

République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique  
UNIVERSITE MOHAMED KHIDER –BISKRA–  
Faculté des Sciences et des Sciences de l'Ingénieur

Département d'Hydraulique

N°d'ordre :.....  
Série :.....

*Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface*  
*(LARHYSS)*

## **MEMOIRE DE MAGISTER EN HYDRAULIQUE**

*Option : Sciences Hydrauliques*

Présenté par

**Said KECHIDA**

Ingénieur d'Etat en Hydraulique

### **THEME**

## **ANALYSES THEORIQUE ET EXPERIMENTALE D'UN ECOULEMENT FRANCHISSANT UN SEUIL LARGE RECTANGULAIRE**

Soutenu le :...../...../2005

Devant le jury :

Président : DJABRI A.	Professeur	Univ. Annaba
Examineur : DEBABECHE M.	Maître de conférence	Univ. Biskra
Examineur : MOUMI A.	Docteur	Univ. Biskra
Rapporteur : B. ACHOUR	Professeur	Univ. Biskra

## **REMERCIEMENTS**

Ce travail a été réalisé au Département d'Hydraulique de l'Université de Biskra, dans le Laboratoire de Recherche en Hydraulique Souterraine et de Surface (LARHYSS), dirigé par Monsieur le professeur B. ACHOUR ; qu'il soit ici vivement remercié pour les encouragements et l'assistance qu'il n'a cessés de me prodiguer.

J'exprime mes plus vifs remerciements à Messieurs les Membres de la Commission d'Examen, qui ont accepté d'examiner mon mémoire.

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui m'ont permis de réaliser cette recherche et m'ont fait bénéficier de leur aide, conseils et encouragements, et en particulier :

- Monsieur T. BOUZIANE, le chef de Département d'hydraulique.
- Mes amis et collègues du laboratoire LARHYSS.

## RÉSUMÉ

La mesure du débit dans canaux ouverts est souvent rencontrée dans la pratique de l'ingénieur hydraulicien. Après avoir procédé à une large prospection bibliographique, nous avons porté notre choix sur un dispositif de mesure du débit dans les canaux ouverts composé d'un seuil épais contracté de forme rectangulaire. Le premier objectif visé par notre étude a été d'établir la relation de la loi hauteur-débit, ainsi que celle du coefficient de débit du dispositif choisi. Le second objectif de notre étude a été la vérification expérimentale des relations ci-dessus mentionnées.

---

---

## ABSTRACT

The discharge measurement in open channels is usually meted in hydraulic engineer's practice. After we have proceeded to a large bibliographical prospecting, we have chosen a device with rectangular shape, and which has a lateral contraction equipped with a heave of water. The first objective of our study is to establish the relationships depth-discharge and discharge coefficient. The second objective of our study is the experimental verification of theoretical relationships which are mentioned above.

---

---

## ملخص

إن قياس التدفق في القنوات المكشوفة غالبا ما يتعرض لها مهندس الري في الميدان التطبيقي. بعد أن قمنا باستعراض أهم الأعمال التي قام بها الباحثون آنفا في هذا المجال، وقع اختيارنا لنوع جديد من الهدارات ذو عتبة سميكة مستطيلة الشكل مقلصة الجانبين. الهدف الأول من خلال هذه الدراسة هو إنشاء العلاقات ارتفاع-تدفق وكذلك معامل التدفق. أما الهدف الثاني فيتمثل في التحقق المخبري لمدى صحة العلاقات النظرية المذكورة أعلاه.

# SOMMAIRE

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
<b>CHAPITRE I</b>	
<b>ÉTAT DE CONNAISSANCE SUR LA MESURE DES DÉBITS DANS LES CANAUX OUVERTS</b>	
I.1. Introduction .....	2
I.2. Déversoirs a seuil épais .....	2
I.2.1. Déversoir rectangulaire à seuil épais .....	2
I.2.2. Déversoir standard.....	7
I.2.3. Déversoir à seuil épais à profil en long triangulaire .....	9
I.2.3.1. Déversoir à seuil épais à profil en long triangulaire type Bazin .....	10
I.2.3.2. Déversoir à seuil épais à profil en long triangulaire type Crump.....	11
I.3. Jaugeurs a ressaut .....	12
I.3.1. Définition.....	12
I.3.2. Canal jaugeur de type Parshall .....	14
I.3.2.1. Caractéristiques et expression du débit .....	14
I.3.2.2. Formule pratique de débit.....	16
I.3.3. Canal jaugeur Venturi à fond plat –Caractéristiques géométriques et expression du débit .....	17
I.3.4. Jaugeur en canal triangulaire de type Achour.....	18
I.3.4.1. présentation du dispositif.....	18
I.3.4.2. Etude théorique de l'appareil et expression du débit.....	19
I.4. Conclusion .....	23
<b>CHAPITRE II</b>	
<b>ÉTUDE THÉORIQUE DU DISPOSITIF</b>	
II.1. Introduction .....	26
II.2. Géométrie du dispositif et paramètres adimensionnels.....	26
II.3. Description de l'écoulement .....	27
II.4. Hauteur relative de déversement.....	29
II.4.1. Définition.....	29
II.4.2. Expression de la hauteur relative de déversement.....	29
II.5. Charge totale relative de déversement.....	32

<i>II.5.1. Définition</i> .....	32
<i>II.5.2. Expression de la charge relative de déversement</i> .....	32
II.6. Expression du facteur cinétique.....	35
II.7. Coefficient de débit du dispositif et expression du débit.....	36
<i>II.7.1. Vitesse d'approche de l'écoulement négligée</i> .....	36
<i>Exemple d'application 1</i> .....	36
<i>Solution</i> .....	37
<i>II.7.2. Vitesse d'approche de l'écoulement non négligée</i> .....	38
<i>Exemple d'application 2</i> .....	43
<i>Solution</i> .....	44
II.7. Conclusion .....	44

**CHAPITRE III**  
**VALIDATION EXPÉRIMENTALE**

III.1. Introduction .....	46
III.2. Description du banc d'essai.....	46
III.3. Description et caractéristiques des dispositifs testés.....	49
III.4. Description de l'écoulement.....	52
III.5. Appareillage de mesure.....	54
<i>III.5.1. Mesure de la profondeur</i> .....	54
<i>III.5.2. Mesure du débit <math>Q</math></i> .....	56
III.6. Procédure expérimentale.....	57
III.7. Résultats expérimentaux.....	59
III.8. Validations des expressions théoriques.....	66
<i>III.8.1. Hauteur relative de déversement</i> .....	66
<i>III.8.2. Charge totale relative de déversement</i> .....	70
<i>III.8.3. Coefficient et expression de débit</i> .....	70
III.9. Conclusion.....	74
CONCLUSION GENERALE.....	75
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	79

## INTRODUCTION GENERALE

Les appareils de mesure de débit dans les canaux ouverts sont nombreux, ils présentent tous une loi *hauteur – débit* unique. La hauteur correspond à la profondeur de la lame liquide déversée, mesurée à l'amont du dispositif considéré. Le débit est non seulement fonction de cette hauteur, mais il est également dépendant des caractéristiques géométriques de l'appareil de mesure utilisé. Tout appareil de mesure de débit qui dépend à la fois de ses caractéristiques géométriques et de la hauteur déversée est appelé " appareil semi-modulaire" (Achour, 1989).

Parmi les appareils de mesure de débit existants, nous pouvons distinguer ceux utilisant le libre déversement de la lame liquide et ceux utilisant la particularité d'un ressaut hydraulique à surélever le plan de charge amont. La première catégorie est la plus largement répandue et l'on peut citer, à titre d'exemple, le déversoir rectangulaire avec ou sans contraction latérale (Bazin, 1898). L'un des inconvénients de cette première catégorie d'appareils est qu'ils sont souvent dotés d'un seuil, appelé pelle, entraînant des dépôts solides qui s'y accumulent. En outre, la charge amont n'est plus restituée à l'aval, puisque ces appareils utilisent un libre déversement de la lame liquide.

Les inconvénients ci-dessus indiqués sont par contre éliminés lorsque l'on utilise la seconde catégorie d'appareils, c'est à dire ceux qui se basent sur la formation d'un ressaut hydraulique. L'un des plus connus est certainement le *Parshall*.

En règle générale, le développement des connaissances sur les appareils de mesure des débits n'a pu être obtenu que grâce aux essais au laboratoire. Il s'agit de déterminer la relation dite "débit-hauteur" et d'exprimer le coefficient de débit des appareils testés. Pour un même type d'appareil, nous pouvons rencontrer, dans la bibliographie, diverses formules du coefficient de débit. Mais toutes ces formules mènent le plus souvent au même résultat.

Cependant, l'application de ces formules doit se faire avec précaution lorsque l'on utilise un type donné d'appareil. Ces formules imposent en effet que la géométrie de celui-ci soit bien respectée avec une tolérance souvent contraignante. Ce sont donc des contraintes géométriques qui peuvent engendrer, lorsqu'elles ne sont pas strictement respectées, des erreurs considérables sur l'évaluation du coefficient de débit et par conséquent sur l'estimation du débit.

Dans notre étude, nous proposons de tester un dispositif de mesure des débits dans les canaux ouverts. Il s'agit de tester un appareil simple appartenant à la catégorie des appareils semi-modulaires, constitués d'un large seuil contracté.

Il s'agit donc de proposer la formule de débit et celle du coefficient de débit qui caractérise ce dispositif.

## CHAPITRE I

# ÉTAT DES CONNAISSANCES SUR LA MESURE DES DÉBITS DANS LES CANAUX OUVERTS

### I.1. Introduction

Le débit est l'un des paramètres hydrauliques caractérisant les écoulements des liquides dans les canaux et conduites, dont l'ingénieur hydraulicien est ramené à le mesurer. Dans la pratique de l'ingénieur, les moyens de mesure des débits sont nombreux et chacun d'entre eux présente ses propres particularités, ses avantages et ses inconvénients. Suivant que la nature d'écoulement est en charge ou à surface libre, les moyens de mesure se diffèrent.

Dans cette recherche, la première partie s'intéresse à la mesure de débit des écoulements à surface libre et plus particulièrement aux appareils de mesure de débit présentant une épaisseur du seuil plus ou moins grande. Ces appareils seront définis et schématiquement décrits en mettant l'accent sur les plus importantes formules et leurs domaines d'application. 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. Déversoirs A Seuil Epais

Le principe de jaugeage par déversoir consiste à déduire le débit d'un écoulement à surface libre de l'épaisseur de la lame d'eau s'écoulant au-dessus d'un déversoir placé en travers de cet écoulement.

Ces déversoirs se présentent avec des géométries simples, le plus souvent un profil en travers rectangulaire.

#### I.2.1. Déversoir rectangulaire à seuil épais

Ce type de déversoir se présente comme un canal de faible longueur, de section rectangulaire inférieure à celle du canal dans lequel il est inséré et avec une pente longitudinale nulle, La figure 1.1 représente un écoulement par-dessus un déversoir à paroi épaisse de forme rectangulaire.

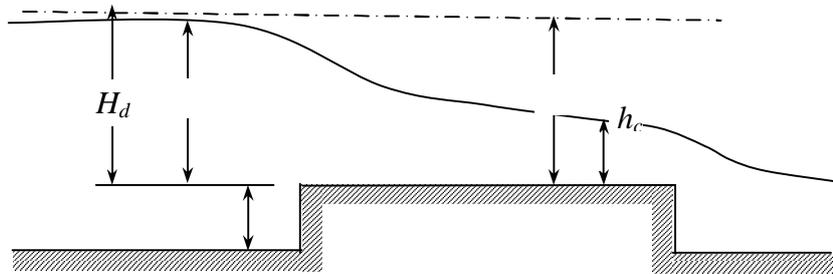


Figure 1.1 : Déversoir à seuil épais –Schéma de définition

Après la mise en place du seuil, l'écoulement sera fluvial à l'amont dans le canal d'amenée. Dans le cas où l'écoulement serait dénoyé, il s'établit un écoulement critique de profondeur  $h_c$  sur le seuil au voisinage de l'arête aval.

La condition de criticité s'écrit :

$$h_c = \sqrt[3]{\frac{q^2}{g}}$$

Dans la relation précédente,  $q$  représente le débit unitaire ( $q=Q/B$ ) et  $g$  représente l'accélération de la pesanteur.

La charge totale critique sur le seuil est :

$$H_c = h_c + \frac{q^2}{2g h_c^2}$$

Tenant compte de la condition de criticité, la charge totale critique sur le seuil s'écrit :

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

En admettant que la hauteur représentative de la vitesse d'approche ( $V^2/2g$ ) est négligeable, on peut mettre  $H_d = h_d$ .

Où  $H_d$  représente la charge totale de déversement de l'écoulement dans le canal d'amenée,  $h_d$  est la profondeur de déversement à l'amont du seuil.

Enfin, en négligeant la perte de charge au passage sur le seuil du déversoir, on peut écrire :

$$H_d = h_d = H_c = (3/2)h_c.$$

Tenant compte de la condition de criticité et que  $h_c = (2/3)h_d$ , le débit unitaire écoulé par-dessus du seuil s'écrit :

$$q = \frac{2}{3\sqrt{3}} \sqrt{2g} h_d^{3/2} \tag{1.1}$$

En réalité, la formule exacte du débit est un peu différente de celle théorique (1.1)

Le débit exact est donné par la formule suivante :

$$q = \mu \sqrt{2g} h_d^{3/2} \quad (1.2)$$

Le paramètre  $\mu$  de la relation (1.2) représente le coefficient de débit.

Les expériences démontrent que les résistances apparaissent en amont du déversoir dépendent essentiellement de la forme de la crête, de la hauteur relative de pelle ( $P/h_d$ ) et de sa rugosité et de la contraction latérale ( $b/B$ ). Le tableau 1.1 présente quelques valeurs du coefficient de débit  $\mu$  en fonction du rapport ( $P/h_d$ ) et en fonction de la forme de l'arête amont du déversoir à seuil épais sans contraction latérale. Tandis que le tableau 1.2 donne quelques valeurs du coefficient du débit  $\mu$  pour des déversoirs à seuil épais sans hauteur de pelle, et avec contraction latérale et pour différentes formes de l'entrée.

Tableau 1.1 : Coefficient de débit  $\mu$  pour différentes formes de l'entrée du déversoir rectangulaire à seuil épais sans contraction latérale.

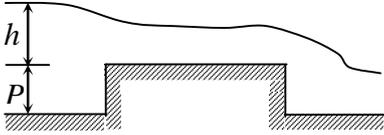
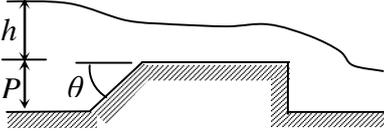
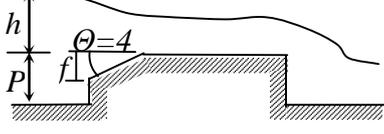
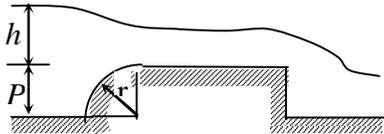
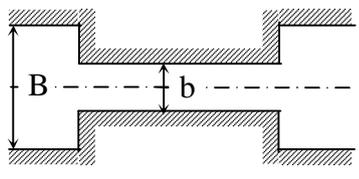
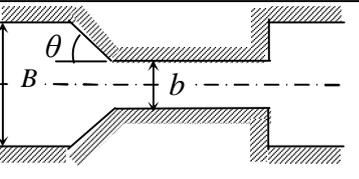
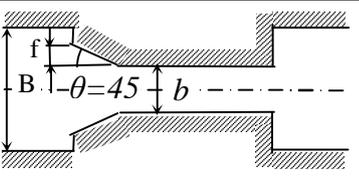
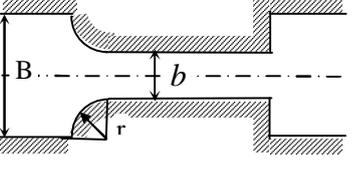
Forme du déversoir			$P/h_d$									
			0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	2,0	4,0	6,0	$\infty$
			0,385	0,366	0,356	0,350	0,345	0,342	0,333	0,327	0,325	0,320
	$\text{Cotg } \theta$	0,5	0,385	0,372	0,365	0,361	0,357	0,355	0,349	0,345	0,344	0,340
1,0		0,385	0,377	0,373	0,370	0,368	0,367	0,363	0,361	0,360	0,358	
1,5		0,385	0,380	0,377	0,376	0,375	0,374	0,371	0,370	0,369	0,368	
$\geq 2,5$		0,385	0,382	0,381	0,380	0,379	0,378	0,377	0,376	0,376	0,375	
	$f/h_d$	0,025	0,385	0,372	0,365	0,361	0,357	0,355	0,349	0,346	0,344	0,340
0,05		0,385	0,374	0,368	0,364	0,361	0,359	0,353	0,350	0,349	0,346	
$\geq 0,2$		0,385	0,377	0,374	0,370	0,368	0,366	0,362	0,360	0,359	0,357	
	$r/h_d$	0,025	0,385	0,372	0,365	0,361	0,357	0,355	0,349	0,346	0,344	0,340
0,05		0,385	0,374	0,368	0,364	0,361	0,359	0,354	0,359	0,349	0,346	
0,2		0,385	0,377	0,374	0,370	0,368	0,366	0,363	0,360	0,359	0,357	
0,6		0,385	0,380	0,377	0,376	0,375	0,374	0,371	0,370	0,369	0,368	
$\geq 1$		0,385	0,382	0,381	0,380	0,379	0,378	0,377	0,376	0,376	0,375	

Tableau 1.2 : coefficient de débit pour différentes formes de l'entrée du déversoir rectangulaire avec contraction latérale, sans hauteur de pelle.

Forme de l'entrée en plan			$b/B$						
			1,0	0,9	0,8	0,6	0,4	0,2	0
			0,385	0,367	0,355	0,340	0,330	0,324	0,320
	$Cotg \theta$	0,5	0,385	0,373	0,365	0,356	0,350	0,346	0,343
		1,0-3,0	0,385	0,375	0,369	0,361	0,356	0,352	0,350
	$f/h$	0,05	0,385	0,371	0,362	0,350	0,343	0,338	0,345
		$\geq 0,2$	0,385	0,375	0,368	0,360	0,355	0,351	0,349
	$r/h$	0,05	0,385	0,371	0,362	0,350	0,343	0,338	0,335
		0,20	0,385	0,375	0,368	0,360	0,355	0,351	0,349
		$\geq 0,30$	0,385	0,378	0,373	0,368	0,364	0,362	0,360

Dans le cas des déversoirs à seuil épais présentant à la fois une contraction latérale et une hauteur de pelle, le coefficient de débit est calculé en multipliant les valeurs du tableau 1.1 par le coefficient de la contraction latérale ( $b/B$ ).

V. Smyslov a proposé les formules approximatives ci-après pour ces types de déversoirs pour les différentes formes de la crête d'entrée :

- Entrée non arrondie

$$\mu = 0,30 + 0,08 \frac{b h_d}{B(h_d + P)} \quad (1.3)$$

- Entrée avec cônes

$$\mu = 0,30 + \frac{0,08}{1 + 2 \cot g \theta \frac{h_d}{b}} \quad (1.4)$$

Dans la formule précédente  $\theta$  représente l'angle d'écartement des talus du cône.

