des déversoirs, telle que la forme triangulaire. L'échancrure est opérée suivant un angle d'ouverture θ . Le dispositif est généralement utilisé pour estimer le débit écoulé par un canal rectangulaire.

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 écoulé par le canal 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 $H_c = H \approx h$. La relation (13) devient alors :

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

La relation (14) peut se mettre sous la forme :

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

où $\mu = \frac{6}{5\sqrt{5}} \cong 0,537$.

La relation (15) est due à Thomson et le déversoir triangulaire est alors 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 1 regroupe les valeurs de μ pour quelques valeurs de l'angle θ .

Tableau 1 : Valeurs du coefficient de débit μ de la relation (15), en fonction de l'angle θ (Hager, 1986)

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 1 $\mu = f(\theta)$, selon les valeurs du tableau 1. 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 $\mu = \mu$ (minimum) $\approx 0,577$ pour $\theta = 70^\circ$.

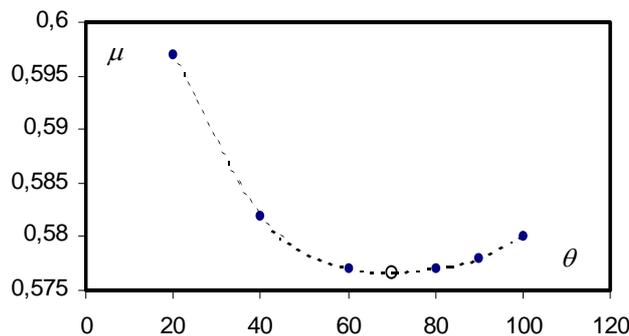


Figure 1 : $\mu = f(\theta)$ d'un déversoir triangulaire à paroi mince pour une contraction pleine.

La contraction est dite partielle lorsque :

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

La vitesse d'approche de l'écoulement et 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 échancre de 90° (Bos, 1976). La figure 2 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.

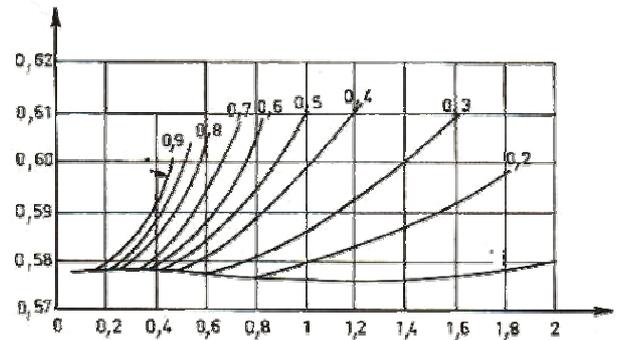


Figure 2 : Déversoir à échancre triangulaire ($\theta = 90^\circ$). Coefficient de débit μ pour une contraction partielle en fonction de h/P et P/B selon Bos (1976)

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'aménée 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'échancre 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 cet état des connaissances.

Les débits écoulés par les canaux ouverts peuvent être également mesurés au moyen de débitmètres à seuil large. Ce sont aussi des déversoirs puisque qu'ils s'appuient sur le libre déversement de la lame liquide. Il s'agit de déversoirs créant une contraction verticale de l'écoulement par la surélévation de leur fond, formant un seuil à parois épaisses. Ils sont en règle générale insérés dans un canal d'aménée de forme rectangulaire et l'écoulement s'y étend sur toute la largeur et reste en contact avec le seuil sur une certaine longueur.

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

Dans le cas d'un déversoir à seuil épais de profil en long triangulaire, quelques conditions d'utilisation doivent être respectées. Sur une longueur d'au moins $10B$, où B est la largeur du canal d'aménée, celui-ci doit être :

- rectiligne.
- de section transversale constante.
- de pente inférieure à 2%.

- de parois lisses.
- d'arête horizontale avec cependant une tolérance de 0,2%.

L'exemple d'un seuil épais de profil en long triangulaire est celui de Bazin. Les caractéristiques de l'appareil, 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 (Tableau 2) des pentes des parements amont et aval I_m et I_j :

Tableau 2 : Valeurs de pentes amont et aval du déversoir à seuil épais à profil triangulaire de type Bazin

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

Le débit écoulé se calcule par la relation :

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

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 3, en fonction de h et des pentes I_m et I_j des parements amont et aval du seuil.

Tableau 3 : 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

Un autre exemple d'un seuil épais de profil en long triangulaire est celui de *Crump*. La forme de ce déversoir est caractérisée par les pentes amont et aval de valeurs

différentes de celles du seuil à profil triangulaire de type *Bazin* que nous avons décrit précédemment et elles sont telles que $I_m = 1/2$ et $I_j = 1/5$.

Le dispositif de mesure 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 :

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

Le paramètre C_e est un coefficient sans dimension et dont la valeur est 0,626. Tandis que 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.

3 DEBITMETRE SEMI MODULAIRE A SEUIL EPAIS TRIANGULAIRE

3.1 Description de l'appareil

La figure 3 montre, en perspective, le schéma simplifié du dispositif étudié lorsqu'il est inséré dans un canal d'amenée de section rectangulaire (*Bouslah, 2004*). Ses caractéristiques y sont également indiquées, en particulier la forme triangulaire de sa section et sa hauteur de pelle P .