- Entrée arrondie en plan raccordée d'après le tube d'évasement

$$\mu = 0,35 \text{ à } 0,36$$

Les expériences de *Bazin* (1898) sur les déversoirs à seuil épais sans contraction latérale ont donné des valeurs du coefficient du débit  $\mu$  compris entre 0,37 et 0,39.

Plusieurs autres chercheurs et organisations (Blackwell, U.S. Deep, Water Ways Board et U.S. Geological Survy) ont pu démontrer que pour des charges de (0,06m à 1,5m) et des longueurs du seuil comprises entre 0,15m et 4,5m, le coefficient de débit est compris entre 0,329 et 0,414.

### 1.2.2. Déversoir standard

Les études sur ce type de déversoir ont commencé au début du 20<sup>ème</sup> siècle au remplacement du déversoir à seuil épais à profil en long trapézoïdal. Ce dernier a présenté plusieurs inconvénients, dont le coefficient de débit était faible à cause des sous-pressions sur la crête amont du déversoir.

La géométrie du déversoir standard est identique à celle de la nappe inférieure d'un écoulement au-dessus un déversoir en mince paroi pour une charge amont fixe. Afin d'éviter les sous-pressions le long du radier.

La figure 1.2 représente la géométrie d'un déversoir standard.

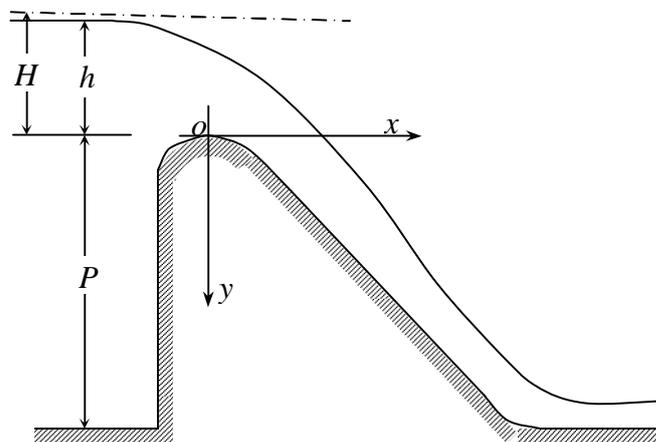


Figure 1.2 : déversoir standard -schéma de définition

Le profil réalisé par la nappe écoulee au-dessus d'un déversoir en mince paroi est donc le profil type pour lequel la pression sur le radier du déversoir a seuil normal est la pression atmosphérique.

*Scimemi* a donné pour le quadrant aval de ce profil l'équation ci-dessus :

$$\frac{y}{H} = 0,5 \left( \frac{x}{H} \right)^{1,85} \quad (1.5)$$

L'ingénieur Américain *Creager* à préconiser un profil légèrement au-dessus du profil type de la nappe libre, l'équation (1.6) donne le profil *Creager*.

$$\frac{y}{H} = 0,47 \left( \frac{x}{H} \right)^{1,8} \quad (1.6)$$

Le profil *Creager* correspond à un coefficient de sécurité de 10% par-rapport à la charge.

La figure 1.3 représente la proposition du « United States Army, Corps of Engineers » (USCE) pour le parement amont vertical et pour une charge amont égale à l'unité, cette courbe se compose de trois arcs circulaires au quadrant amont ( $X \leq 0$ ).

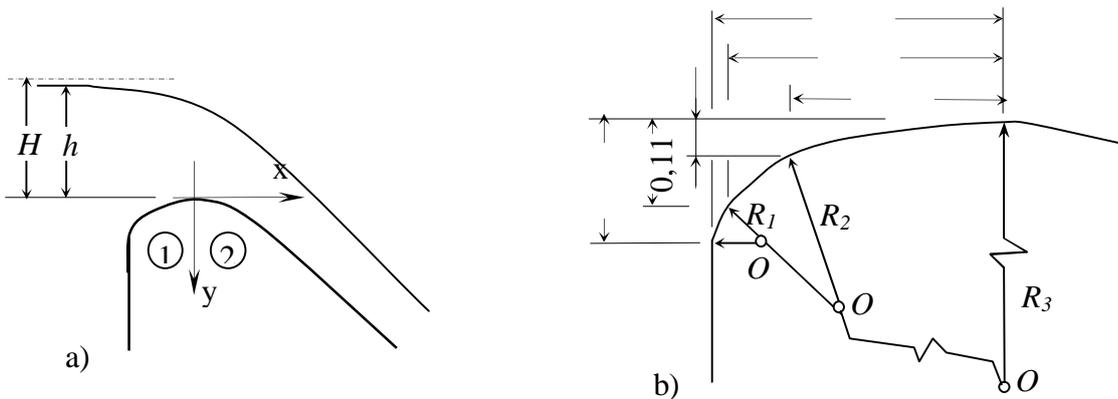


Figure 1.3 : géométrie de la crête du déversoir standard à parement amont vertical, a) définition du système des coordonnées, ① quadrant amont, ② quadrant aval, b) détail du quadrant amont

Le tableau 1.3 donne les positions des origines des arcs circulaires et les rayons correspondants.

Tableau 1.3 : Origines  $O$ , rayons de courbure  $R$  et domaines de validité relatifs à  $H$  du déversoir standard (quadrant amont).

i	$O_i/H$	$R_i/H$	
1	(-0,2418/0,1360)	0,04	$-0,2818 \leq x \leq -0,276$
2	(-0,1050/0,2190)	0,20	$-0,276 \leq x \leq -0,175$
3	(0/0,5000)	0,50	$-0,175 \leq x \leq 0$

Le débit dans le déversoir standard est déterminé par la formule générale des déversoirs rectangulaires donnée par la relation (1.2).

### 1.2.3. Déversoir à seuil épais à profil en long triangulaire

Il s'agit d'un déversoir créant une contraction graduelle verticale de l'écoulement par sa surélévation en formant un seuil dit « seuil épais » (figure 1.4). Il est en général inséré dans un canal de forme rectangulaire et l'écoulement s'y étant sur toute la largeur et reste en contact avec le seuil sur une certaine longueur.

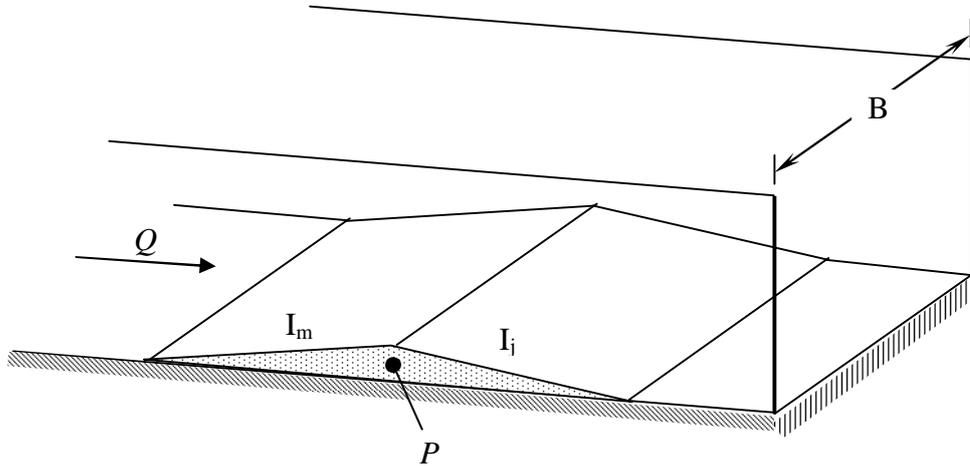


Figure 4 : Représentation schématique du déversoir en mince paroi à profil en long triangulaire

Le débit est donné après étalonnage de l'appareil par la 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%.

#### 1.2.3.1. Déversoir à seuil épais à profil en long triangulaire type Bazin

Les caractéristiques de l'appareil, basé sur une contraction verticale telle que représentée par la figure 1.4, 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 1.4 : Valeurs des pentes amont et aval du déversoir à seuil épais à profil en long 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 :

$$Q = \mu B \sqrt{2g} h^{3/2} \quad (1.7)$$

Rappelons que  $\mu$  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 qui 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 :

$$Q = K B h^{3/2} \quad (1.8)$$

Où  $K = \mu \sqrt{2g}$ . Dans la relation (1.8), 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 1.5, en fonction de  $h$  et des pentes  $I_m$  et  $I_j$  des parements amont et aval du seuil.

Tableau 1.5 : Valeurs du paramètre  $K$  de la relation (1.8) en fonction de  $h$ ,  $I_m$  et  $I_j$

$h$ (cm)	$I_m=1/1$ $I_j=1/1$	$I_m=1/1$ $I_j=1/2$	$I_m=1/1$ $I_j=1/3$	$I_m=1/2$ $I_j=1/2$
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
14	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	0,020217	0,0213	0,0192	0,0213
45	0,0207	0,0212	0,0191	0,0213

### 1.2.3.2. Déversoir à seuil épais à profil en long 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 1.5 représente schématiquement ce déversoir.

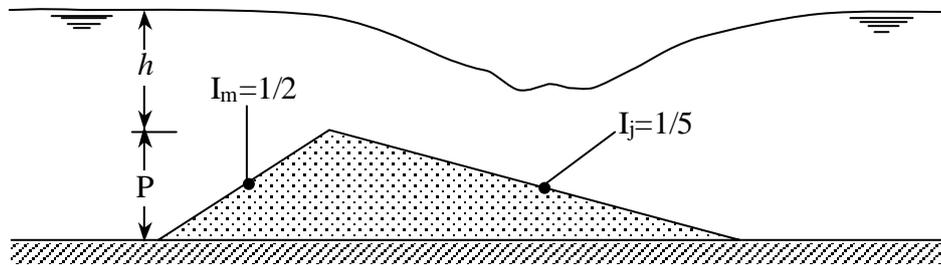


Figure 1.5 : Déversoir à seuil épais à profil triangulaire de type *Crump*.

### Représentation schématique de l'écoulement

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

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

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

$$Q = C_e C_v \sqrt{g} B h^{3/2} \quad (1.9)$$

- $C_e$  est un coefficient sans dimension et dont la valeur est 0,0626.
- $C_v$  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  $h$  est 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. 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 1.6 quelques types de géométries de jaugeurs en canal rectangulaire.

Sur la figure 1.6.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 1.6.b, le canal jaugeur est caractérisé par une surélévation du fond qui se traduit par un seuil déversant dans la section minimale contractée. En fin, sur la figure 1.6.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 sont horizontaux, tandis que le tronçon intermédiaire est légèrement incliné.

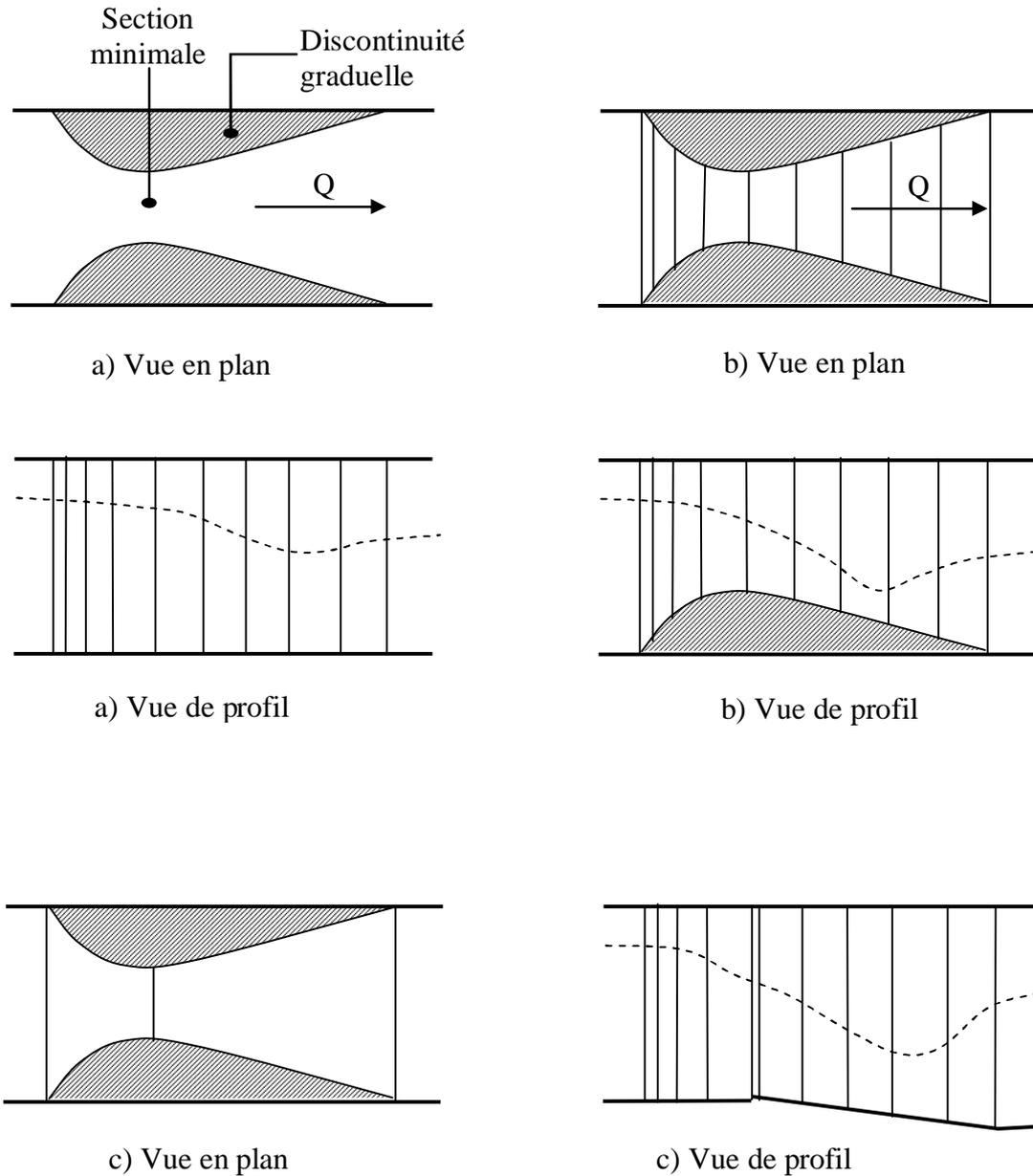


Figure 1.6 : Géométries typiques des jaugeurs (*Hager, 1986*).  
 a) Fond horizontal du canal jaugeur, b) Fond à seuil, c) Fond en pente  
 (----) profil en long de l'écoulement avec formation d'un ressaut à l'aval

La section contractée est localisée à la limite des deux premiers tronçons.

La géométrie présentée par la figure 1.6.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 1.6.b.

Ces types de jaugeurs sont dits à ressaut car ils provoquent dans leurs parties 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.

### 1.3.2. Canal jaugeur de type Parshall

#### 1.3.2.1. Caractéristiques et expression du débit

Les jaugeurs présentant des rétrécissements et des élargissements de la 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 1.7.

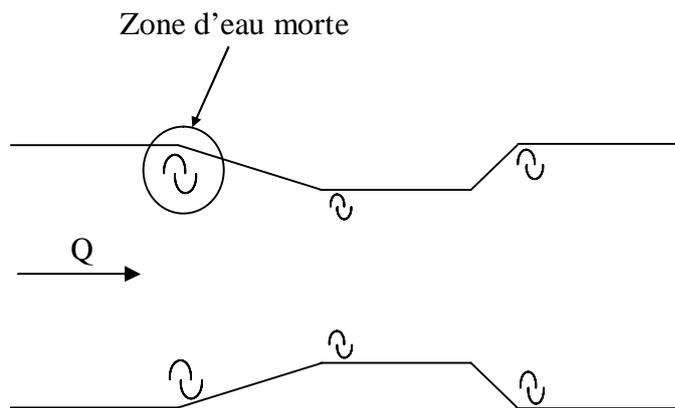


Figure 1.7 : Vue en plan d'un canal jaugeur de section rectangulaire avec apparition des zones d'eau morte

L'appareil dit jaugeur *Parshall* est un dispositif dont la géométrie s'appuie sur le principe schématiquement décrit sur la figure 1.7. 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 1.8.

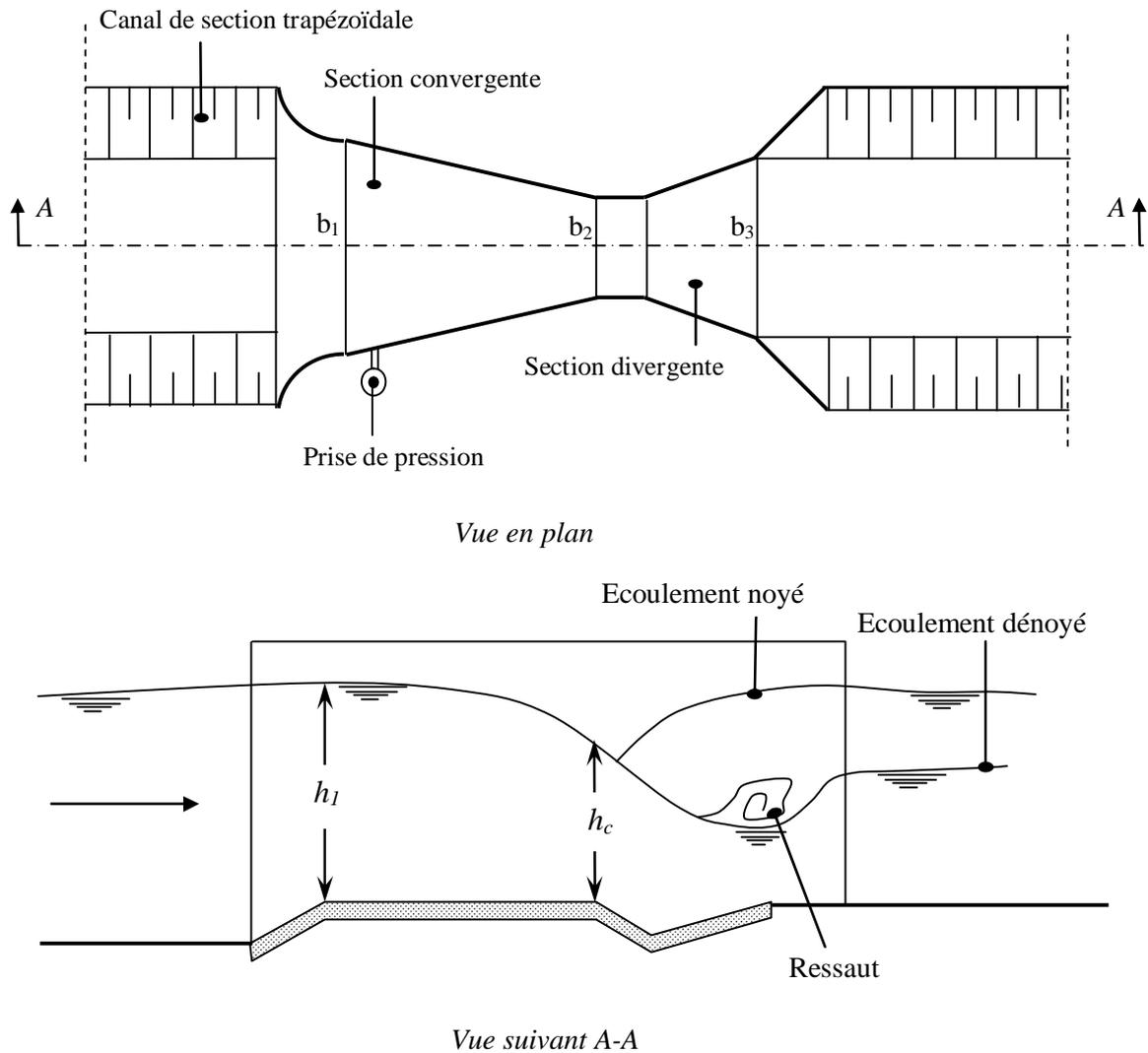


Figure 1.8 : Jaugeur de *Parshall* –Représentation schématique en plan et de profil.