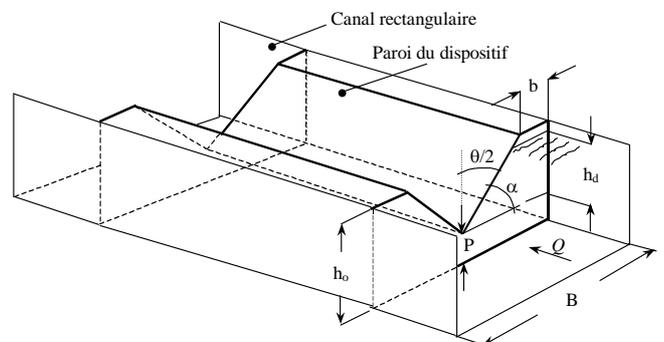


Figure 3 : Schéma en perspective du dispositif étudié placé dans un canal d'amenée rectangulaire

Les caractéristiques du dispositif sont :

h_o : la hauteur géométrique

P : la hauteur de pelle

h_d : la hauteur de déversement comptée au-dessus de la hauteur de pelle P

b : largeur de la contraction latérale du dispositif

θ : l'angle d'ouverture de la section triangulaire du dispositif

α : l'angle d'inclinaison des parois du dispositif par rapport à l'horizontale

Notons que l'angle d'ouverture maximale du dispositif s'obtient pour $b=0$. La hauteur maximale de déversement est donc :

$$h_{d,max} = (h_o - P)$$

Si $m = \cot g(\alpha) = \text{tg}(\theta/2)$, nous pouvons alors établir géométriquement que :

$$\text{tg}(\theta_{max}/2) = m = B/(2h_{d,max}) = B/[2(h_o - P)]$$

En introduisant le paramètre $M_d = mh_d/B$, il apparaît ainsi que la valeur maximale de M_d est $M_{d,max} = 1/2$. Pour les faibles valeurs de la profondeur de déversement h_d ou pour les grandes valeurs de la largeur B du canal d'amenée, nous pouvons écrire que $M_d \rightarrow 0$. Il est donc possible d'écrire, en définitif, que $0 \leq M_d \leq 1/2$.

Il est aisé de montrer que le paramètre sans dimension M_d correspond au rapport de la section triangulaire (mh_d^2) et de la section rectangulaire (Bh_d). Il s'agit donc d'un paramètre qui traduit l'effet de la contraction de la section transversale du canal d'amenée, située au-dessus de la hauteur de pelle P .

En outre, l'effet de la contraction latérale de toute la section d'amenée du canal, située à l'amont du dispositif, peut se traduire par le paramètre sans dimension :

$$\psi = mh_d^2/[B(h_d + P)]$$

soit :

$$\psi = M_d/(1 + P^*) \quad (19)$$

où $P^* = P/h_d$ est la hauteur relative de pelle. La plus faible valeur que prend le paramètre sans dimension ψ est zéro et correspond à $M_d \rightarrow 0$ ou aux grandes valeurs de la hauteur relatives de pelle P^* ($P^* \rightarrow \infty$). La valeur maximale de ψ est obtenue pour les faibles valeurs de la hauteur relative de pelle P^* ($P^* \rightarrow 0$) et pour la plus grande valeur de M_d , soit $M_{d,max} = 1/2$. Il est donc possible d'écrire, compte tenu de ces considérations, que :

$$0 \leq \psi \leq 1/2$$

3.2 Description de l'écoulement

La figure 4 montre le profil en long de l'écoulement, à la fois dans le canal d'amenée à l'amont du dispositif et à l'intérieur de celui-ci.

Le profil en long ainsi représenté a été observé expérimentalement sur l'ensemble des dispositifs testés. Notons que le profil, tel qu'il est représenté sur la figure 4, ne peut être entièrement obtenu que si la longueur géométrique X est suffisante.

L'écoulement amont dans le canal d'amenée rectangulaire est de nature fluviale et il est caractérisé par la charge totale H_d et la profondeur de déversement h_d , comptées au-dessus

de la hauteur de pelle P .

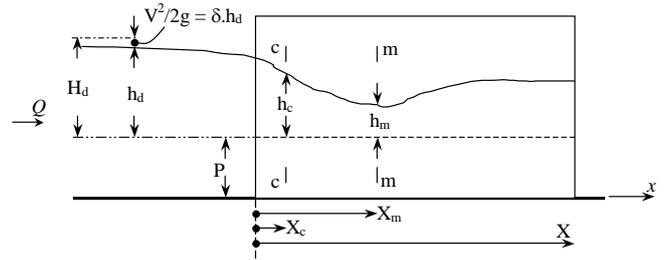


Figure 4 : Profil en long de l'écoulement dans le canal d'amenée et à l'intérieur du dispositif.

La hauteur capable de la vitesse d'approche de l'écoulement $V^2/(2g)$ est considérée comme étant égale à une fraction δ de la profondeur de déversement h_d , soit :

$$V^2/(2g) = h_d \delta$$

Ceci permet d'écrire que la charge totale est :

$$H_d = h_d + V^2/(2g) = (1 + \delta)h_d \quad (20)$$

Lorsque $\delta \rightarrow 0$, la charge totale H_d peut alors être assimilée à la profondeur de déversement h_d .

A l'intérieur du dispositif de forme triangulaire de longueur géométrique X , l'écoulement demeure fluvial sur une certaine distance. Il devient critique dans la section C-C ou section de contrôle, et se transforme en un écoulement torrentiel entre les section C-C et m-m dont la profondeur h_m est minimale.

Nous désignons par X_c la distance critique correspondant à l'apparition de la section de contrôle, tandis que X_m est la distance correspondant à la profondeur minimale h_m . Les distances X_c et X_m sont toutes les deux comptées à partir de l'entrée du dispositif.

3.3 Hauteur relative de déversement

Nous définissons la hauteur relative de déversement h_d^* comme étant le rapport entre la hauteur de déversement h_d et la profondeur critique h_c dans la section de contrôle à l'intérieur de la section triangulaire du dispositif, soit :

$$h_d^* = h_d / h_c$$

Il est à noter que la hauteur relative h_d^* est supérieure à l'unité, puisque $h_d > h_c$.

Or, la profondeur critique h_c d'un écoulement dans une section triangulaire est donnée par la relation universellement connue :

$$h_c = \left[\frac{2Q^2}{gm^2} \right]^{1/5} \quad (21)$$

où Q est le débit écoulé par le dispositif ainsi que par le canal d'amenée, g est l'accélération de la pesanteur et m a déjà été précédemment défini comme étant égal à la cotangente de l'angle d'inclinaison des parois du dispositif par rapport à l'horizontale, ou à la tangente du demi angle d'ouverture de la section triangulaire du dispositif étudié.

Dans cette partie de notre étude, nous tenterons de déterminer les paramètres dont dépend la hauteur relative de déversement h_d^* en ayant recours à l'équation de la quantité de mouvement.

L'application de cette équation repose sur le choix de deux sections et sur quelques hypothèses simplificatrices que nous allons préciser :

- Les sections choisies sont d'une part la section de l'écoulement à l'amont du dispositif, située dans le canal d'amenée et de profondeur $(h_d + P)$, et la section C-C (Figure 4) à l'intérieur du dispositif et de profondeur h_c , d'autre part.
- La pression est supposée se répartir de manière hydrostatique en toute section de l'écoulement, que ce soit dans le canal d'amenée ou à l'intérieur du dispositif.
- La répartition de la vitesse est supposée uniforme dans les sections choisies.
- La perte de charge par frottement est supposée négligeable sur la courte distance séparant les deux sections choisies.
- La résistance de l'air est négligeable.

En règle générale, les hypothèses ci-dessus mentionnées ont été confirmées dans un bon nombre de cas pratiques. Mais qu'en est-il de leur validité pour le dispositif faisant l'objet de la présente étude ? Seule l'expérimentation au laboratoire pourra répondre de manière définitive à cette question.

L'équation de la quantité de mouvement exprime que la variation de la quantité (ρQV) entre les deux sections choisies est égale à la somme de toutes les forces extérieures agissant sur ces mêmes sections, après les avoir projetées sur un axe longitudinal de sens identique à celui de l'écoulement. Rappelons que ρ désigne la masse volumique du liquide. Si :

- V_c est la vitesse moyenne critique dans la section C-C de profondeur h_c .
- V_1 est la vitesse moyenne dans une section située à l'amont du dispositif, dans le canal d'amenée.
- F_c est la force hydrostatique agissant sur la section C-C.

- F_1 est la force hydrostatique agissant sur la section à l'amont du dispositif, dans le canal d'amenée.
- F_r est la force de réaction de la face amont du dispositif.

alors l'équation de la quantité de mouvement s'écrit :

$$\rho Q(V_c - V_1) = F_1 - F_c - F_r \quad (22)$$

Etant donné le caractère supposé hydrostatique des forces mises en jeu, nous pouvons alors écrire que :

$$F_1 = \varpi \bar{h}_1 A_1, F_c = \varpi \bar{h}_c A_c, F_r = \varpi \bar{h}_r A_r$$

où $\varpi = \rho g$ désigne le poids spécifique du liquide en écoulement.

Les profondeurs \bar{h}_1 , \bar{h}_c et \bar{h}_r sont respectivement la position du centre de gravité des sections A_1 , A_c et A_r . Ces profondeurs s'expriment par :

$$\bar{h}_1 = h_1 / 2, \bar{h}_c = h_c / 3, \bar{h}_r = \frac{h_1}{6} \left(\frac{3B - 2mh_1}{B - mh_1} \right)$$

où :

$$h_1 = (h_d + P)$$

En substituant les relations précédentes dans l'équation (22), et après avoir procédé à des simplifications et à des arrangements, nous obtenons le résultat final suivant :

$$h_d^{*5} - \frac{5}{2} h_d^{*2} + \frac{3}{2} \frac{M_d}{(1 + P^*)} = 0 \quad (23)$$

ou bien :

$$h_d^{*5} - \frac{5}{2} h_d^{*2} + \frac{3}{2} \psi = 0 \quad (24)$$

Ainsi, la hauteur relative h_d^* de déversement dépend du paramètre adimensionnel M_d et de la hauteur relative de pelle P^* . Lorsque $P^* = 0$, nous retrouvons le cas particulier du dispositif dépourvu d'une hauteur de pelle ($P=0$), ayant déjà fait l'objet d'une étude antérieure (Ahour et al., 2003; Nebar, 2005). L'axe du dispositif se confond alors avec celui du canal d'amenée, ce qui confère au débitmètre un caractère autodégrevant. Mais l'égalité $P^* = 0$ peut également correspondre au cas d'un dispositif muni d'une hauteur de pelle ($P \neq 0$), fonctionnant cependant sous de fortes hauteur de déversement h_d ($h_d \rightarrow \infty$).