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 1.8), la charge totale est, en considérant le coefficient de Coriolis égal à l'unité :

$$H_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (1.10)$$

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 :

$$h_c = \frac{2}{3}h_1 \quad (1.11)$$

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

$$Q = \sqrt{g} b_2 h_c^{3/2} \quad (1.12)$$

En tenant compte de (1.11), la relation (1.12) devient :

$$Q = 1,704 b_2 h_1^{3/2} \quad (1.13)$$

Tenant compte des approximations effectuées lors de l'établissement de la relation (1.13) celle-ci est affectée d'un coefficient de correction  $C$  légèrement inférieur à l'unité et l'on peut alors écrire :

$$Q = 1,704 C b_2 h_1^{3/2} \quad (1.14)$$

### 1.3.2.2. Formule pratique de débit

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

$$Q = 372 b_2 h_1^x \quad (1.15)$$

Dans la relation 1.15 :

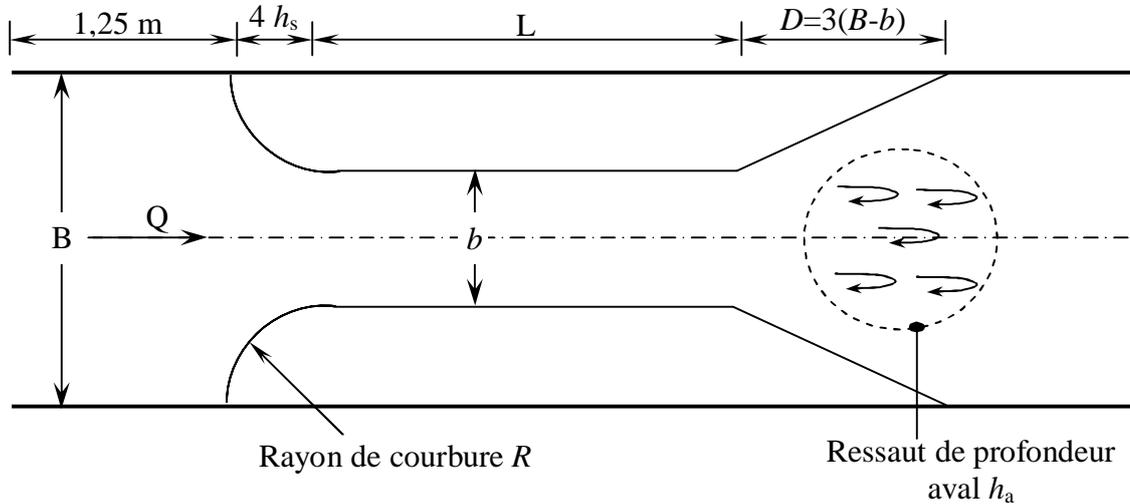
- $Q$  est en litre par seconde.
- $b_2$  est exprimé en mètre et généralement compris entre  $b_1/3$  et  $b_1/2$ .
- $h_1$  est mesuré en mètre à  $2/3$  de la distance séparant l'entrée de la section convergente et celle du col.
- L'exposant  $x$  est fonction de la largeur du col  $b_2$  et dont les valeurs sont consignées dans le tableau 1.6.

Tableau 1.6 : valeurs de l'exposant  $x$  de la relation (1.15) 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

### 1.3.3. Canal jaugeur Venturi à fond plat –Caractéristiques géométriques et expression du débit

La figure 1.9 montre une représentation schématique en plan de ce dispositif ainsi que ses principales caractéristiques.



**Figure 1.9 : Canal jaugeur venturi à fond plat – Caractéristiques**

Comme le montre la figure 1.9, 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  $(1,25\text{ m} + 4 h_s)$ , 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  $L \geq 1,5 h_s$ . 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 2mm.

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

$$Q = \left(\frac{2}{3}\right)^{3/2} \sqrt{g} C_e C_v b h^{3/2} \quad (1.16)$$

Dans la relation (1.16) :

- 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  $C_v$  ait été déterminé pour les valeurs  $L/b$  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  $1,2 h_a$ , où  $h_a$  est la hauteur aval du ressaut (figure 9).
- Si  $b/B$  est inférieur à 0,35,  $h$  doit être supérieur ou égale à  $1,30 h_a$ .

### 1.3.4. Jaugeur en canal triangulaire de type *Achour*

#### 1.3.4.1. présentation du dispositif

Les figures 1.10 et 1.11 montrent de manière schématisée 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 1.10). 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.

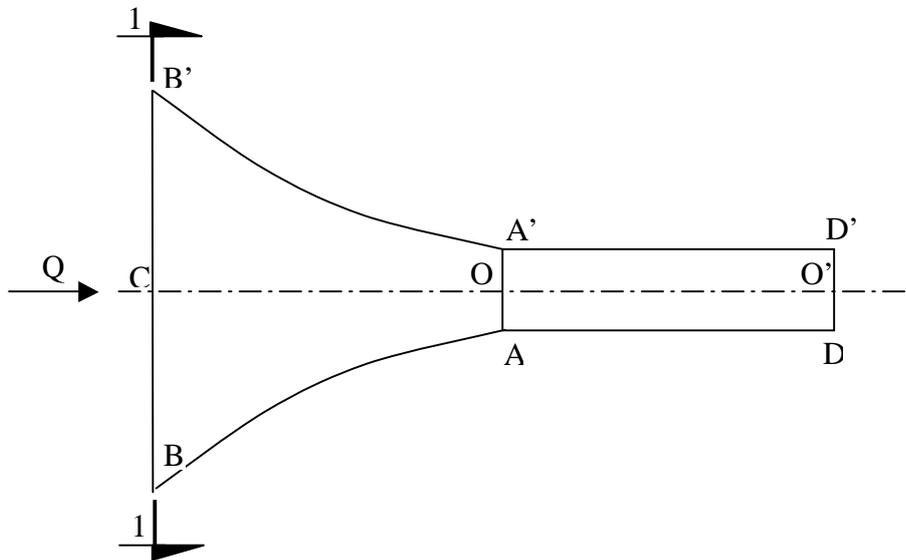


Figure 1.10 : Jaugeur triangulaire de type *Achour* –Vue en plan de l'appareil

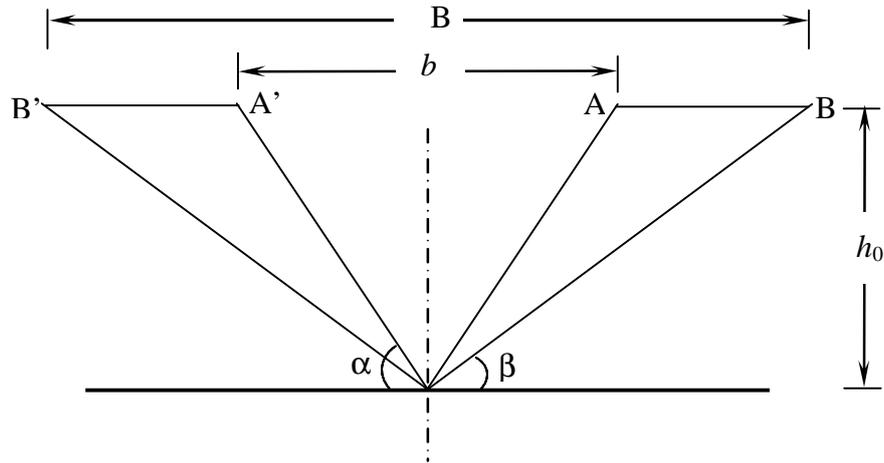


Figure 1.11 : Jaugeur triangulaire de type Achour –Vue de face de l'appareil suivant 1-1.

#### 1.3.4.2. Etude théorique de l'appareil et expression du débit

L'étude théorique porte sur le tronçon B'A'AB de l'appareil (figure 1.10) où l'angle d'ouverture de la section triangulaire varie depuis  $(\pi-2\beta)$  jusqu'à constituant l'angle d'ouverture de la section rétrécie de l'appareil (figure 1.11). En désignant par :

- $h_0$  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  $\cot g\beta$ ,
- $m_2$  le talus de la section rétrécie AA' de l'appareil défini par la  $\cot g\alpha$ .

Nous pouvons alors établir géométriquement les relations suivantes :

$$m_1 = \cot g\beta = \frac{B/2}{h_0} \quad (1.17)$$

$$m_2 = \cot g\alpha = \frac{b/2}{h_0} \quad (1.18)$$

Le rapport des relations (1.17) et (1.18) conduit à écrire :

$$\frac{m_1}{m_2} = \frac{B}{b} \quad (1.19)$$

La variation progressive de l'angle d'ouverture de la section divergente de l'appareil (figure 1.10) 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 :

$$h_{c1} = \left[ \frac{2Q^2}{gm_1^2} \right]^{1/5} \quad (1.20)$$

$$h_{c2} = \left[ \frac{2Q^2}{gm_2^2} \right]^{1/5} \quad (1.21)$$

Dans lesquels  $Q$  est le débit passant par l'appareil et  $g$  est l'accélération de la pesanteur. Les relations (1.20) et (1.21) 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 (1.20) et (1.21) permet d'écrire :

$$h_{c1} = h_{c2} \left( \frac{b}{B} \right)^{2/5} \quad (1.22)$$

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 que  $h_1 > h_{c1}$ .

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 (1.21). 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 :

$$h_{c2} = \frac{4}{5} H_1 \quad (1.23)$$

En substituant (1.23) dans (1.22), nous pouvons écrire :

$$h_{c1} = \frac{4}{5} H_1 \left( \frac{b}{B} \right)^{2/5} \quad (1.24)$$

En rapportant la charge totale  $H_1$  à la profondeur critique  $H_{c1}$ , la relation (1.24) devient :

$$\frac{H_1}{h_{c1}} = H_{1X} = \frac{5}{4} \left( \frac{B}{b} \right)^{2/5} \quad (1.25)$$

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 :

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

En tenant compte de la relation (1.20), la relation ci-dessus devient :

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

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 :

$$H_{1X} = h_{1X} + \frac{1}{4 h_{1X}^4} \quad (1.26)$$

Nous pouvons déduire de (23) et (24) que :

$$\frac{5 \left[ \frac{B}{b} \right]^{5/5}}{4 \left[ \frac{B}{b} \right]} = h_{1X} + \frac{1}{4 h_{1X}^4} \quad (1.27) \quad \text{Etant}$$

donné que les paramètres géométriques  $B$  et  $b$  sont connus, la relation (1.27) 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 (1.27) nous montre que :

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

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 ( $h_1 > h_{1X}$ ), le paramètre  $h_{1X}$  est strictement supérieur à l'unité ( $h_{1X} > 1$ ).

Les relations (1.19) et (1.12) permettent d'écrire :

$$Q^2 = \frac{g}{2} m_2^2 \left[ \frac{B}{b} \right]^5 h_{c1}^5 \quad (1.28)$$

Puisque  $h_{c1} = h_1/h_{1X}$ , la relation (1.28) devient :

$$Q = \sqrt{\frac{g}{2}} \frac{m_2}{(b/B) h_{1X}^{5/2}} h_1^{5/2} \quad (1.29)$$

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

$$Q = a \sqrt{\frac{g}{2}} m_2 h_1^{5/2} \quad (1.30)$$

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 (1.10) et moyennant les caractéristiques de ce dernier. Ceci est d'ailleurs conforme aux appareils semi-modulaires.

#### I.4. Conclusion

Nous avons tenté de présenter dans la première partie de la présente étude les différents appareils de mesure de débit dans les canaux ouverts se présentant comme un canal de faible longueur.

Dans un premier temps, nous avons passé en revue les différents types de déversoir à parois épaisses. Ces déversoirs se présentent sous plusieurs formes du profil en long, les plus importants d'entre eux tel que rectangulaire, triangulaire et le déversoir à seuil épais standard ou normal qui présente une géométrie identique à celle de la nappe inférieure d'un écoulement au-dessus d'un déversoir en mince paroi, afin de rendre la pression égale à celle atmosphérique tout le long du seuil. Ces déversoirs sont dotés dans son ensemble d'une échancrure rectangulaire et le débit  $Q$  est proportionnel à la puissance  $2/3$  de la hauteur de déversement mesurée à l'amont.

Nous avons montré que toutes les formules du débit transitant à travers ces déversoirs contiennent des termes correctifs, dont le plus important d'entre eux est sans aucun doute le coefficient de débit.

Le coefficient de débit est fonction d'une part des caractéristiques géométriques du déversoir et d'autre part des caractéristiques hydrauliques de l'écoulement au-dessus du déversoir. Cette dernière remarque nous a permis de conclure que ces déversoirs sont des appareils semi-modulaires. Le déversoir à paroi épaisse peut être avec ou sans contraction latérale et son coefficient de débit dépend essentiellement de la hauteur relative  $h/p$  où  $h$  représente la hauteur de la lame de déversement et  $P$  représente la hauteur de pelle, de la contraction latérale  $b/B$ , où  $b$  est la largeur de l'échancrure et  $B$  représente la largeur du canal d'amenée, il dépend aussi de la forme de l'entrée du déversoir.

En raison du caractère déversant de l'écoulement sur le déversoir à paroi épaisse, la charge à l'amont se transforme en énergie cinétique dans sa quasi-globalité. Toute la charge amont est ainsi perdue à l'aval et cela constitue un inconvénient certain.

Dans un second temps, nous avons présenté d'autres types d'appareils de mesures de débit dans les canaux ouverts et dont leurs principes sont basés sur la surélévation du plan d'eau amont. Ces appareils sont appelés jaugeurs à ressaut, les plus importants d'entre eux sont ceux de *Parshall*, *Venturi* et *Achour*.

Les jaugeurs ont été géométriquement décrits puis les formules pratiques ont été indiquées et largement discutées et les limites d'application ont été définies.

Cette catégorie d'appareil présente en règle générale une géométrie plane, à l'exception du jaugeur *Achour* dont les parois sont gauches. Les jaugeurs *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.

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 dit 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 sert à trouver une approche théorique pour un nouveau type d'appareil de mesure de débit, de section droite rectangulaire à seuil large présentant à la fois une contraction latérale et une hauteur de pelle, puis une vérification par des essais expérimentaux sera exposée dans la troisième partie de cette étude.

## CHAPITRE II

# APPROCHE THÉORIQUE DE LA LOI HAUTEUR-DÉBIT ET DU COEFFICIENT DE DÉBIT DU DISPOSITIF

### II.1. Introduction

Cette partie de notre étude sera consacrée à l'étude théorique d'un débitmètre semi modulaire de section rectangulaire. Placé dans un canal d'amenée de même forme mais de largeur plus importante, le dispositif provoque ainsi une contraction latérale de l'écoulement. A partir d'un schéma de définition, nous tenterons d'exprimer la loi hauteur – débit ainsi que celle du coefficient de débit, tenant compte des principaux paramètres mis en jeu, à l'exception cependant de la tension superficielle. Le développement théorique repose sur l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a nécessité certaines hypothèses simplificatrices.

Nous montrerons surtout qu'il est possible de tenir compte de l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement et nous quantifierons les erreurs obtenues sur le calcul du débit lorsque cet effet est délibérément négligé.

### II.2. Géométrie du dispositif et paramètres adimensionnels

Le dispositif de mesure de débit qui intéresse notre étude est schématiquement décrit, en perspective, sur la figure 2.1. Il s'agit d'un déversoir à seuil épais de section droite rectangulaire de largeur  $b$ , s'étendant sur une certaine longueur  $L$ . Comme dans la plupart des déversoirs utilisés dans la pratique, le dispositif est muni d'une hauteur de pelle  $P$  qui occasionne ainsi une contraction verticale de l'écoulement. En outre, placé dans un canal d'amenée rectangulaire de largeur  $B$  plus importante, le dispositif provoque également une contraction latérale de l'écoulement.

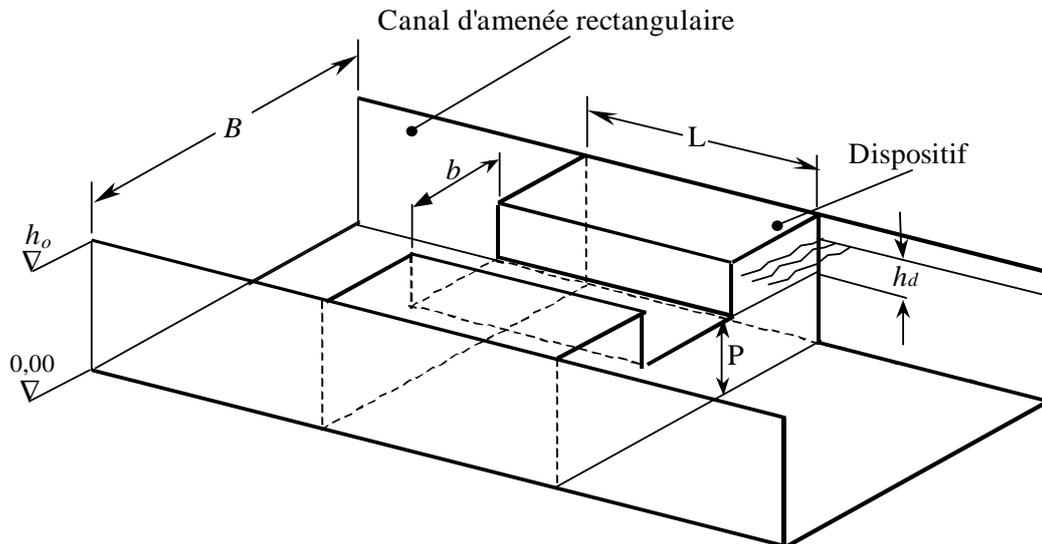


Figure 2.1: Schéma simplifié en perspective du dispositif placé dans un canal rectangulaire.