En pratique, les paramètres connus du problème sont :

- la hauteur de pelle P du dispositif.
- la largeur B du canal d'amenée rectangulaire.
- l'angle d'inclinaison α des parois du dispositif par rapport à l'horizontale, et par voie de conséquence $m = \cotg(\alpha)$ est également une donnée.
- la hauteur de déversement h_d , obtenue par une mesure limnimétrique.

Ainsi, compte tenu de toutes ces données, il est aisé d'estimer la valeur du paramètre adimensionnel ψ . L'équation de la quantité de mouvement, exprimée par la relation (24), permet alors la détermination de la hauteur relative de déversement h_d^* . Cependant, étant donné le caractère implicite de l'équation (24), la détermination de h_d^* ne peut se faire que par la voie graphique ou en s'aidant d'un procédé itératif. Nous avons représenté sur la figure 5 la variation de la hauteur relative h_d^* en fonction de la hauteur relative de pelle P^* , pour diverses valeurs du paramètre adimensionnel M_d et selon la relation implicite (23). Sur la même figure est représentée également la variation de la hauteur relative de déversement en fonction du paramètre sans dimension ψ , en vertu de la relation (24).

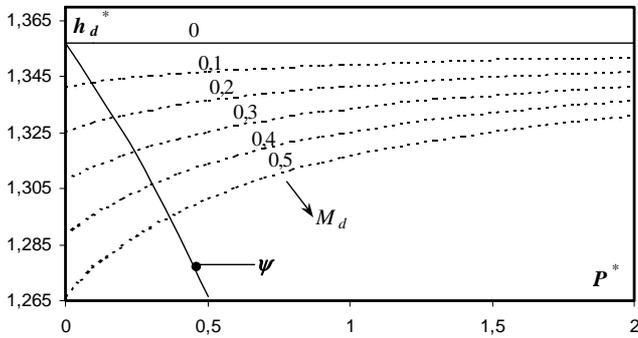


Figure 5 : Variation de la hauteur relative de déversement h_d^* en fonction de la hauteur relative de pelle P^* et du paramètre ψ selon les relations (23) et (24) respectivement.

Nous pouvons ainsi constater que, pour la même valeur du paramètre adimensionnel M_d , la hauteur relative de déversement h_d^* augmente avec l'accroissement de la hauteur relative de pelle P^* . La figure 5 montre également que, pour la même valeur de la hauteur relative de pelle P^* , la hauteur relative de déversement h_d^* diminue avec l'augmentation de la valeur du paramètre adimensionnel M_d .

Nous pouvons également constater que, pour $M_d = 0$, la hauteur relative de déversement h_d^* prend une valeur constante quelle que soit la valeur de la hauteur relative de pelle P^* . D'un point de vue physique, il est plutôt convenable d'écrire $M_d \rightarrow 0$ au lieu de $M_d = 0$.

Pour un dispositif donné, les très faibles valeurs de M_d ($M_d = mh_d / B \rightarrow 0$) correspondent soit aux faibles valeurs de la hauteur de déversement h_d , soit aux grandes valeurs de la largeur B du canal d'amenée.

La valeur $h_d^*(M_d = 0)$ est obtenue en substituant $M_d = 0$ dans l'équation (24). Il s'ensuit que :

$$h_d^{*5} - \frac{5}{2}h_d^{*2} = 0$$

d'où : $h_d^* = (5/2)^{1/3} \approx 1,3572$.

Quant à la variation de $h_d^* = f(\psi)$, la figure 5 montre que h_d^* diminue au fur et à mesure que ψ augmente. Pour les valeurs limites $\psi = 0$ et $\psi = 1/2$, le calcul montre que :

$$h_d^*(\psi = 0) = (5/2)^{1/3} \approx 1,3572$$

valeur ayant déjà été déterminée précédemment, et :

$$h_d^*(\psi = 1/2) \approx 1,2667$$

Ainsi, dans la gamme de variation $0 \leq \psi \leq 1/2$, la profondeur relative h_d^* varie dans la gamme :

$$1,2667 \leq h_d^* \leq 1,3572$$

La relation (22) est implicite vis-à-vis du paramètre h_d^* .

Afin de permettre une estimation aisée de h_d^* , nous proposons une relation approchée explicite en ayant recours à un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés non linéaires. Cette relation, obtenue avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,9997$, est :

$$h_d^{*-1} \approx 0,1004\psi^{1,0787} + 0,7368 \tag{25}$$

Les valeurs exactes de h_d^{*-1} , calculées pour diverses valeurs du paramètre ψ en application de la relation implicite (24), ont été confrontées à celles issues de l'équation approchée (25). Les écarts relatifs calculés sont représentés sur la figure 6 en fonction du paramètre ψ . L'écart relatif maximal observé est de l'ordre de 0,65% et ne s'obtient que lorsque la plus grande valeur de ψ est associée à la plus faible valeur de P^* , soit :

$$\psi = 1/2, P^* = 0$$

L'écart maximal est inférieur à 0,45% pour $\psi = 1/2$ et $P^* \geq 0,1$. Ceci permet de conclure à la fiabilité de la relation approchée (25), dont l'application a l'avantage d'être explicite.

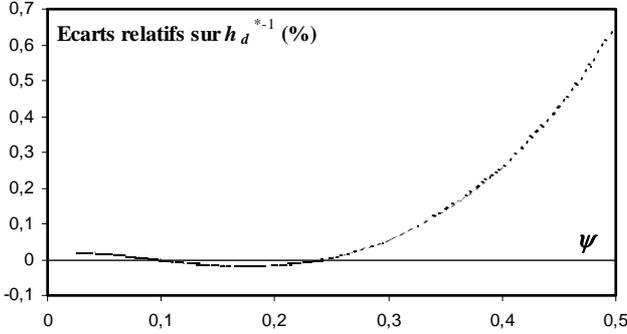


Figure 6 : Ecarts relatifs entre les valeurs exactes et approchées de $h_d^{*-1}(\psi)$.

3.4 Charge totale relative de déversement

Nous définissons la charge totale relative H_d^* de déversement, comme étant la charge totale de déversement H_d rapportée à la profondeur critique h_c de l'écoulement dans la section triangulaire du dispositif, soit :

$$H_d^* = H_d / h_c$$

Comme pour la hauteur relative de déversement h_d^* , il est intéressant de savoir quels sont les paramètres dont dépend la charge totale relative de déversement H_d^* .

Puisque la vitesse moyenne V dans le canal d'amenée rectangulaire de la largeur B s'écrit $V = Q/A$ où A est l'aire de la section mouillée qui s'exprime par $A = B(h_d + P)$, la relation (20) devient alors :

$$H_d = h_d + \frac{Q^2}{2gB^2(h_d + P)^2} \quad (26)$$

En éliminant le débit volume Q entre les relations (21) et (26), il vient que :

$$H_d = h_d + \frac{m^2 h_c^5}{4B^2(h_d + P)^2} \quad (27)$$

Nous pouvons aisément montrer que la relation (27) peut s'écrire :

$$H_d^* = h_d^* + \frac{M_d^2}{4h_d^{*4}(1 + P^*)^2} \quad (28)$$

ou bien :

$$H_d^* = h_d^* + \frac{\psi^2}{4h_d^{*4}} \quad (29)$$

Tenant compte des relations (24) et (29), il apparaît clairement que la charge totale relative de déversement H_d^* ne dépend que du paramètre ψ et par conséquent des paramètres M_d et P^* . La relation (29) montre également que lorsque $\psi \rightarrow 0$, la charge totale relative de déversement H_d^* peut être assimilée à la hauteur relative de déversement h_d^* . La relation (29) montre bien que la charge totale relative de déversement H_d^* est implicitement liée au paramètre ψ . Une relation explicite peut être cependant proposée, après avoir constaté la quasi linéarité entre H_d^* et ψ (Figure 7).

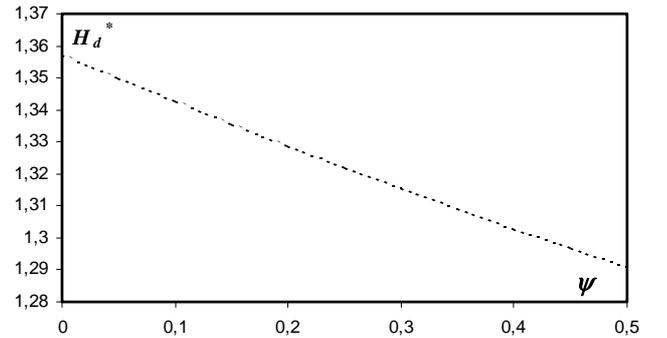


Figure 7 : Variation de $H_d^*(\psi)$, selon les relations (24) et (29)

Nous pouvons ainsi constater que la charge totale relative H_d^* diminue quasi linéairement lorsque ψ augmente dans toute la gamme $0 \leq \psi \leq 1/2$. Un ajustement, basé sur la méthode des moindres carrés linéaires, a permis d'écrire avec une excellente approximation que :

$$H_d^{*-1} \approx 0,0768\psi + 0,7368 \quad (30)$$

La relation (30) a été obtenue avec un coefficient de corrélation $R^2 = 0,9996$.

Nous avons en outre confronté les valeurs exactes et approchées de H_d^{*-1} et nous avons pu constater que les écarts relatifs sont insignifiants puisque l'écart relatif maximal est de l'ordre de 0,085%, obtenu pour la plus grande valeur du paramètre ψ , soit $\psi = 1/2$. Les écarts relatifs entre les valeurs exactes et approchées de H_d^{*-1} sont représentés sur la figure 8 en fonction de ψ .

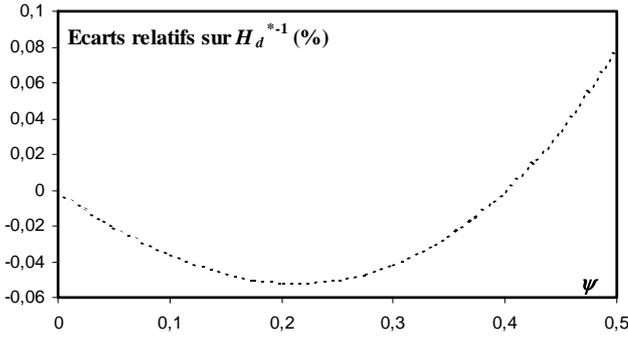


Figure 8 : Ecarts relatifs entre les valeurs exactes et approchées de $H_d^{*-1}(\psi)$.