Les caractéristiques du dispositif sont :

- $b$  : largeur de l'échancrure du dispositif
- $B$  : largeur du canal d'amenée dans lequel est inséré le dispositif
- $P$  : hauteur de pelle

- $h_o$ : hauteur géométrique du dispositif
- $h_d$ : hauteur de déversement comptée au-dessus de la hauteur de pelle
- $L$ : longueur du dispositif

La largeur  $b$  de l'échancrure du dispositif ainsi que celle du canal d'amenée forment le rapport  $\beta = b/B$  taux de contraction latérale. Il est évident que le taux de contraction  $\beta$  varie dans la gamme  $0 < \beta \leq 1$ . Lorsque  $\beta = 1$ , correspondant à  $b = B$ , la figure 2.1 montre bien que le dispositif se réduit à un seuil à paroi épaisse de hauteur géométrique  $P$ . Le taux de contraction latérale peut également s'exprimer par le paramètre  $\sigma = (B - b)/B = (1 - \beta)$  et l'on peut ainsi noter que  $0 < \sigma \leq 1$ . Le double effet des contractions latérale et verticale peut être exprimé par le paramètre sans dimension  $\psi = bh_d/[B(h_d + P)]$  qui représente donc le rapport de la section rétrécie située au-dessus de la hauteur de pelle  $P$  à la section complète située à l'amont du dispositif. Après réarrangement, le paramètre  $\psi$  peut s'écrire :

$$\psi = \frac{\beta}{1 + P^*} \tag{2.1}$$

où  $P^* = h_d/P$  est la hauteur relative de pelle . Etant donné que  $\beta \leq 1$  et au regard de l'équation (2.1), il est possible d'écrire que  $\psi < 1$ . En outre, pour une valeur donnée de  $\beta$ , nous pouvons écrire que  $\psi \rightarrow 0$  lorsque  $P^* \rightarrow \infty$ . Cette configuration s'obtient lorsque  $P \rightarrow 0$ , traduisant ainsi les faibles valeurs de la hauteur de pelle  $P$ , ou lorsque  $h_d \rightarrow \infty$ , traduisant alors les valeurs élevées de la hauteur de déversement  $h_d$ .

### II.3. Description de l'écoulement

La figure 2.2 montre le profil en long de l'écoulement dans le canal d'amenée, ainsi qu'à l'intérieur du dispositif.

Le profil en long ainsi représenté a été observé expérimentalement sur l'ensemble des dispositifs testés, à chaque fois que la longueur géométrique  $X$  eût été suffisante.

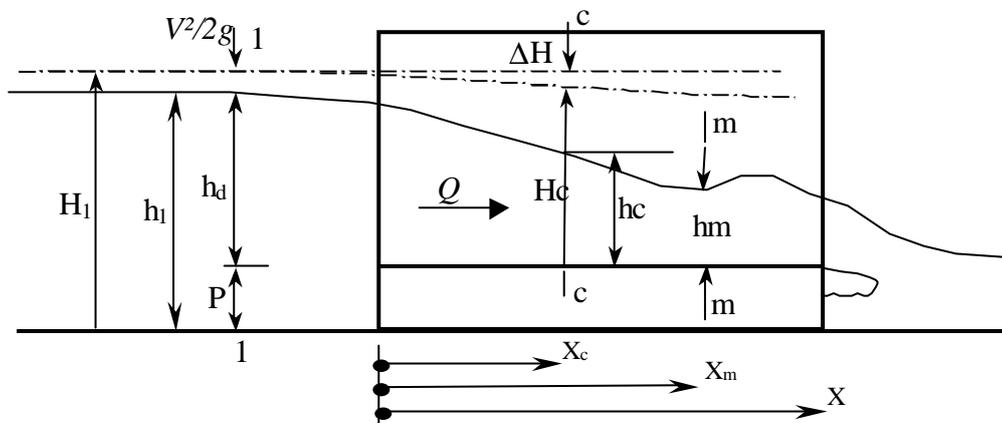


Figure 2.2 : Profil en long de l'écoulement dans le canal d'amenée et à l'intérieur du dispositif.

La figure 2.2 montre bien que l'écoulement à l'amont du dispositif est de nature fluviale de charge totale :

$$H_1 = h_1 + \frac{V^2}{2g}$$

ou bien :

$$H_1 = P + h_d + \frac{V^2}{2g}$$

La hauteur capable de la vitesse d'approche de l'écoulement  $V^2/2g$  peut être considérée comme étant une fraction  $\delta$  de la hauteur de déversement  $h_d$ , soit :

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

Ceci permet d'écrire que la charge totale de déversement  $H_d = h_d + \frac{V^2}{2g}$  est telle que :

$$H_d = (1 + \delta) h_d \quad (2.2)$$

Lorsque la hauteur capable de la vitesse d'approche de l'écoulement est négligeable, le facteur cinétique  $\delta$  est tel que  $\delta \rightarrow 0$  et la relation (2.2) indique que la charge de déversement  $H_d$  peut être assimilée à la profondeur de déversement  $h_d$ .

A l'aval du dispositif, l'écoulement est de nature torrentielle et ceci permet de conclure qu'un écoulement critique de profondeur  $h_c$  s'établit à l'intérieur du dispositif et dont la section est désignée par c – c (figure 2.2).

Les observations expérimentales ont clairement montré qu'une section minimale de profondeur  $h_m$  apparaît à l'aval de la section c – c, lorsque la longueur  $L$  du dispositif est suffisante.

Nous désignons par  $X_c$  la distance séparant l'entrée du dispositif et la section critique c – c, tandis que  $X_m$  est la distance séparant l'entrée du dispositif et la section de profondeur minimale  $h_m$ .

## II.4. Hauteur relative de déversement

### II.4.1. Définition

La hauteur relative de déversement  $h_d^*$  est définie comme étant le rapport de la hauteur de déversement  $h_d$  à la profondeur critique  $h_c$  de l'écoulement dans la section de contrôle c – c, soit  $h_d^* = h_d / h_c$ . Il est à noter que la hauteur relative de déversement  $h_d^*$  est supérieure à l'unité, puisque la hauteur de déversement  $h_d$  est supérieure à la profondeur critique  $h_c$ .

Il est universellement connu que la profondeur  $h_c$  d'un écoulement critique dans une section rectangulaire, en particulier lorsqu'il s'agit de la section contractée du dispositif étudié, est donnée par la relation suivante :

$$h_c = \left( \frac{Q^2}{g b^2} \right)^{1/3} \quad (2.3)$$

où  $Q$  représente le débit volume écoulé par le dispositif ainsi que par le canal d'amenée,  $g$  est l'accélération de la pesanteur, et  $b$  représente, comme cela a déjà été indiqué, la largeur de l'échancrure du dispositif.

#### II.4.2. Expression de la hauteur relative de déversement

La détermination de l'expression de la hauteur relative de déversement  $h_d^*$ , en fonction des autres paramètres régissant l'écoulement, peut être obtenue en faisant appel à l'équation de la quantité de mouvement. Son application nécessite non seulement le choix de deux sections de l'écoulement mais aussi un certain nombre d'hypothèses simplificatrices que nous allons préciser. Les sections que nous avons choisies sont d'une part la section 1-1 de l'écoulement fluvial à l'amont du dispositif dans le canal d'aménée et la section de contrôle c – c de l'écoulement critique d'autre part. L'application de l'équation de mouvement repose sur les hypothèses simplificatrices suivantes :

- La répartition de la pression est hydrostatique dans toute section de l'écoulement.
- La répartition de la vitesse est uniforme dans les sections choisies.
- La perte de charge par frottement se produisant entre les deux sections choisies est négligeable.
- La résistance de l'air est négligeable.

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 ( $\rho QV$ ) entre les deux sections choisies est égale à la somme des forces extérieures agissant sur ces mêmes sections, projetées sur un axe longitudinal, dont le sens est généralement choisi identique à celui de l'écoulement. Si :

- $V_c$  est la vitesse moyenne critique dans la section c – c de contrôle de profondeur  $h_c$ ,
- $V_1$  est la vitesse moyenne dans la section 1-1 de profondeur  $(h_d+P)$ , située dans le canal d'aménée à l'amont du dispositif,
- $F_c$  représente la force hydrostatique agissant sur la section c – c,
- $F_1$  représente la force hydrostatique agissant sur la section 1-1,
- $F_r$  représente la force de réaction de la face amont du dispositif,

L'équation de quantité de mouvement s'écrit alors :

$$\rho Q(V_c - V_1) = F_1 - F_c - F_r \quad (2.4)$$

où :  $F_1 = \varpi \bar{h}_1 A_1$ ,  $F_c = \varpi \bar{h}_c A_c$ ,  $F_r = \varpi \bar{h}_r A_r$ . La quantité  $\varpi = \rho g$  représente le poids spécifique du liquide en écoulement de masse volumique  $\rho$ , tandis que  $\bar{h}_1$ ,  $\bar{h}_c$  et  $\bar{h}_r$  représentent respectivement la position du centre de gravité des sections  $A_1$ ,  $A_c$  et  $A_r$ , comptée à partir de la surface libre. Il est aisé de montrer que :

- $\bar{h}_1 = \frac{h_1}{2}$
- $\bar{h}_c = \frac{h_c}{2}$

$$- \bar{h}_r = \frac{1}{2} \left( \frac{h_1^2 B - h_d^2 b}{A_r} \right), \text{ où } h_1 = (h_d + P) \text{ et } A_r = (h_1 B) - (h_d b).$$

En substituant les relations précédentes dans l'équation (2.4), et après avoir procédé à des simplifications et à des arrangements, nous obtenons le résultat final suivant :

$$h_d^{*3} - 3h_d^* + \frac{2\beta}{1+P^*} = 0 \quad (2.5)$$

La relation (2.5) peut également s'écrire :

$$h_d^{*3} - 3h_d^* + 2\psi = 0 \quad (2.6)$$

Il est utile de rappeler la signification des différents paramètres qui composent l'équation (2.6) :  $h_d^* = h_d/h_c$ ,

$$\beta = b/B, \quad P^* = P/h_d \text{ et } \psi = \frac{\beta}{1+P^*}.$$

Nous pouvons ainsi noter que la profondeur relative  $h_d^*$  est liée, de manière implicite, au seul paramètre sans dimension  $\psi$  par une équation de troisième ordre. En pratique, les données du problème sont :

- La largeur de l'échancrure  $b$ .
- La largeur du canal d'amenée  $B$ .
- La hauteur de pelle  $P$ .
- La hauteur de déversement  $h_d$  obtenue par simple mesure limnimétrique.

Les paramètres ainsi donnés permettent de déterminer les variables sans dimension  $\beta$  et  $\psi$ . L'équation (2.6) permet alors de calculer la valeur de la hauteur relative  $h_d^*$  et par conséquent celle de la profondeur critique  $h_c$ . Celle-ci nous permet à son tour la détermination du débit volume  $Q$  en application de la relation (2.3). L'expression théorique du débit volume sera présentée de manière plus explicite dans le prochain paragraphe. En faisant appel aux fonctions trigonométriques, il est possible d'exprimer la relation explicite  $h_d^* = f(\psi)$  par la résolution de l'équation (2.6). En effet, le discriminant de l'équation (2.6) s'écrit :

$$\Delta = \psi^2 - 1$$

et il est donc négatif puisque nous avons montré que  $\psi < 1$ . La racine réelle de l'équation (2.6) est alors :

$$h_d^* = 2\cos(\alpha/3) \quad (2.7)$$

où l'angle  $\alpha$  est tel que :  $\cos(\alpha) = -\psi$ .

Afin de montrer l'influence des paramètres  $\beta$  et  $P^*$  sur la hauteur relative de déversement  $h_d^*$ , nous avons représenté sur la figure 2.3, les courbes  $h_d^* = f(\beta, P^*)$  obtenues en vertu de la relation (2.5). Il apparaît alors que, pour une valeur donnée de  $\beta$ ,  $h_d^*$  augmente au fur et à mesure que  $P^*$  croît. En outre, pour une valeur fixée de  $P^*$ , la hauteur relative  $h_d^*$  diminue au fur et à mesure de l'augmentation du taux d'élargissement  $\beta$ .

Toutes les courbes de la figure 2.3 convergent vers la valeur particulière  $h_d^* = \sqrt{3} \approx 1,732$  lorsque  $P^*$  est élevée. Cette valeur particulière s'obtient à partir de l'une des relations (2.5), (2.6) ou (2.7), en écrivant que  $P^* \rightarrow \infty$  correspondant à  $\psi \rightarrow 0$ .

Il est intéressant de signaler le cas particulier du dispositif dépourvu de hauteur de pelle ( $P = 0$ ) et dont l'axe longitudinal se confond alors avec celui du canal d'amenée. Cette configuration permet d'écrire que  $P^* = 0$  et par voie de conséquence  $\psi = \beta$ . Dans ce cas, la hauteur relative de déversement  $h_d^*$  est aussi déterminée en application de la relation (2.6) en notant cependant que  $\cos(\alpha) = -\beta$ .

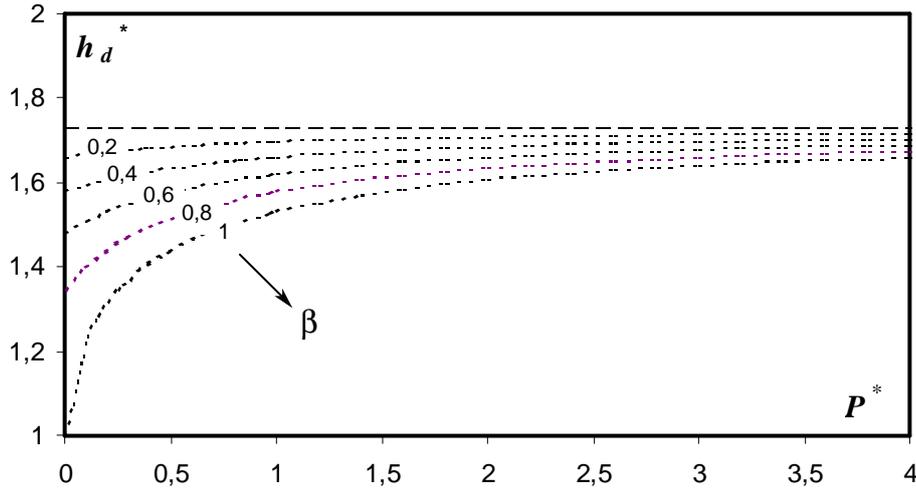


Figure 2.3 : Courbes de variation  $h_d^* = f(\beta, P^*)$  tracées selon la relation (2.5).

La courbe correspondant à  $\beta = 1$  traduit l'absence de contraction latérale puisque  $b = B$ . Le dispositif se réduit alors à un simple seuil à paroi épaisse de hauteur géométrique  $P$ , ayant fait l'objet de nombreuses études antérieures. Au cours de notre travail, aucun essai expérimental n'a été envisagé concernant cette configuration.

## II.5. Charge totale relative de déversement

### II.5.1. Définition

Nous définissons la charge totale relative de déversement  $H_d^*$  comme étant la charge totale de déversement

$$H_d = h_d + \frac{V^2}{2g} \text{ rapportée à la profondeur critique } h_c \text{ de l'écoulement dans le dispositif, soit } H_d^* = H_d/h_c.$$

### II.5.2. Expression de la charge relative de déversement

Cette partie de notre étude a pour principal objectif d'identifier les divers paramètres influençant la charge totale relative de déversement précédemment définie.

En notant que la vitesse moyenne de l'écoulement dans le canal d'amenée est  $V = Q/A$ , où  $A$  est l'aire de la section mouillée exprimée par  $A = B(h_d + P)$ , la charge totale de déversement s'écrit , par rapport au fond horizontal du canal d'amenée :

$$H_d = h_d + \frac{Q^2}{2gB^2(h_d+P)^2} \quad (2.8)$$

En éliminant le débit  $Q$  entre les relations (2.3) et (2.8) et après simplifications, nous pouvons écrire que :

$$H_d = h_d + \frac{b^2 h_c^3}{2B^2(h_d+P)^2}$$

En introduisant le taux d'élargissement  $\beta = b/B$  ainsi que la hauteur relative de pelle  $P^* = h_d/P$ , la relation précédente s'écrit :

$$H_d = h_d + \frac{\beta^2 h_c^3}{2h_d^2(1+P^*)^2}$$

En divisant chacun des termes de l'équation ainsi obtenue par  $h_c$ , il vient que :

$$H_d^* = h_d^* + \frac{\beta^2}{2h_d^{*2}(1+P^*)^2} \quad (2.9)$$

La relation (2.9) est l'expression développée de la charge totale relative de déversement, dans laquelle apparaît clairement l'influence des paramètres  $h_d^* = h_d/h_c$ ,  $\beta = b/B$  et  $P^* = P/h_d$ .

Or, nous avons montré que la profondeur relative de déversement  $h_d^*$  dépend exclusivement des paramètres  $\beta$  et  $P^*$  à travers la relation (2.5). Ceci permet d'écrire que la charge totale relative de déversement  $H_d^*$  ne dépend également que des seules variables  $\beta$  et  $P^*$ , soit  $H_d^* = f(\beta, P^*)$ .

Mais, la relation (2.9) peut aussi s'exprimer de manière plus condensée en introduisant le paramètre sans dimension  $\psi$ , soit :

$$H_d^* = h_d^* + \frac{\psi^2}{2h_d^{*2}} \quad (2.10)$$

Rappelons que  $h_d^*$  et  $\psi$  sont liés entre eux par la relation (2.7). Il est donc évident que le seul paramètre  $\psi$  permet de déterminer la valeur de la charge totale relative de déversement  $H_d^*$ . La relation (2.10) révèle que lorsque le paramètre sans dimension  $\psi \rightarrow 0$ , correspondant aux valeurs élevées de  $P^*$  (soit  $P^* \rightarrow \infty$ ), la charge totale relative de déversement peut être assimilée à la hauteur relative de déversement. En d'autres termes, lorsque  $P^* \rightarrow \infty$ , l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement est négligeable. En outre, la charge totale relative de déversement  $H_d^*$  prend alors la valeur  $H_d^* \approx h_d^* = \sqrt{3} \approx 1,732$ . En représentant sur la figure 2.4 la

variation théorique de  $H_d^* = f(\psi)$ , nous pouvons constater que  $H_d^*$  diminue au fur et à mesure de l'augmentation du paramètre  $\psi$ . En outre, il est intéressant de noter que pour la valeur particulière  $\psi = 1$ , correspondant à  $\beta = 1$  et à  $P^* = 0$ , la charge totale relative de déversement  $H_d^*$  est égale à  $3/2$ . Ceci permet de conclure que d'une part le dispositif est dépourvu d'une hauteur de pelle et d'une contraction latérale, et que d'autre part l'écoulement est critique dans le canal d'amenée.

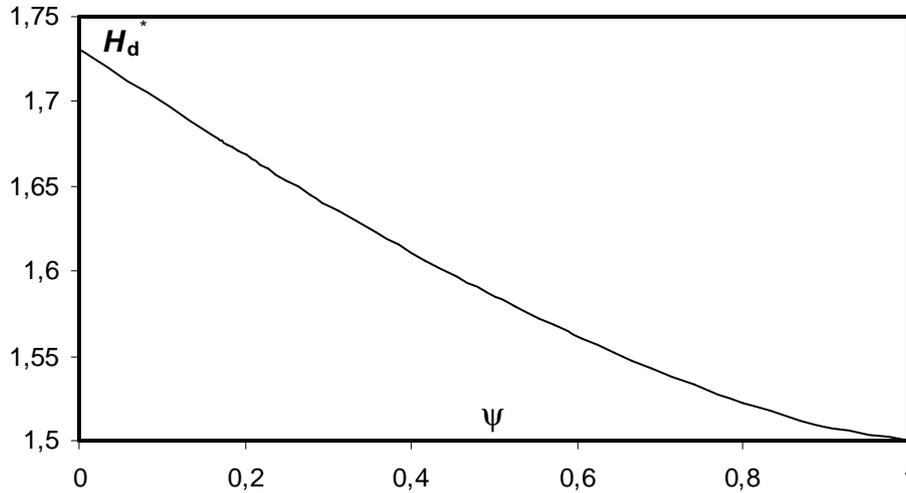


Figure 2.4 : Variation théorique de  $H_d^*(\psi)$  selon les relations (2.7) et (2.10).

Afin de mieux observer l'influence des paramètres  $\beta$  et  $P^*$  sur la charge totale relative de déversement  $H_d^*$ , nous avons représenté sur la figure 2.5 la variation théorique  $H_d^* = f(\beta, P^*)$  selon la relation (2.9). Il apparaît que pour une valeur donnée du taux d'élargissement  $\beta$ , la charge totale relative de déversement  $H_d^*$  augmente avec l'accroissement de la hauteur relative de pelle  $P^*$ . Toutes les courbes convergent vers la valeur limite  $H_d^* \approx h_d^* = \sqrt{3} \approx 1,732$  lorsque  $P^* \rightarrow \infty$ , ce qui implique que l'effet la vitesse d'approche de l'écoulement est, dans ce cas, négligeable. Enfin, il apparaît clairement sur la figure 2.5 que pour une valeur donnée de la hauteur relative de pelle  $P^*$ , la charge totale relative de déversement  $H_d^*$  augmente avec la diminution du taux d'élargissement  $\beta$ .

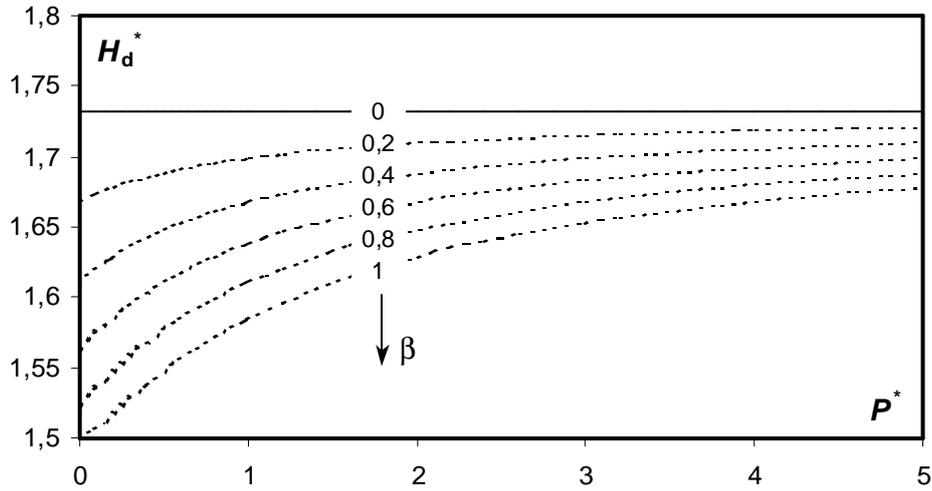


Figure 2.5 : Variation théorique de  $H_d^* = f(\beta, P^*)$  selon la relation (2.9).

### II.6. Expression du facteur cinétique

En comparant les relations (2.2) et (2.9), il est aisé de déduire que le facteur cinétique  $\delta$  répond à la relation :

$$\delta = \frac{\beta^2}{2h_d^{*3}(1+P^*)^2} \quad (2.11)$$

Qui peut s'écrire plus simplement :

$$\delta = \frac{\psi^2}{2h_d^{*3}} \quad (2.12)$$

Au regard des relations (2.7) et (2.12), nous pouvons énoncer que le facteur cinétique  $\delta$  ne dépend que du seul paramètre  $\psi$  et par voie de conséquence des paramètres  $\beta$  et  $P^*$ . La variation théorique de  $\delta = f(\beta, P^*)$  est représentée graphiquement sur la figure 2.6. Elle montre que, pour une valeur donnée du taux d'élargissement  $\beta$ , le facteur cinétique  $\delta$  diminue avec l'augmentation de la hauteur relative de pelle  $P^*$ . Nous pouvons également constater que  $\delta$  devient très faible pour les valeurs élevées de  $P^*$  ou pour les valeurs basses du taux d'élargissement  $\beta$ . En d'autres termes, plus le dispositif est pourvu d'une contraction accentuée et plus le facteur cinétique  $\delta$  diminue. En outre, l'écoulement dans le canal d'aménée est de plus en plus fluvial ou tranquille, impliquant ainsi une charge totale de déversement assimilable ou proche de la hauteur de déversement.

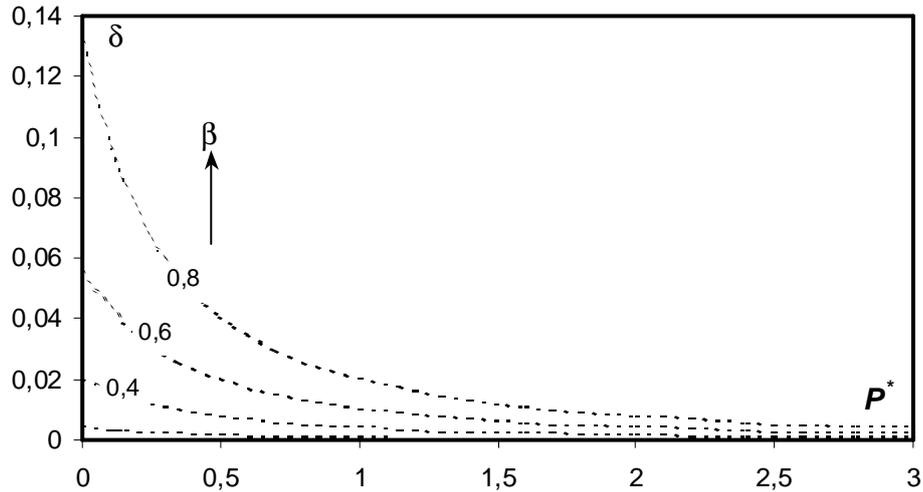


Figure 2.6 : Variation théorique du facteur cinétique  $\delta = f(\beta, P^*)$ .

## II.7. Coefficient de débit du dispositif et expression du débit

### II.7.1. Vitesse d'approche de l'écoulement négligée

Lorsque la vitesse d'approche est négligée, la charge totale relative de déversement est alors assimilée à la hauteur de déversement, ce qui correspond à  $\delta \rightarrow 0$ .

Si pour  $\delta \rightarrow 0$  le coefficient de débit du dispositif est  $\mu_o$ , alors le débit volume  $Q$  écoulé est :

$$Q = \mu_o b \sqrt{2g} h_d^{3/2} \quad (2.13)$$

en rappelant que  $b$  est la largeur de l'échancrure du dispositif (figure 2.1).

En éliminant le débit volume  $Q$  entre les relations (2.3) et (2.13), la relation suivante peut être alors établie :

$$\mu_o = \frac{\sqrt{2}}{2} (h_c/h_d)^{3/2}$$

et peut également s'écrire :

$$\mu_o = \frac{\sqrt{2}}{2} h_d^{*-3/2} \quad (2.14)$$

La relation (2.14) indique clairement que le coefficient de débit  $\mu_o$  est exclusivement lié à la hauteur relative de déversement  $h_d^*$ . Mais, compte tenu de la relation (2.7), nous pouvons conclure que  $\mu_o$  est donc dépendant de  $\psi$  et par conséquent des paramètres  $\beta$  et  $P^*$ . En combinant les relations (2.7) et (2.14), il vient que :

$$\mu_o = \frac{1}{4} \cos^{-3/2}(\alpha/3) \quad (2.15)$$

avec :  $\cos(\alpha) = -\psi$ .

Pour mieux observer l'influence des paramètres  $\beta$  et  $P^*$  sur le coefficient de débit  $\mu_o$ , nous avons représenté sur la figure 2.7 la variation théorique  $\mu_o = f(\beta, P^*)$  en vertu des relations (2.1) et (2.15).

Les courbes limites  $\mu_o = f(\beta = 0, P^*)$  et  $\mu_o = f(\beta = 1, P^*)$  n'ont pas été tracées sur la figure 2.7 car elles ne présentent aucun intérêt pour notre étude.

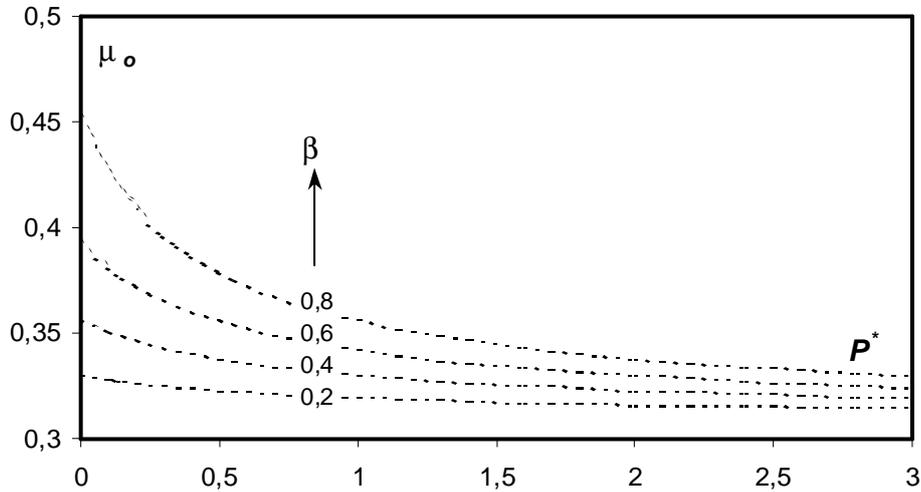


Figure 2.7 : Variation théorique du coefficient de débit  $\mu_o = f(\beta, P^*)$ .

Il ressort de la figure 2.7 les principales conclusions suivantes :

- Quelle que soit la valeur que prend le paramètre  $\beta$ , le coefficient de débit  $\mu_o$  diminue au fur et à mesure de l'augmentation de la hauteur relative de pelle  $P^*$ .
- Pour une même valeur de la hauteur relative de pelle  $P^*$ , le coefficient de débit  $\mu_o$  augmente lorsque le paramètre  $\beta$  croît.
- Pour les valeurs élevées de la hauteur relative de pelle  $P^*$ , le coefficient de débit  $\mu_o$  tend vers une valeur constante. Le calcul a montré que pour  $P^* \rightarrow \infty$ , correspondant à  $\psi = 0$ , le coefficient de débit est  $\mu_o = 0,3102$ .

En outre, l'application de la relation (2.15) a montré que  $\mu_o = f(\beta = 0, P^*) = 0,3102$  et que  $\mu_o = f(\beta = 1, P^* = 0) = \sqrt{2}/2 \approx 0,7071$ . Il est donc possible de conclure que lorsque le paramètre  $\beta$  varie dans la gamme  $0 \leq \beta \leq 1$ , les valeurs du coefficient de débit  $\mu_o$  se situent dans l'intervalle  $0,3102 \leq \mu_o \leq 0,7071$ .

En combinant les relations (2.13) et (2.15), nous obtenons l'expression théorique du débit volume  $Q$  lorsque la vitesse d'approche de l'écoulement est négligée, soit :

$$Q = \frac{1}{4} \sqrt{2g} b [\cos^{-3/2}(\alpha/3)] h_d^{3/2} \quad (2.16)$$

où :  $\cos(\alpha) = -\psi$ .

**Exemple d'application 1 :**

Soit à déterminer le débit volume  $Q$  écoulé par un canal d'amenée horizontal de section rectangulaire de largeur  $B = 1,00\text{m}$ , au moyen du dispositif étudié (figure 2.1) dont la largeur de l'échancrure est  $b = 0,50\text{ m}$  et la hauteur de pelle est  $P = 0,40\text{ m}$ . La vitesse d'approche de l'écoulement étant supposée négligeable, une mesure limnimétrique a indiqué que la hauteur de déversement au-dessus de  $P$  est  $h_d = 0,60\text{ m}$ .

**Solution :**

La largeur  $B$  du canal d'amenée ainsi que la largeur  $b$  de l'échancrure du dispositif permettent de calculer le taux de contraction  $\beta = b/B = 0,5/1,00 = 0,50$ .

En outre, les paramètres  $P$  et  $h_d$  forment le rapport  $P^* = P/h_d$ , ou hauteur relative de pelle, dont la valeur est  $P^* = P/h_d = 0,40/0,60 = 2/3$ .

Compte tenu des valeurs calculées de  $\beta$  et de  $P^*$ , le paramètre sans dimension  $\psi = \beta/(1 + P^*)$  est par suite  $\psi = 0,50/(1 + 2/3) = 0,30$ . Cette dernière valeur permet alors de calculer l'angle  $\alpha$  figurant dans la relation (2.16) et tel que :  $\alpha = \cos^{-1}(-\psi)$ , soit  $\alpha = \cos^{-1}(-0,30) = 107,46^\circ$ .

Ainsi, tous les paramètres qui composent la relation (2.16) sont connus, ce qui permet d'évaluer le débit volume  $Q$  recherché, soit :

$$Q = \frac{1}{4} \times \sqrt{2 \times 9,81} \times 0,50 \times [\cos^{-3/2}(107,46/3)] \times (0,60)^{3/2} \approx 0,3524 \text{ m}^3/\text{s}$$

A titre indicatif, nous pouvons théoriquement estimer le coefficient de débit  $\mu_o$  par application de la relation (2.15), soit :

$$\mu_o = \frac{1}{4} \cos^{-3/2}(\alpha/3) = \frac{1}{4} \cos^{-3/2}(107,46/3) \approx 0,3424$$

En outre, nous pouvons déterminer la valeur de la hauteur relative de déversement  $h_d^*$  par l'équation (2.7), soit :

$$h_d^* = 2 \cos(\alpha/3) = 2 \times \cos(107,46/3) \approx 1,6217$$

Le couple de paramètres  $(\psi, h_d^*)$  conduit au calcul du facteur cinétique  $\delta$  par application de la relation (2.12), soit :

$$\delta = \frac{\psi^2}{2h_d^{*3}} = \frac{(0,30)^2}{2 \times (1,6217)^3} \approx 0,01$$

Ainsi, l'hypothèse selon laquelle la vitesse d'approche de l'écoulement est négligeable ( $H_d \cong h_d$ ) implique une erreur relative de 1% sur la charge totale de déversement selon la relation (2.2), et environ 1,5% d'erreur sur le calcul du débit volume  $Q$  au regard de la relation (2.16).

## II.7.2. Vitesse d'approche de l'écoulement non négligée

Lorsque l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement ne peut être négligé, l'expression du coefficient de débit ainsi que celle du débit volume peuvent être analytiquement obtenues par deux méthodes.

a) La première méthode consiste à considérer que  $\mu$  est le coefficient de débit du dispositif prenant en compte l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement. Le débit volume  $Q$  s'écrit :

$$Q = \mu b \sqrt{2g} H_d^{3/2} \quad (2.17)$$

En éliminant le débit volume  $Q$  entre les relations (2.3) et (2.17), il vient que :

$$\mu H_d^{3/2} = \frac{\sqrt{2}}{2} h_c^{3/2} \quad (2.18)$$

En introduisant la charge relative de déversement  $H_d^* = H_d / h_c$ , la relation (2.18) conduit à écrire que :

$$\mu = \frac{\sqrt{2}}{2 H_d^{*3/2}} \quad (2.19)$$

La combinaison des relations (2.10) et (2.19) mène alors à :

$$\mu = \frac{\sqrt{2}}{2} \left( h_d^* + \frac{\Psi^2}{2 h_d^{*2}} \right)^{-3/2} \quad (2.20)$$

La relation (2.20) peut également s'écrire :

$$\mu = \frac{\sqrt{2}}{2} h_d^{*-3/2} \left( 1 + \frac{\Psi^2}{2 h_d^{*3}} \right)^{-3/2} \quad (2.21)$$

Notons que le second terme, figurant dans la parenthèse de la relation (2.21), correspond au facteur cinétique  $\delta$  et répond à la relation (2.12). En outre, il apparaît clairement que lorsque  $\delta \rightarrow 0$ , la relation (2.21) mène à l'équation (2.14) pour  $\mu \rightarrow \mu_o$ .

Tenant compte de toutes ces considérations, la relation (2.17) s'écrit en définitive :

$$Q = b \sqrt{g} h_d^{*-3/2} \left( 1 + \frac{\Psi^2}{2 h_d^{*3}} \right)^{-3/2} H_d^{3/2} \quad (2.22)$$

C'est l'expression théorique du débit volume  $Q$  écoulé par le dispositif étudié, mais qui ne peut cependant s'exprimer en fonction de la hauteur relative de déversement  $h_d$ .

b) La seconde méthode consiste à écrire que le débit volume  $Q$  écoulé par le dispositif s'écrit sous la forme :

$$Q = \mu_o b \sqrt{2g} H_d^{3/2} \quad (2.23)$$

La relation (2.23) correspond en fait à l'équation (2.13) en remplaçant la profondeur de déversement  $h_d$  par la charge totale de déversement  $H_d$ . Ainsi, l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement y est implicitement considéré.

En introduisant la relation (2.2) dans l'équation (2.23), il vient que :

$$Q = \mu_o b \sqrt{2g} (1 + \delta)^{3/2} h_d^{3/2} \quad (2.24)$$

Rappelons que le facteur cinétique  $\delta$  est donné par la relation (2.12).

Ainsi, pour  $\delta \rightarrow 0$ , correspondant à un effet négligeable de la vitesse d'approche de l'écoulement, la relation (2.24) mène à la relation (2.13).

La relation (2.24) peut en outre s'écrire sous la forme générale suivante :

$$Q = \mu b \sqrt{2g} h_d^{3/2} \quad (2.25)$$

où le coefficient de débit  $\mu$  est :

$$\mu = \mu_o (1 + \delta)^{3/2} \quad (2.26)$$

En introduisant la relation (2.12) dans (2.26), il vient que :

$$\frac{\mu}{\mu_o} = \left( 1 + \frac{\Psi^2}{2h_d^{*3}} \right)^{3/2} \quad (2.27)$$

Or, nous avons montré que la hauteur relative de déversement  $h_d^*$ , exprimée par la relation (2.7), ne dépend que du paramètre adimensionnel  $\Psi$  et donc des paramètres  $\beta$  et  $P^*$ . Nous pouvons donc conclure que le rapport des coefficients de débit  $\mu/\mu_o$  n'est fonction que du taux de contraction  $\beta$  du dispositif et de sa hauteur relative de pelle  $P^*$ .