3.5 Coefficient de débit et expression du débit

3.5.1. Vitesse d'approche de l'écoulement négligée

Nous rappelons que lorsque la vitesse d'approche de l'écoulement est négligée, la charge totale de déversement est assimilée à la hauteur de déversement, soit $H_d \approx h_d$. Cela revient à écrire que le paramètre δ , figurant dans la relation (20), est tel que $\delta \rightarrow 0$. Dans ce cas, le débit Q écoulé par le canal d'amenée s'écrit :

$$Q = \mu_o m \sqrt{2g} h_d^{5/2} \quad (31)$$

Le paramètre μ_o est le coefficient de débit du dispositif étudié, et l'indice "o" est affecté pour rappeler que $\delta \rightarrow 0$.

En éliminant le débit Q entre les relations (21) et (31), il est aisé de montrer que :

$$\mu_o h_d^{5/2} = \frac{1}{2} h_c^{5/2}$$

Cette relation peut simplement s'écrire :

$$\mu_o = \frac{1}{2h_d^{*5/2}} \quad (32)$$

Il est ainsi démontré que le coefficient de débit μ_o est exclusivement lié à la hauteur relative de déversement h_d^* , et donc au paramètre ψ tel que nous l'indique la relation (24). En éliminant h_d^* entre les relations (24) et (32), il vient que :

$$x^{-2} - \frac{5}{2}x^{-4/5} + \frac{3}{2}\psi = 0 \quad (33)$$

où : $x = 2\mu_o$.

Nous avons représenté sur la figure 9 la variation du coefficient de débit μ_o en fonction des paramètres M_d et P^* d'une part, puis en fonction du paramètre ψ d'autre part.

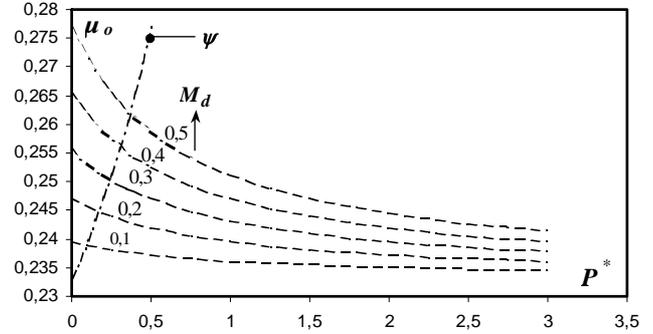


Figure 9 : Variation de $\mu_o = f(M_d, P^*)$ et de $\mu_o = \varphi(\psi)$.

La figure 9 montre que, quelle que soit la valeur du paramètre M_d , le coefficient de débit μ_o diminue au fur et à mesure que la hauteur relative de pelle P^* augmente. Il augmente cependant avec l'accroissement du paramètre ψ . Pour les grandes valeurs de P^* , la figure 9 montre que le coefficient de débit μ_o tend à devenir constant et dont la valeur dépend de celle du paramètre M_d . En outre, la relation (33) indique que :

$$\mu_o = f(M_d, P^* \rightarrow \infty) = \varphi(\psi \rightarrow 0) \approx 0,233$$

et que :

$$\mu_o = f(\psi = 1/2) \approx 0,2768.$$

Il est donc possible d'écrire que :

$$0 \leq \psi \leq 1/2, 0,2330 \leq \mu_o \leq 0,2768.$$

Etant donné le caractère implicite de la relation (33), il n'est pas aisé d'exprimer le coefficient de débit μ_o en fonction du paramètre ψ . Cependant, nous pouvons faire appel à la relation (25) dont la fiabilité a déjà été démontrée. Ainsi, en éliminant h_d^* entre les relations (25) et (32), nous pouvons écrire que :

$$\mu_o \approx \frac{1}{2} (0,1004\psi^{1,0787} + 0,7368)^{5/2} \quad (34)$$

La relation (34) permet ainsi une estimation explicite du coefficient de débit théorique μ_o .

En substituant la relation (34) dans (31), le débit Q écoulé par le canal d'aménée est :

$$Q = \frac{1}{2} (0,1004\psi^{1,0787} + 0,7368)^{5/2} m\sqrt{2g}h_d^{5/2} \quad (35)$$

3.5.2. Vitesse d'approche de l'écoulement non négligeable

Dans le cas où la vitesse d'approche de l'écoulement n'est pas négligeable ($\delta \neq 0$), le débit Q s'écrit :

$$Q = \mu_o m\sqrt{2g}H_d^{5/2} \quad (36)$$

En tenant compte de (20), la relation (36) s'écrit :

$$Q = \mu_o m\sqrt{2g}(1+\delta)^{5/2}h_d^{5/2} \quad (37)$$

Nous pouvons ainsi constater que lorsque $\delta = 0$, la relation (36) est alors reproduite. En outre, la relation (37) peut s'écrire :

$$Q = \mu m\sqrt{2g}h_d^{5/2} \quad (38)$$

où :

$$\mu = \mu_o(1+\delta)^{5/2} \quad (39)$$

Le paramètre μ représente le coefficient de débit du dispositif lorsque $\delta \neq 0$.