D'autre part, en tenant compte de (2.7), la relation (2.27) peut s'écrire :

$$\frac{\mu}{\mu_o} = \left[ 1 + \frac{\Psi^2}{16 \cos^3(\alpha/3)} \right]^{3/2} \quad (2.28)$$

avec :  $\cos(\alpha) = -\Psi$ .

La relation (2.28) a été représentée graphiquement sur la figure 2.8, dans un système d'axes à coordonnées cartésiennes. Les courbes obtenues indiquent clairement que, pour une valeur donnée du taux de contraction  $\beta$ , le rapport  $\mu/\mu_o$  diminue au fur et à mesure que la hauteur relative de pelle  $P^*$  augmente. Ce rapport tend vers l'unité lorsque le taux de contraction  $\beta$  tend vers zéro ou lorsque  $\beta$  est faible.

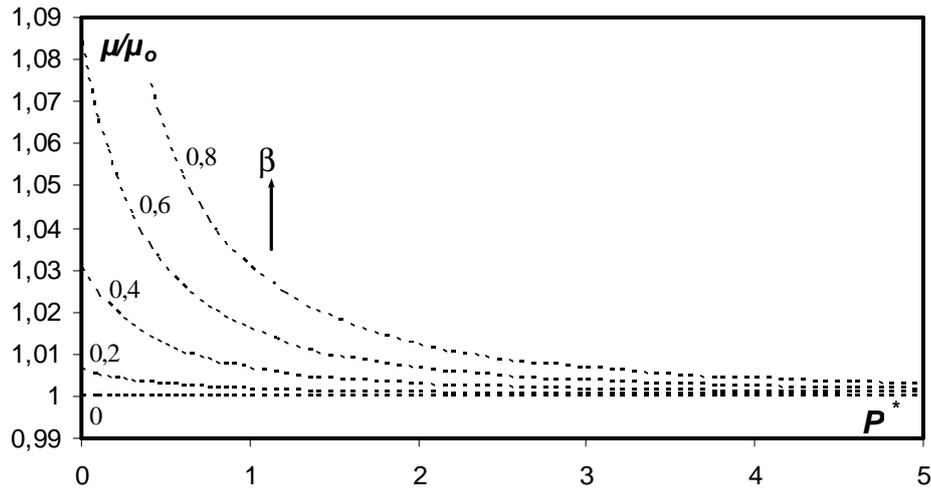


Figure 2.8 : Courbes  $\mu/\mu_o = f(\beta, P^*)$  tracées selon la relation (2.28).

Le rapport  $\mu/\mu_o$  tend aussi vers l'unité pour les grandes valeurs de  $\beta$ , à condition que les hauteurs relatives de pelle soient suffisamment élevées. A titre indicatif, nous pouvons constater que, pour la valeur  $\beta = 0,8$ ,  $\mu/\mu_o = 1,01$  pour  $P^* \cong 2,4$ . Ainsi, en adoptant ces conditions et en admettant que l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement peut être négligé ( $\delta \rightarrow 0$ ), l'évaluation du coefficient de débit  $\mu$  sera entachée d'une erreur relative de 1%. Il est donc possible de dire que lorsque l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement est délibérément négligé, le dispositif de mesure de débit étudié devra être caractérisé par un taux de contraction  $\beta$  élevé, associé à de grandes valeurs de la hauteur de pelle  $P^*$ . Il peut être également utilisé sous de faibles hauteurs de pelle  $P^*$ , à condition d'adopter les faibles valeurs de  $\beta$ .

En outre, lorsque le facteur cinétique  $\delta$ , exprimé par la relation (2.11) ou (2.12), est nettement inférieur à l'unité, la relation (2.28) peut être simplifiée pour s'écrire :

$$\frac{\mu}{\mu_o} = \left[ 1 + \frac{\Psi^2}{16 \cos^3(\alpha/3)} \right]^{3/2} \cong 1 + \frac{\frac{3}{2} \Psi^2}{16 \cos^3(\alpha/3)} = 1 + \frac{\Psi^2}{32 \cos^3(\alpha/3)}$$

soit :

$$\frac{\mu}{\mu_o} \cong 1 + \frac{\Psi^2}{32 \cos^3(\alpha/3)} \quad (2.29)$$

avec :  $\left[ \frac{\Psi^2}{16 \cos^3(\alpha/3)} \right] \lll 1$ .

Nous avons également tracé sur la figure 2.9 la variation de  $\mu/\mu_o = f(\Psi)$ , en application de la relation (2.28).

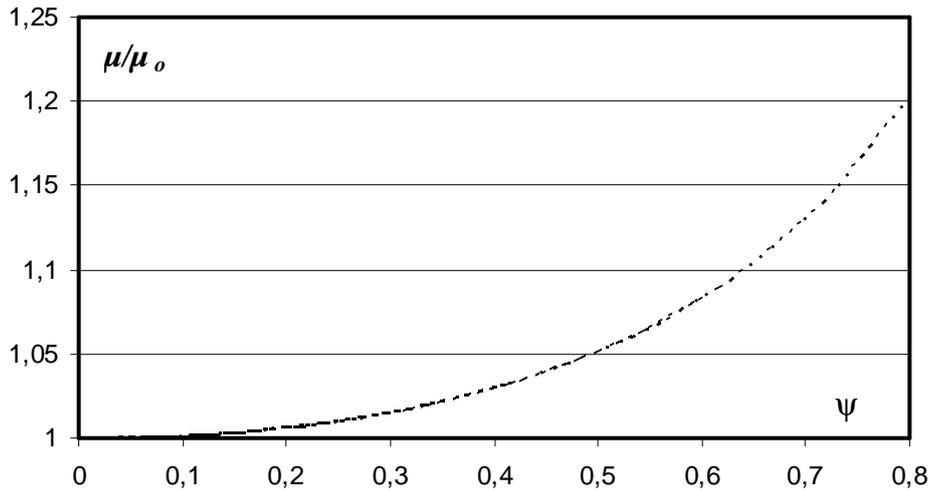


Figure 2.9 : Courbes  $\mu / \mu_o = f(\psi)$  tracées selon la relation (2.28).

Nous pouvons ainsi observer que le rapport  $\mu/\mu_o$  diminue lorsque le paramètre adimensionnel  $\psi$  décroît. Il tend vers l'unité pour les faibles valeurs de  $\psi$ . Ainsi, si l'on souhaite évaluer le débit volume  $Q$  écoulé par le canal en application de la relation (2.16), établie sous l'hypothèse que l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement est négligeable, il est recommandé d'utiliser un dispositif caractérisé par de faibles valeurs de  $\psi$ . De plus, au regard de la figure 2.9, il est possible de conclure que le paramètre adimensionnel  $\psi$  doit être au moins inférieur à 0,35, valeur pour laquelle  $\mu/\mu_o \cong 1,013$ . Pour les valeurs de  $\psi < 0,35$ , l'évaluation du débit volume  $Q$ , par application de la relation (2.16), sera inférieure à 1,3%.

Pour toutes les valeurs du facteur cinétique  $\delta$ , le coefficient de débit  $\mu$  peut être exprimé en fonction du seul paramètre adimensionnel  $\psi$ . En effet, tenant compte de la relation (2.15), la relation (2.28) permet d'écrire :

$$\mu = \frac{1}{4} \cos^{-3/2}(\alpha/3) \left[ 1 + \frac{1}{16} \psi^2 \cos^{-3}(\alpha/3) \right]^{3/2} \tag{2.30}$$

avec :  $\cos(\alpha) = -\psi$ .

La variation de  $\mu = f(\psi)$  a été représentée sur la figure 2.10, en application de la relation (2.30). Dans cette représentation, l'influence des paramètres adimensionnels  $\beta$  et  $P^*$  n'est pas apparent mais plutôt implicite. Elle nous sera cependant très utile lors de la validation expérimentale de la relation (2.30).

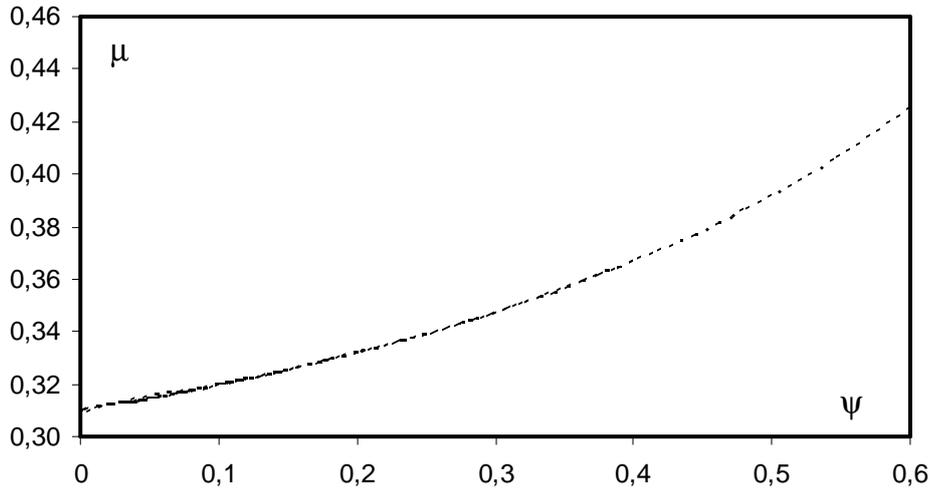


Figure 2.10 : Variation théorique de  $\mu = f(\psi)$ , selon la relation (2.30).

La relation (2.27) peut s'écrire plus simplement, en tenant compte de (2.14) :

$$\frac{\mu}{\mu_o} = (1 + \psi^2 \mu_o^2)^{3/2}$$

soit :

$$\mu = \mu_o (1 + \psi^2 \mu_o^2)^{3/2} \tag{2.31}$$

En substituant la relation (2.31) dans (2.25), le débit volume  $Q$  s'exprime par :

$$Q = \mu_o (1 + \psi^2 \mu_o^2)^{3/2} b \sqrt{2g} h_d^{3/2} \tag{2.32}$$

où le coefficient de débit  $\mu_o$  est, pour rappel, défini par la relation (2.15), soit :

$$\mu_o = \frac{1}{4} \cos^{-3/2}(\alpha/3) \tag{2.15}$$

avec :  $\cos(\alpha) = -\psi$ .

La relation (2.32) exprime ainsi le débit volume  $Q$  qui s'écoule à travers le dispositif de mesure étudié, tout en tenant compte de l'effet de la vitesse d'approche de l'écoulement, c'est à dire de l'effet du facteur cinétique  $\delta$ . Celui-ci est donné, en tenant compte des relations (2.12) et (2.14), par :

$$\delta = (\psi \mu_o)^2 \tag{2.33}$$

**Exemple d'application 2 :**

Reprenons les données de l'exemple d'application 1 et déterminons le débit volume  $Q$  écoulé par le même canal d'amenée horizontal de section rectangulaire de largeur  $B = 1,00\text{m}$ , au moyen du dispositif étudié (figure 2.1) dont la largeur de l'échancrure est  $b = 0,50\text{m}$  et la hauteur de pelle est  $P = 0,40\text{m}$ . La vitesse d'approche de l'écoulement étant supposée non négligeable, une mesure limnimétrique a indiqué que la hauteur de déversement franchissant la hauteur de pelle  $P$  est  $h_d = 0,60\text{ m}$ .

**Solution :**

Le taux de contraction  $\beta$  ainsi que la hauteur relative de pelle  $P^*$  sont les mêmes que ceux de l'exemple d'application 1, soit :  $\beta = 0,50$  et  $P^* = 2/3$ . Ceci implique que le paramètre adimensionnel  $\psi$  garde aussi la même valeur, soit  $\psi = \beta/(1 + P^*) = 0,50/(1 + 2/3) = 0,30$ . La valeur du coefficient de débit  $\mu_o$  est aussi égale à celle de l'exemple d'application 1, soit :

$$\mu_o \approx 0,3424$$

En application de la relation (2.32), le débit volume  $Q$  recherché, est :

$$Q = 0,3424 \times [1 + (0,30^2 \times 0,3424^2)]^{3/2} \times 0,50 \sqrt{2 \times 9,81} \times (0,60)^{3/2} = 0,358 m^3 / sec.$$

Nous pouvons ainsi constater que l'écart obtenu entre le débit  $Q_1$  de l'exemple d'application 1 et le débit  $Q_2$  de l'exemple d'application 2 est :

$$1 - \frac{Q_1}{Q_2} = \left( 1 - \frac{0,3524}{0,358} \right) \cong 1,57\%$$

Ceci correspond à l'erreur relative qui aurait entaché l'évaluation du débit volume  $Q$ , si l'on avait admis que la vitesse d'approche de l'écoulement était négligeable.

Le coefficient de débit  $\mu$  est, selon la relation (2.31) :

$$\mu = \mu_o \left( 1 + \psi^2 \mu_o^2 \right)^{3/2} = 0,3424 \times (1 + 0,30^2 \times 0,3424^2)^{3/2} = 0,3460$$

Ainsi :

$$1 - \frac{\mu_o}{\mu} = \left( 1 - \frac{0,3424}{0,3460} \right) \cong 1,04\%$$

**II.7. Conclusion**

La deuxième partie de notre travail a eu pour objectif l'étude théorique d'un nouvel appareil semi-modulaire destiné à la mesure de débit dans les canaux ouverts. Notre choix s'est porté sur un déversoir de section rectangulaire à paroi épaisse et présentant une contraction verticale et horizontale. Dont l'axe du déversoir se confond avec celui du canal dans lequel il est inséré.

L'emplacement du déversoir dans un canal de section droite rectangulaire constante provoque un rétrécissement brusque de la section d'écoulement, ce qui induit une contraction verticale et horizontale de la veine liquide s'écoulant dans le canal.

L'écoulement dans le canal d'amenée est en régime fluvial et se transforme en un écoulement torrentiel à l'aval du dispositif, une section de contrôle caractérisée par un écoulement en régime critique se localise quelque part à l'intérieur du dispositif.

Pour atteindre le but visé par cette partie, nous avons eu recours à l'application de l'équation de quantité de mouvement entre une section droite prise dans le canal d'amené ainsi que la section de l'écoulement critique

à l'intérieur du dispositif de mesure. Cette application a tenu compte de la force de réaction de la paroi amont du dispositif opposée à l'écoulement, par contre les forces de frottement sur le fond et sur les parois du canal ont été négligées.

L'équation de quantité de mouvement a permis de conclure que la hauteur relative de déversement  $h_d^* = h_d/h_c$  est fonction du seul paramètre adimensionnel  $\psi$  et par conséquent du paramètre  $\beta = b/B$ , ainsi que du paramètre  $P^* = P/h_d$ , où  $h_d$  est la profondeur de déversement au-dessus du seuil du dispositif, mesurée à l'amont dans le canal d'amenée,  $b$  est la largeur de la section du dispositif dans laquelle s'effectue l'écoulement,  $B$  représente la largeur du canal d'amenée,  $P$  et  $h_c$  représentent respectivement la hauteur de pelle et la profondeur de l'écoulement critique à l'intérieur du dispositif.

L'équation obtenue est du troisième degré vis-à-vis de la hauteur relative de déversement  $h_d^*$ , la résolution mathématique de cette dernière nous a permis de déterminer la variable recherchée.

La vitesse d'approche a été négligée, dans un premier temps, et le coefficient de débit a été déterminé par la combinaison de l'équation générale de débit des déversoirs à échancrure rectangulaire avec la condition de criticité, il a été trouvé que le coefficient de débit  $\mu$  est fonction du seul paramètre adimensionnel  $\psi$  et par conséquence au paramètre  $\beta$ , ainsi que du paramètre  $P^*$ . Dans un second temps, l'effet de la vitesse d'approche sur le coefficient d'écoulement a été quantifié à l'aide des relations donnant le débit écoulé à travers le dispositif avec et sans prise en compte de la vitesse d'approche de l'écoulement, dans lesquels on a introduit la relation de la charge totale relative de déversement  $H_d^*$ .

A travers une présentation graphique, nous avons pu montrer comment l'effet de la vitesse d'approche peut influencer sur le coefficient de débit et dans quel taux.

L'expression du débit montre que l'appareil est de type semi-modulaire, dépendant des caractéristiques géométriques  $b$ ,  $B$  et  $P$  et de la lame de déversement  $h_d$ .

Dans la troisième partie de notre étude, nous exposerons d'une part le protocole expérimental ayant servi à tester l'appareil étudié, et valider les expressions théoriques que nous avons établies d'autre part.

## **CHAPITRE III**

# **VALIDATION EXPÉRIMENTALE**

### III.1. Introduction

La présente partie de notre étude a pour but, la validation expérimentale des relations issues du développement théorique du deuxième chapitre.

Afin de mettre au point un nouveau dispositif de mesure des débits dans les canaux ouverts, les relations théoriques développées au-cours du chapitre précédent seront discutées et validées à l'aide des résultats expérimentaux. Et pour donner plus de validité à ces relations théoriques des tableaux de comparaisons et des graphiques seront établis sur la base de ces dernières d'un coté, et les résultats issus de l'expérimentation d'autre coté.

Cette partie sera entamée par la description du banc d'essais et des dispositifs testés, enrichie par des schémas de définitions et des photographies.

### III.2. Description du banc d'essai

La figure 3.1 représente schématiquement le banc d'essais destiné à tester les dispositifs ci-après décrits. Comme l'indique la figure 3.1, le banc d'essais est constitué essentiellement d'un canal de forme rectangulaire alimenté en circuit fermé par une pompe axiale. Celle-ci aspire l'eau d'un réservoir ouvert d'alimentation et de récupération ; la refoule par l'intermédiaire d'une conduite circulaire en PVC dans un bassin tranquillisateur, alimentant à leur tour le canal de mesure.

Le bassin d'alimentation et de récupération est doté d'un tranquillisateur d'eau spécialement aménagé afin d'éviter les perturbations de la surface libre qui peuvent engendrer des perturbations du débit refoulé par la pompe.

Une plaque perforée, insérée dans le bassin d'alimentation, joue également le rôle de tranquillisation de l'écoulement avant son entrée dans le canal principal. Cette plaque perforée ne figure pas sur le schéma de la figure 3.1.