La relation (29) peut également se mettre sous la forme :

$$H_d^* = h_d^* \left(1 + \frac{\psi^2}{4h_d^{*5}} \right) \quad (40)$$

Il est utile d'écrire, en divisant les deux membres de la relation (20) par h_c :

$$H_d^* = (1+\delta)h_d^* \quad (41)$$

Nous ainsi déduire des relations (40) et (41) que :

$$\delta = \frac{\psi^2}{4h_d^{*5}} \quad (42)$$

En éliminant h_d^* entre les relations (32) et (42), il vient que :

$$\delta = \mu_o^2 \psi^2 \quad (43)$$

Les relations (39) et (43) permettent d'écrire que :

$$\mu = \mu_o(1+\mu_o^2\psi^2)^{5/2} \quad (44)$$

La relation (43) montre bien que, lorsque $\psi \rightarrow 0$ correspondant à $\delta \rightarrow 0$, alors $\mu \rightarrow \mu_o$. En outre, elle montre que le coefficient de débit μ ne dépend que du paramètre ψ puisque $\mu_o = \varphi(\psi)$.

Afin d'illustrer l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement sur le coefficient de débit du dispositif, nous avons calculé et représenté sur la figure 10 les écarts obtenus sur les coefficients de débit $\mu(\delta \neq 0)$ et $\mu(\delta \rightarrow 0)$. Les écarts calculés sont représentés en fonction des paramètres adimensionnels M_d et P^* .

La figure 10 montre que pour une valeur donnée de M_d , les écarts sur le coefficient de débit du dispositif diminuent au fur et à mesure que la hauteur relative de pelle P^* augmente.

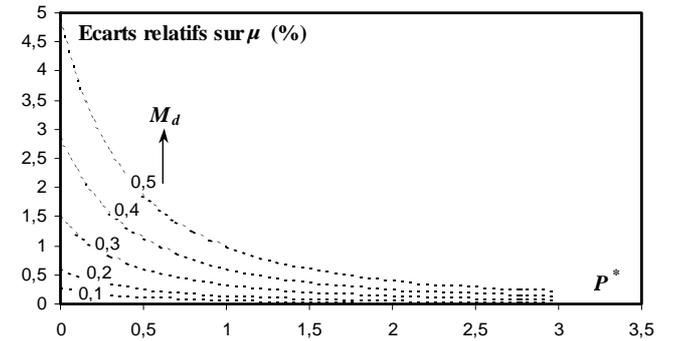


Figure 10 : Effet de la vitesse d'approche de l'écoulement sur le coefficient de débit μ .

Quelle que soit la valeur de M_d , les écarts peuvent être considérés comme étant insignifiants lorsque $P^* \rightarrow \infty$. En d'autres termes, lorsque les hauteurs de pelle P du dispositif sont nettement supérieures aux hauteurs de déversement h_d , nous pouvons écrire $\mu \approx \mu_o$. Par contre, pour les faibles valeurs de P^* , la figure 10 montre clairement que les écarts sur le coefficient de débit du dispositif augmentent au fur et à mesure que M_d croît. Lorsque le dispositif est dépourvu de hauteur de pelle, soit $P^* = 0$, les écarts peuvent atteindre environ 5% pour la plus grande valeur de M_d , soit $M_d = 1/2$.

En ce qui concerne l'expression théorique du débit écoulé par le canal, tenant compte de l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement, elle peut être obtenue en combinant les relations substituant (38) et (44), soit :

$$Q = \mu_o(1+\mu_o^2\psi^2)^{5/2} m\sqrt{2g}h_d^{5/2} \quad (45)$$

Rappelons que le coefficient de débit μ_o est donné par la relation (34).

4 CONCLUSION

L'étude a été consacrée à un débitmètre semi modulaire à seuil épais triangulaire destiné à la mesure du débit dans les canaux ouverts. Après une revue bibliographique, le débitmètre a été clairement décrit ainsi que l'écoulement qui s'y produit.

Inséré dans un canal d'amenée rectangulaire, le dispositif provoque une contraction latérale de la section du canal.

A partir d'un schéma de définition de l'écoulement et sous certaines hypothèses simplificatrices, l'équation de la quantité de mouvement a été appliquée entre une section amont du canal d'amenée et la section de contrôle à l'intérieur du dispositif, en tenant compte des forces de réaction de la section amont de celui-ci.

Une équation de cinquième ordre a été obtenue entre la hauteur relative de déversement h_d^* , la hauteur relative de pelle P^* et le paramètre adimensionnel M_d . Nous avons ainsi constaté que les paramètres mis en jeu sont : m la cotangente d'inclinaison des parois du dispositif par rapport à l'horizontale, la hauteur de déversement h_d comptée au-dessus de la hauteur de pelle P du dispositif et dont la valeur est mesurable en pratique, B la largeur du canal d'amenée rectangulaire et enfin la profondeur critique h_c de l'écoulement dans la section de contrôle.

En raison du caractère implicite de la relation obtenue, un ajustement, basé sur la méthode des moindres carrés non linéaires, a permis de proposer une excellente relation approchée. Celle-ci permet le calcul explicite de la hauteur relative de déversement h_d^* en fonction du paramètre composé $\psi = M_d / (1 + P^*)$.

Nous avons poursuivi le développement théorique par l'identification des paramètres influençant la charge totale relative de déversement que nous avons définie comme étant $H_d^* = H_d / h_c$, où H_d est la charge totale de déversement comptée au-dessus de la hauteur de pelle P du dispositif. Nous avons montré que H_d^* ne dépend que du paramètre composé ψ , et donc des variables M_d et P^* .

Après avoir montré la quasi linéarité entre H_d^{*-1} et ψ , une relation approchée a été proposée.

Au cours de la seconde partie de notre étude, nous nous sommes plus particulièrement intéressés à l'établissement des équations théoriques régissant le coefficient de débit μ du dispositif étudié. Nous avons montré que μ était étroitement lié à la hauteur relative de déversement h_d^* lorsque la vitesse d'approche de l'écoulement a été négligée, et à la charge totale relative de déversement H_d^* lorsque l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement devait être considéré.

Nous avons pu montrer que le coefficient de débit μ du dispositif étudié était dépendant des paramètres adimensionnels M_d et P^* , et les équations qui le gouvernent ont été établies. A travers une représentation graphique, nous avons montré comment l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement pouvait influencer le coefficient de débit μ , en particulier lorsque les faibles valeurs de la hauteur relative de pelle P^* sont associées aux valeurs élevées du paramètre M_d .

Enfin, tenant compte ou non de l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement, les expressions théoriques du débit Q écoulé par le canal d'amenée ont été proposées.

PRINCIPALES NOTATIONS UTILISEES

A (m)	Aire d'une section mouillée
B (m)	Largeur d'un canal rectangulaire
b (m)	Largeur d'une échancrure rectangulaire
F (N)	Force
g (m/s ²)	Accélération de la pesanteur
H (m)	Charge totale d'un écoulement
H_c (m)	Charge totale critique
H_d (m)	Charge totale de déversement
H_d^* (-)	Charge totale relative de déversement (H_d/h_c)
h (m)	Profondeur d'un écoulement
h_c (m)	Profondeur critique
h_d (m)	Hauteur de déversement
h_d^* (-)	Hauteur relative de déversement (h_d/h_c)
I (-)	Pente d'une seuil épais
P (m)	Hauteur de pelle
P^* (-)	Hauteur relative de pelle (P/h_d)
Q (m ³ /s)	Débit volume
q (m ² /s)	Débit unitaire (Q/B , Q/b)
μ (-)	Coefficient de débit
V (m/s)	Vitesse moyenne d'un écoulement
X (m)	Coordonnées longitudinale

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] ACHOUR B. (1989). Débitmètre à ressaut en canal de section droite triangulaire sans seuil, J. Hydraulic Research, Vol. 27, n°2, 205-214.
- [2] ACHOUR B., BOUZIANE M.T., NEBAR K. (2003). Débitmètre triangulaire à paroi épaisse dans un canal rectangulaire, Larhyss Journal, 2, 7-43, Juin.
- [3] BAZIN H. (1898). Expériences nouvelles sur

- l'écoulement en déversoir, Dunod, Paris.
- [4] BOS M.G. (1976). Discharge measurement structures, hydraulic laboratory, Wageningen, The Netherlands, Rapport 4, May.
- [5] BOUSSINESQ J.M. (1877). Théorie des eaux courantes, Mémoires présentés par divers savants, Académie des Sciences de France, Vol. 23.
- [6] BOUSLAH S. (2004). Débitmètre triangulaire à paroi épaisse muni d'une hauteur de pelle dans un canal rectangulaire, Séminaire National su l'Eau, Université d'Annaba, 28-29 Novembre.
- [7] DE COURSEY D.E., BLANCHARD B.J. (1970). Flow analysis over large triangular weir, Proc. ASCE, J. Hydraulics Division, Vol. 96, HY7, 1435-1454.
- [8] HAGER W.H. (1986). Discharge measurement structures, Communication 1, Département de Génie Civil, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.
- [9] 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.
- [10] LENZ A.T. (1943). Viscosity and surface tension effects on V-notch coefficients, Trans. ASCE, Vol. 108, 759-781.
- [11] NEBAR K. (2005). Débitmètre semi modulaire épais de forme triangulaire à fond plat, Mémoire de Magister en Sciences Hydrauliques, Département d'hydraulique, Université de Biskra, Juillet.
- [12] RAMPONI F. (1949). Sulle forme di imbocco dei canali e delle opere di scarico superficiali, L'Energia Electrica, Vol. 26, 453-460.
- [13] REHBOCK T. (1929). Wassermessung mit scharfkantigen Ueberfaellen, Zeitschrift VdI, Vol. 73, 817-823.
- [14] SARGINSON E.J. (1972). The influence of surface tension on weir flow, J. Hydraulic Research, Vol. 10, 431-446.
- [15] SARGINSON E.J. (1973). The influence of surface tension on weir flow, J. Hydraulic Research, Vol. 11, 299-306.
- [16] SIA (1926). Contribution à l'étude des méthodes de jaugeages, Bull. 18, Schw. Bureau Wasserfoschung, Bern, 1926.