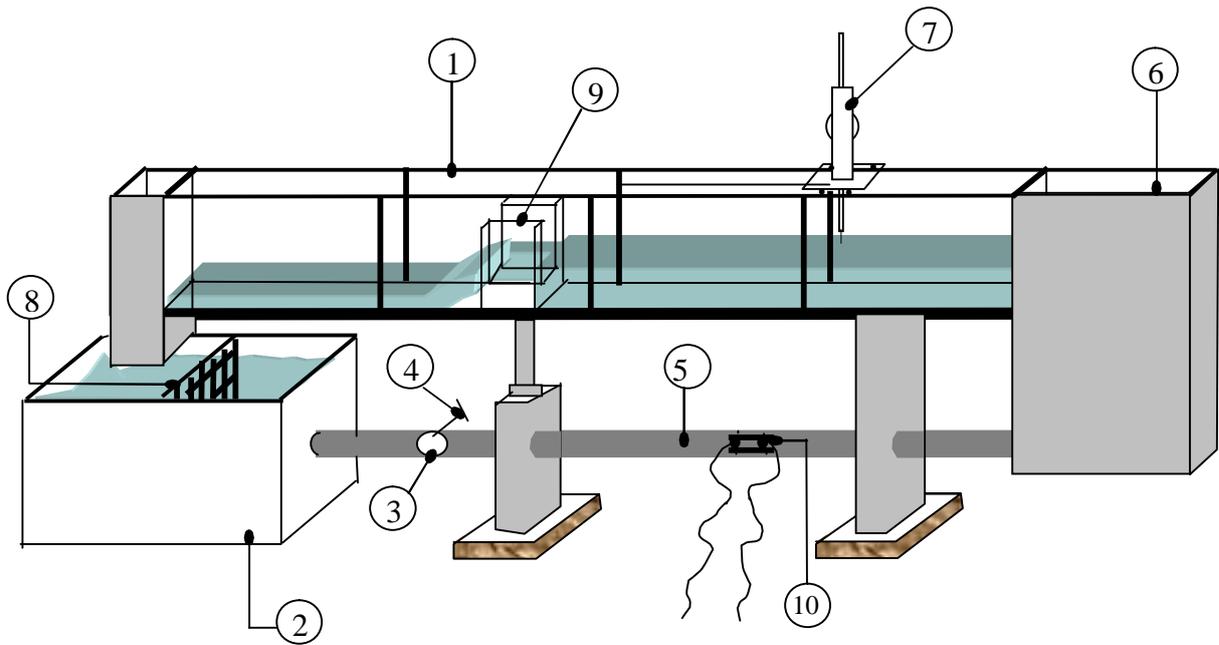


Figure 3.1 : Schéma du banc d'essais utilisé.

1- Canal rectangulaire, 2- Bassin d'alimentation et de récupération, 3- Pompe, 4-Vanne, 5-Conduite en PVC, 6-Bassin d'alimentation, 7-Limnimètre, 8-Graille, 9-Déversoir, 10-Débitmètre

La pompe axiale est dotée d'une vanne de réglage des débits qui permet ainsi d'effectuer les essais dans une large gamme de débits.

La vue d'ensemble du banc d'essais ainsi décrit est représentée sur les photographies 3.1 à 3.4.



Photographie 3.1 : Vue d'ensemble du banc d'essais montrant :

- le réservoir d'alimentation et de récupération des eaux, - la vanne de réglage des débits, - la conduite circulaire d'alimentation, - le bassin d'alimentation, - le canal de mesure



Photographie 3.2 : Vue de la partie aval du canal de mesure, montrant :

- Le réservoir de récupération des eaux, - la grille perforée de tranquillisation, - la vanne de réglage des débits.



Photographie 3.3 : Vue de la pompe axiale utilisée insérée dans la conduite circulaire à l'aval du bassin d'alimentation et de récupération des eaux



Photographie 3.4 : Vue du bassin d'alimentation, montrant :

- l'écoulement fluvial dans le canal de mesure, - le limnimètre ayant servi à la mesure des profondeurs

### III.3. Description et caractéristiques des dispositifs testés

La figure 3.2 représente, en perspective, la forme des dispositifs testés. Ces derniers sont insérés dans une section droite d'un canal rectangulaire de largeur  $B$  et dont on désire évaluer le débit écoulé.

Les dispositifs sont confectionnés des plaques de plexy-glasse transparent, ces plaques sont découpées de tel sorte à former des déversoirs avec une échancrure rectangulaire de largeur  $b$  inférieure à la largeur du canal  $B$ , présentant une hauteur de pelle  $P$ , et qui s'étant sur une certaine longueur.

La mise en place du dispositif de mesure dans le canal engendre une réduction ou un rétrécissement de la section de celui-ci. Le rapport  $\beta = b/B$  définit le taux de contraction latérale et le rapport  $P^* = P/h_d$  représente le taux de contraction verticale, le taux de contraction de la section est défini par le rapport  $\psi = \beta / (1 + P^*)$ .

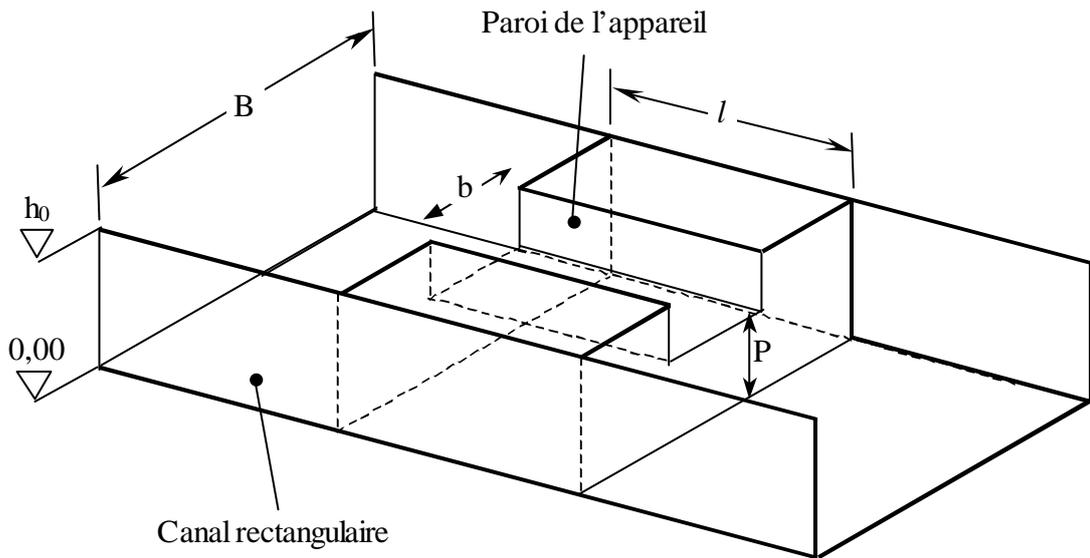


Figure 3.2 : Représentation schématique en perspective du dispositif testé.

Les photographies 3.5 et 3.6 représentent des vues du dispositif inséré dans le canal.



Photographie 3.5 : Vue d'aval du dispositif.



Photographie 3.6 : Vue d'ensemble du dispositif.

Afin de donner plus de validité aux relations théorique développées au-cours du deuxième chapitre, treize dispositifs sont testés, en variant la largeur de l'échancrure  $b$  d'une part et la hauteur de pelle d'autre part. Tous ces dispositifs sont insérés dans le même canal de largeur  $B$ . les caractéristiques géométriques des dispositifs testés sont regroupées dans le tableau 3.1.

Tableau 3.1 : Caractéristiques géométriques des dispositifs testés.

Dispositif	Largeur de l'échancrure $b$ (cm)	Hauteur de pelle $P$ (cm)	Largeur du canal $B$ (cm)	Taux de contraction $\beta = b/B$
01	14,7	10	29,30	0,501
02	14,7	08	29,30	0,501
03	14,7	06	29,30	0,501
04	13,2	08	29,30	0,450
05	13,2	06	29,30	0,450
06	11,7	10	29,30	0,399
07	11,7	08	29,30	0,399
08	11,7	06	29,30	0,399
09	10,2	08	29,30	0,348
10	10,2	06	29,30	0,348
11	8,8	10	29,30	0,300
12	8,8	08	29,30	0,300
13	8,8	06	29,30	0,300

Comme l'indique le tableau 3.1, nous nous sommes plus particulièrement intéressés aux faibles et moyens valeurs du paramètre  $\beta$  ( $\beta \leq 0,501$ ). En effet, les faibles valeurs de  $\beta$  entraîne de grandes valeurs de la profondeur de l'écoulement et dont la lecture est par suite aisée. Si dans un canal de forme rectangulaire le débit à mesurer est associé à une faible profondeur, la lecture de celle-ci risque d'entraîner des erreurs relatives assez importantes. Afin de réduire ces erreurs, il est recommandé de surélever le plan d'eau par la mise en place d'un dispositif à faible échancrure  $b$  et donc à faible valeur de  $\beta$ . En outre, les profondeurs importantes liées aux faibles valeurs de  $\beta$  induisent une faible valeur de la hauteur capable de la vitesse d'approche de l'écoulement. Celle-ci peut donc être négligée sans entraîner une erreur notable sur la mesure du débit.

Les valeurs de  $P$  sont choisies arbitrairement, ces valeurs donnent une large gamme de valeurs de  $P^* = P/h_d$  en fonction de la profondeur de diversement  $h_d$ .

#### III.4. Description de l'écoulement

Cette partie de notre étude a pour but de décrire le comportement de l'écoulement après la mise en place du dispositif. Ce dernier engendre un rétrécissement brusque le la section d'écoulement.

La figure 3.3 représente un schéma simplifié de l'écoulement de l'amont à l'aval du dispositif testé.

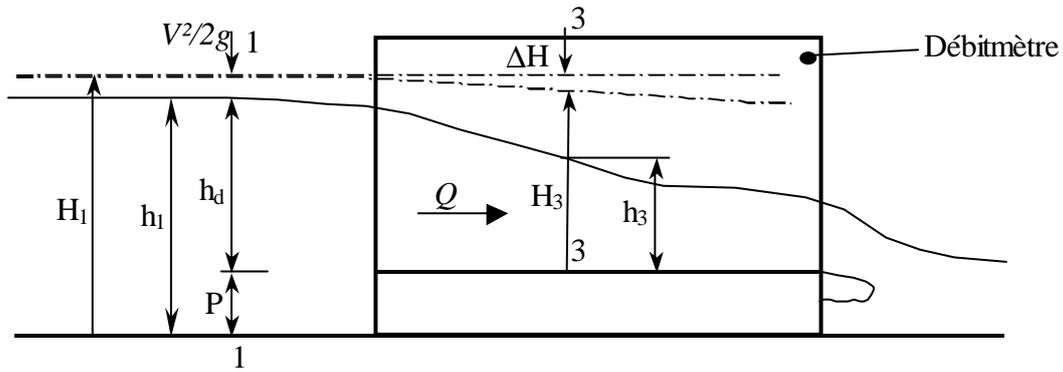


Figure 3.3 : Schéma simplifié de l'écoulement à l'amont et à l'aval du dispositif testé.  
Ecoulement de gauche à droite.

La figure 3.3 montre que le plan d'eau à l'aval du débitmètre étudié est quasi horizontal. Un léger abaissement du plan d'eau peut cependant être observé à l'approche immédiate du dispositif. Dans le dispositif un grand abaissement du plan d'eau est observé et continu jusqu'à l'aval immédiat du dispositif, et l'écoulement qui règne est de nature torrentielle.

Afin d'observer plus en détails l'écoulement à l'amont, à l'aval et au droit du dispositif, nous présentons sur les photographies 3.7 à 3.9 quelques vues de cet écoulement.



Photographie 3.7 : Vue du profil en long de l'écoulement de l'amont à l'aval du dispositif. Ecoulement de droite à gauche.

La photographie 3.7 montre clairement la nature fluviale de l'écoulement dans le canal de mesures, à l'amont immédiat du dispositif. Cet état de l'écoulement peut être observé pour tous les dispositifs testés. Elle montre également la nature torrentielle de l'écoulement à l'aval du dispositif.



Photographie 3.8 : Vue de l'écoulement à l'intérieure du dispositif.  
Ecoulement de gauche à droite.

La photographie 3.8 montre clairement le fort abaissement du plan d'eau entre l'entrée et la sortie du dispositif, ce qui permet de conclure que la transformation de l'écoulement fluvial à l'écoulement torrentiel se fait à l'intérieur du dispositif.



Photographie 3.9 : Vue de l'écoulement à l'aval du dispositif.  
Ecoulement de droite à gauche.

La photographie 3.9 montre l'écoulement à l'aval d'un des dispositifs testés. Nous pouvons observer la lame liquide déversante qui tombe et qui crée une perturbation de l'écoulement à la surface.

### III.5. Appareillage de mesure

#### III.5.1. Mesure de la profondeur

La mesure de la profondeur de l'écoulement à l'intérieur et à l'amont du dispositif testé est un élément important dans l'évaluation du débit écoulé. Cette profondeur correspond également, dans le cas qui intéresse notre étude, à la profondeur déversée au-dessus du seuil du dispositif. Plus la mesure de la profondeur s'effectue avec précision et plus l'évaluation du débit est acceptable. Il est donc recommandé de procéder à la mesure des profondeurs par un appareillage aussi précis que possible.

Dans nos essais, nous avons utilisé un limnimètre à vernier à double précision, gradué au  $1/10^{\text{ème}}$ . Il s'agit donc d'un limnimètre dont la précision est tout à fait requise pour la nature des essais envisagés. De plus, la géométrie des dispositifs testés a pour particularité de rendre quasi horizontal le plan d'eau à l'amont du dispositif, éliminant toute perturbation de la surface libre. Ceci contribue sans doute à une meilleure précision dans la lecture des profondeurs au moyen du limnimètre utilisé.

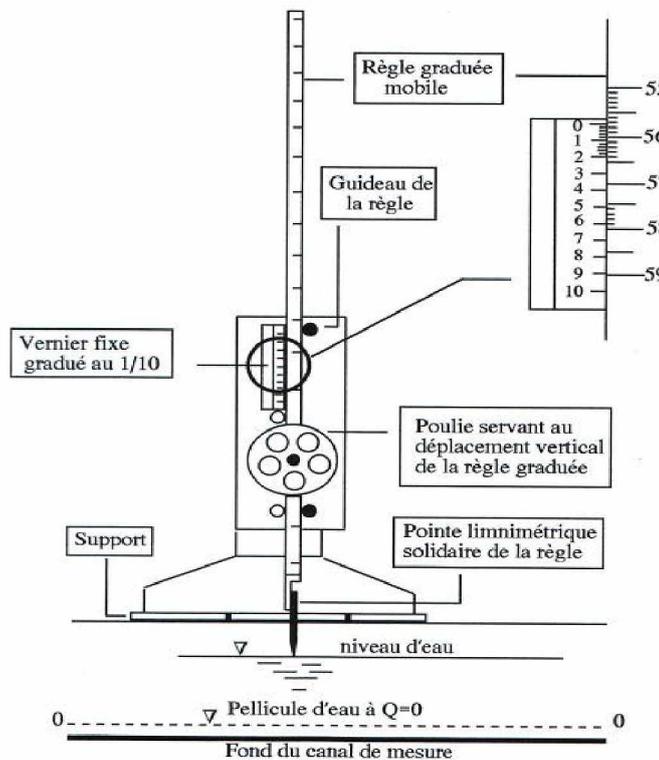


Figure 3.4 : Schéma détaillé du limnimètre à vernier utilisé.

La figure 3.4 montre le schéma simplifié du limnimètre utilisé, représenté également sur la photographie 3.10.



Photographie 3.10 : Vue de profil du limnimètre à vernier utilisé.

Le limnimètre est formé d'une règle métallique profilée en "U" et graduée sur une seule face. Elle est munie, à sa partie inférieure d'une pointe verticale, appelée pointe limnimétrique, dont le rôle est d'effleurer la surface de l'eau.

Pour chaque dispositif testé, on procède à la mesure de la profondeur du seuil. La lecture obtenue est retranchée de toutes les lectures de profondeurs obtenues à différents débits volumes  $Q$  pour obtenir enfin les différentes profondeurs de diversement.

Le vernier est gradué en 50 parties égales et à chaque millimètre de la règle correspond une graduation de  $49/50$  de mm. L'erreur absolue commise sur la lecture est donc de :

$$(1 - 49/50) = 0,02 \text{ mm}$$

Il faut cependant signaler que cette erreur absolue est liée à l'utilisation de l'appareil et ne correspond pas à l'erreur commise sur la mesure de la profondeur dans le canal de mesure si aucune perturbation n'affecte la surface libre de l'écoulement.

La lecture sur le limnimètre s'effectue en deux étapes : On procède d'abord à la lecture de la graduation sur la règle, située immédiatement en haut du zéro du vernier, puis on effectue la lecture du nombre de cinquantièmes en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapprochée d'une division de la règle. Un exemple est donné par le détail du vernier représenté sur la figure 4 qui montre, dans la position indiquée, que la mesure correspond à 55,72 cm.

### **III.5.2. Mesure du débit $Q$**

Le débit volume  $Q$  écoulé par le canal doit être mesuré et comparé avec celui calculé par la formule du débit du dispositif étudié, dans le cas où celle-ci pourrait être déterminée.

Etant donné que notre étude s'intéresse à la mesure des débits dans les canaux ouverts, la mesure du débit volume doit donc être déterminée avec la plus grande précaution et précision possible. A cet effet, nous avons opté pour un débitmètre à ultrasons, dont la précision est de l'ordre de 0,1 à 0,2 l/s. Cet appareil est représenté sur la photographie 3.11.



Photographie 3.11 : Vue du débitmètre à ultrasons inséré dans la conduite d'alimentation du canal de mesures.

Le débitmètre à ultrasons utilisé est constitué de trois parties distinctes.

- Une règle graduée dotée d'une chaînette inoxydable. La règle graduée sert à fixer la position désirée des sondes de l'appareil (transducteurs), tandis que la chaînette sert à maintenir l'ensemble contre la conduite d'alimentation. La distance entre les sondes est dictée par l'appareil lui-même.
- Deux sondes identiques (transducteurs), placées à l'extérieur de la conduite d'alimentation et maintenues fixes grâce à la règle graduée et à la chaînette. Chacun des transducteurs joue le rôle d'émetteur et de récepteur des ondes ultrasonores. Les transducteurs sont placés dans un plan horizontal à la canalisation, en évitant les points bas et haut de celle-ci. En effet, le point haut, sujet à une éventuelle cavitation, risque de fausser les calculs de l'unité électronique. Le point bas de la canalisation risque également de fausser le calcul de l'unité électronique car il est sujet à d'éventuels dépôts solides.
- Un tableau numérique à cristaux liquides (unité électronique) qui affiche la valeur du débit écoulé par la conduite d'alimentation. L'affichage peut être obtenu, selon la préférence, en  $m^3/s$  ou en l/s. L'appareil affiche également la valeur de la vitesse moyenne de l'écoulement dans la conduite d'alimentation.
- Deux câbles, transmettant les signaux émis, relient entre eux les sondes et l'unité électronique.

L'affichage du débit sur le tableau d'affichage numérique est tributaire de la valeur du diamètre intérieur de la conduite d'alimentation, de son épaisseur ainsi que de la nature du matériau la constituant. Ce sont des valeurs que l'utilisateur doit introduire dans le programme du logiciel de calcul du débitmètre. Le mode de

calcul utilisé par l'unité électronique est le principe du temps de transit. Le transducteur convertit une énergie électrique en une énergie mécanique sous forme de vibrations d'un cristal piézo-électrique qui émet des pulsations lorsqu'il fonctionne en mode émission. Inversement, lorsqu'il fonctionne en mode réception, le transducteur convertit la pulsation en énergie électrique. Les pulsations sont traitées et transformées en valeurs numériques (débit, vitesse, volume...).

L'un des avantages certains du débitmètre à ultrasons est d'avoir la capacité de mesurer le débit écoulé sans perturbation de l'écoulement dans la conduite d'alimentation. Les sondes se fixent sur la conduite sans pénétration à l'intérieur.

L'un des inconvénients que nous pouvons observer, lors de l'utilisation du débitmètre à ultrasons, est sa sensibilité aux vibrations de la conduite d'alimentation engendrées par le fonctionnement de la pompe.

### *III.6. Procédure expérimentale*

Avant d'entamer la procédure expérimentale, il est nécessaire de rappeler l'objectif principal de cette partie de notre étude. Il s'agit donc de tester les dispositifs de mesure de débit que nous avons décrits précédemment, et valider les relations théoriques donnant le débit et son coefficient trouvé au cours de la deuxième partie.

Pour ce faire, nous installons dans le canal de mesures un dispositif de caractéristiques géométriques connues. Après avoir procédé à la meilleure étanchéité possible entre les parois du dispositif et celles du canal, nous faisons fonctionner la pompe à un débit donné par manipulation de la vanne de réglage du débit. Après une certaine durée, l'écoulement peut être considéré comme étant permanent.

Après cette première étape, nous procédons à la mesure de la profondeur de l'écoulement à l'intérieure et à l'amont du dispositif testé, grâce au limnimètre à vernier. L'analyse des résultats des nombreux essais que nous avons effectués, a montré que l'écoulement est quasi parallèle au fond du canal, à la distance de (60 à 90cm) comptée à l'amont du dispositif. A la profondeur ainsi mesurée, correspond une valeur du débit écoulé que le débitmètre à ultrasons nous indique sur le tableau d'affichage numérique.

Cette opération se répète en modifiant le débit par manipulation de la vanne de réglage du débit. Nous obtenons ainsi, pour le même dispositif testé, un échantillon de valeurs des profondeurs mesurées ainsi que les valeurs des débits qui leurs correspondent.

Les manipulations ci-dessus indiquées sont reproduites pour les treize dispositifs concernés par nos essais. Le débit volume  $Q$  ainsi mesuré varie dans la large gamme :

$$1,40 \text{ l/s} \leq Q \leq 26,60 \text{ l/s}$$

Tandis que la profondeur de déversement  $h_d$  est telle que :

$$3,662 \text{ cm} \leq h_d \leq 28,744 \text{ cm}$$

Les essais que nous avons effectués nous ont permis d'obtenir un échantillon de 240 couples de valeurs ( $Q$ ,  $h_d$ ) et sur lesquels s'est reposée l'interprétation de nos résultats.

Le tableau 3.2 indique la gamme utilisée des débits volumes  $Q$  ainsi que celle des profondeurs mesurées  $h_d$  pour chacun des dispositifs testés.

Tableau 3.2 : Gamme des débits et des profondeurs utilisées pour chaque dispositif testé.

Dispositif	Contraction latérale $\beta$	Hauteur de pelle $P$	Nombre de mesures	Gamme des débits	Gamme des profondeurs $h_d$
1	0,501	10	20	$2,08 \text{ l/s} \leq Q \leq 26,60 \text{ l/s}$	$4,630 \text{ cm} \leq h_d \leq 23,972 \text{ cm}$
2	0,501	8	20	$1,45 \text{ l/s} \leq Q \leq 23,47 \text{ l/s}$	$3,662 \text{ cm} \leq h_d \leq 21,990 \text{ cm}$
3	0,501	6	20	$2,00 \text{ l/s} \leq Q \leq 23,17 \text{ l/s}$	$4,412 \text{ cm} \leq h_d \leq 21,620 \text{ cm}$
4	0,45	8	20	$1,63 \text{ l/s} \leq Q \leq 24,67 \text{ l/s}$	$4,258 \text{ cm} \leq h_d \leq 24,698 \text{ cm}$
5	0,45	6	20	$2,00 \text{ l/s} \leq Q \leq 21,52 \text{ l/s}$	$4,800 \text{ cm} \leq h_d \leq 22,324 \text{ cm}$
6	0,399	10	20	$2,37 \text{ l/s} \leq Q \leq 22,13 \text{ l/s}$	$5,908 \text{ cm} \leq h_d \leq 25,332 \text{ cm}$
7	0,399	8	20	$1,67 \text{ l/s} \leq Q \leq 24,92 \text{ l/s}$	$4,642 \text{ cm} \leq h_d \leq 27,020 \text{ cm}$
8	0,399	6	20	$1,88 \text{ l/s} \leq Q \leq 19,73 \text{ l/s}$	$5,028 \text{ cm} \leq h_d \leq 23,074 \text{ cm}$
9	0,348	8	20	$2,02 \text{ l/s} \leq Q \leq 18,82 \text{ l/s}$	$5,834 \text{ cm} \leq h_d \leq 24,834 \text{ cm}$
10	0,348	6	20	$2,90 \text{ l/s} \leq Q \leq 23,50 \text{ l/s}$	$7,300 \text{ cm} \leq h_d \leq 28,744 \text{ cm}$
11	0,3	10	20	$2,68 \text{ l/s} \leq Q \leq 18,30 \text{ l/s}$	$7,764 \text{ cm} \leq h_d \leq 27,204 \text{ cm}$
12	0,3	8	20	$2,77 \text{ l/s} \leq Q \leq 18,22 \text{ l/s}$	$7,892 \text{ cm} \leq h_d \leq 27,202 \text{ cm}$
13	0,3	6	20	$1,40 \text{ l/s} \leq Q \leq 17,77 \text{ l/s}$	$5,056 \text{ cm} \leq h_d \leq 26,534 \text{ cm}$

### III.7. Résultats expérimentaux

Les tableaux de 3.3 à 3.15 représentent les résultats expérimentaux ( $h_d$ ,  $Q$ ),  $h_s$  (hauteur de l'écoulement à la sortie du dispositif), ainsi que les paramètres adimensionnels  $P^* = P/h_d$ ,  $h_d^* = h_d/h_c$  et  $\psi = P/(1+P^*)$  des treize dispositifs testés. Ils représentent aussi les valeurs de la charge totale relative de déversement calculées selon la relation (2.10), ainsi que les valeurs du coefficient du débit expérimental obtenues par la formule suivante :

$$\mu_{exp} = \frac{Q}{b\sqrt{2g} h_d^{3/2}}$$

Tableau 3.3 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 14,7$  cm ;  $\beta=0,501$  ;  $P=10$  cm

$h_d$ (m)	$Q_{exp}$ (m <sup>3</sup> /s)	$P^*$	$h_c$	$h_{s\ exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi\ exp$	$H_d^*\ exp$	$\mu\ exp$
0,04630	0,00208	2,160	0,0274	0,0180	1,692	0,159	1,693	0,3212
0,09542	0,00643	1,048	0,0580	0,0490	1,645	0,245	1,646	0,3352
0,10986	0,00798	0,910	0,0670	0,0504	1,640	0,262	1,641	0,3367
0,11910	0,00900	0,840	0,0726	0,0508	1,641	0,272	1,642	0,3363
0,12902	0,01020	0,775	0,0789	0,0486	1,636	0,282	1,637	0,3380
0,13788	0,01137	0,725	0,0848	0,0514	1,626	0,290	1,628	0,3410
0,14786	0,01265	0,676	0,0911	0,0544	1,624	0,299	1,625	0,3417
0,15674	0,01382	0,638	0,0966	0,0568	1,623	0,306	1,625	0,3420
0,16466	0,01493	0,607	0,1017	0,0600	1,619	0,312	1,621	0,3432
0,17476	0,01628	0,572	0,1077	0,0646	1,622	0,319	1,624	0,3423
0,18346	0,01763	0,545	0,1136	0,0690	1,615	0,324	1,616	0,3446
0,19120	0,01882	0,523	0,1186	0,0719	1,611	0,329	1,613	0,3457
0,20136	0,02030	0,497	0,1248	0,0776	1,613	0,335	1,615	0,3450
0,20832	0,02140	0,480	0,1293	0,0802	1,611	0,339	1,613	0,3457
0,21544	0,02258	0,464	0,1340	0,0848	1,608	0,342	1,610	0,3468
0,22480	0,02412	0,445	0,1400	0,0900	1,606	0,347	1,608	0,3475
0,23316	0,02555	0,429	0,1455	0,0935	1,603	0,351	1,605	0,3485
0,23972	0,02660	0,417	0,1494	0,0985	1,604	0,354	1,606	0,3481

Tableau 3.4 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B =29,3$  cm ;  $b = 14,7$  cm ;  $\beta =0,501$  ;  $P =8$  cm.

$hd$ (cm)	$Q_{exp}$ (m <sup>3</sup> /s)	$P^*$	$h_c$	$h_{s\ exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi\ exp$	$H_d^*\ exp$	$\mu\ exp$
0,03662	0,00145	2,185	0,0215	0,0175	1,704	0,157	1,705	0,3178
0,04432	0,00195	1,805	0,0262	0,0179	1,693	0,179	1,694	0,3210
0,06076	0,00320	1,317	0,0364	0,0284	1,668	0,216	1,669	0,3281
0,07210	0,00418	1,110	0,0435	0,0357	1,656	0,237	1,657	0,3319
0,08564	0,00547	0,934	0,0520	0,0474	1,645	0,259	1,647	0,3350
0,10076	0,00703	0,794	0,0616	0,0533	1,637	0,279	1,638	0,3377
0,10900	0,00792	0,734	0,0666	0,0547	1,636	0,289	1,638	0,3379
0,12104	0,00935	0,661	0,0744	0,0552	1,626	0,302	1,628	0,3410
0,13256	0,01073	0,604	0,0816	0,0562	1,624	0,312	1,626	0,3415
0,14250	0,01198	0,561	0,0878	0,0568	1,623	0,321	1,624	0,3421
0,15480	0,01367	0,517	0,0959	0,0603	1,615	0,330	1,617	0,3446
0,16186	0,01460	0,494	0,1002	0,0631	1,616	0,335	1,617	0,3443
0,17040	0,01592	0,469	0,1061	0,0668	1,606	0,341	1,608	0,3475
0,17986	0,01723	0,445	0,1119	0,0715	1,607	0,347	1,609	0,3470
0,18698	0,01832	0,428	0,1165	0,0747	1,604	0,351	1,607	0,3479
0,19706	0,01973	0,406	0,1225	0,0808	1,609	0,356	1,611	0,3464
0,20480	0,02103	0,391	0,1278	0,0842	1,603	0,360	1,605	0,3485
0,21236	0,02230	0,377	0,1329	0,0869	1,598	0,364	1,600	0,3500
0,21990	0,02347	0,364	0,1375	0,0912	1,600	0,367	1,602	0,3495

Tableau 3.5 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 14,7$  cm ;  $\beta=0,501$  ;  $P=6$  cm

$hd$ (cm)	$Q_{exp}$ ( $m^3/s$ )	$P^*$	$h_c$	$h_{s\ exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi\ exp$	$H_d^*\ exp$	$\mu\ exp$
0,04412	0,00200	1,360	0,0266	0,0195	1,657	0,212	1,658	0,3314
0,05430	0,00272	1,105	0,0327	0,0241	1,663	0,238	1,664	0,3297
0,06644	0,00373	0,903	0,0404	0,0333	1,646	0,263	1,647	0,3348
0,08230	0,00518	0,729	0,0502	0,0460	1,638	0,290	1,640	0,3372
0,09366	0,00633	0,641	0,0574	0,0521	1,631	0,305	1,633	0,3393
0,09948	0,00695	0,603	0,0611	0,0547	1,629	0,313	1,630	0,3402
0,10654	0,00775	0,563	0,0657	0,0576	1,622	0,321	1,624	0,3423
0,11622	0,00888	0,516	0,0719	0,0590	1,616	0,330	1,617	0,3443
0,12494	0,00987	0,480	0,0772	0,0546	1,619	0,338	1,621	0,3431
0,13412	0,01103	0,447	0,0831	0,0569	1,614	0,346	1,616	0,3450
0,14524	0,01253	0,413	0,0905	0,0574	1,605	0,355	1,607	0,3478
0,15878	0,01433	0,378	0,0990	0,0638	1,604	0,364	1,607	0,3479
0,16682	0,01550	0,360	0,1043	0,0662	1,600	0,368	1,602	0,3494
0,17670	0,01692	0,340	0,1105	0,0708	1,599	0,374	1,601	0,3498
0,18178	0,01775	0,330	0,1141	0,0741	1,593	0,377	1,595	0,3517
0,19536	0,01978	0,307	0,1227	0,0805	1,592	0,383	1,595	0,3519
0,20720	0,02168	0,290	0,1304	0,0875	1,589	0,389	1,591	0,3531
0,21620	0,02317	0,278	0,1363	0,0937	1,586	0,392	1,589	0,3539

Tableau 3.6 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 13,2$  cm ;  $\beta=0,45$  ;  $P=8$  cm

$h_d$ (cm)	$Q_{exp}$ ( $m^3/s$ )	$P^*$	$h_c$	$h_{s\ exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi\ exp$	$H_d^*\ exp$	$\mu\ exp$
0,04258	0,00163	1,879	0,0250	0,0186	1,704	0,156	1,704	0,3179
0,05792	0,00263	1,381	0,0344	0,0241	1,686	0,189	1,686	0,3231
0,07180	0,00370	1,114	0,0431	0,0340	1,666	0,213	1,666	0,3289
0,08490	0,00477	0,942	0,0510	0,0443	1,664	0,232	1,664	0,3296
0,09870	0,00603	0,811	0,0597	0,0531	1,653	0,249	1,654	0,3328
0,11106	0,00722	0,720	0,0673	0,0582	1,650	0,262	1,652	0,3335
0,11986	0,00813	0,667	0,0729	0,0612	1,645	0,270	1,646	0,3352
0,13274	0,00953	0,603	0,0810	0,0561	1,638	0,281	1,640	0,3371
0,14228	0,01055	0,562	0,0867	0,0596	1,642	0,288	1,643	0,3362
0,15340	0,01202	0,522	0,0945	0,0623	1,623	0,296	1,624	0,3421
0,16412	0,01322	0,487	0,1007	0,0654	1,629	0,303	1,631	0,3400
0,17118	0,01408	0,467	0,1051	0,0679	1,629	0,307	1,631	0,3401
0,18568	0,01593	0,431	0,1141	0,0746	1,627	0,314	1,629	0,3406
0,19708	0,01750	0,406	0,1215	0,0805	1,623	0,320	1,624	0,3421
0,20860	0,01920	0,384	0,1292	0,0864	1,615	0,325	1,616	0,3447
0,21904	0,02067	0,365	0,1357	0,0924	1,614	0,330	1,616	0,3448
0,22948	0,02208	0,349	0,1418	0,0970	1,618	0,334	1,620	0,3436
0,23650	0,02320	0,338	0,1466	0,1012	1,614	0,336	1,615	0,3450
0,24698	0,02467	0,324	0,1527	0,1081	1,618	0,340	1,619	0,3437

Tableau 3.7 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 13,2$  cm ;  $\beta=0,45$  ;  $P=6$  cm

hd (cm)	$Q_{exp}$ (m <sup>3</sup> /s)	$P^*$	$h_c$	$h_{s\ exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi_{exp}$	$H_d^*_{exp}$	$\mu_{exp}$
0,04800	0,00200	1,250	0,0286	0,0202	1,678	0,200	1,679	0,3253
0,05196	0,00227	1,155	0,0311	0,0207	1,671	0,209	1,672	0,3273
0,06288	0,00305	0,954	0,0379	0,0268	1,659	0,230	1,660	0,3308
0,08324	0,00470	0,721	0,0506	0,0433	1,646	0,262	1,647	0,3347
0,09348	0,00562	0,642	0,0569	0,0488	1,642	0,274	1,643	0,3361
0,10924	0,00710	0,549	0,0666	0,0563	1,641	0,290	1,642	0,3363
0,12132	0,00843	0,495	0,0747	0,0578	1,625	0,301	1,627	0,3413
0,13082	0,00947	0,459	0,0806	0,0624	1,622	0,309	1,624	0,3422
0,14044	0,01043	0,427	0,0860	0,0582	1,632	0,315	1,634	0,3390
0,14612	0,01112	0,411	0,0898	0,0571	1,628	0,319	1,630	0,3404
0,15456	0,01225	0,388	0,0958	0,0589	1,614	0,324	1,616	0,3448
0,16604	0,01355	0,361	0,1024	0,0625	1,621	0,331	1,623	0,3425
0,17850	0,01527	0,336	0,1109	0,0687	1,610	0,337	1,612	0,3462
0,18498	0,01615	0,324	0,1151	0,0705	1,607	0,340	1,609	0,3472
0,19306	0,01725	0,311	0,1203	0,0751	1,605	0,343	1,607	0,3478
0,19988	0,01822	0,300	0,1247	0,0778	1,602	0,346	1,604	0,3487
0,20760	0,01923	0,289	0,1293	0,0814	1,605	0,349	1,607	0,3478
0,21452	0,02023	0,280	0,1338	0,0865	1,603	0,352	1,605	0,3483
0,22324	0,02152	0,269	0,1394	0,0912	1,602	0,355	1,604	0,3489

Tableau 3.8 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 11,7$  cm ;  $\beta=0,399$  ;  $P=10$  cm

$h_d$ (cm)	$Q_{exp}$ (m <sup>3</sup> /s)	$P^*$	$h_c$	$h_{s\ exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi_{exp}$	$H_d^*_{exp}$	$\mu_{exp}$
0,05908	0,00237	1,693	0,0347	0,0237	1,704	0,148	1,704	0,3180
0,10974	0,00612	0,911	0,0653	0,0567	1,680	0,209	1,681	0,3247
0,12020	0,00700	0,832	0,0715	0,0609	1,682	0,218	1,683	0,3241
0,12902	0,00797	0,775	0,0779	0,0654	1,656	0,225	1,657	0,3317
0,14092	0,00900	0,710	0,0845	0,0698	1,668	0,233	1,669	0,3283
0,15022	0,01002	0,666	0,0907	0,0681	1,655	0,240	1,656	0,3320
0,15770	0,01087	0,634	0,0958	0,0707	1,646	0,244	1,647	0,3348
0,16368	0,01153	0,611	0,0997	0,0720	1,642	0,248	1,643	0,3361
0,17350	0,01247	0,576	0,1050	0,0738	1,653	0,253	1,654	0,3329
0,18382	0,01368	0,544	0,1117	0,0766	1,645	0,258	1,646	0,3350
0,19038	0,01433	0,525	0,1152	0,0793	1,652	0,262	1,653	0,3330
0,20072	0,01563	0,498	0,1221	0,0847	1,644	0,266	1,645	0,3355
0,20998	0,01675	0,476	0,1278	0,0886	1,643	0,270	1,644	0,3359
0,21878	0,01800	0,457	0,1341	0,0920	1,631	0,274	1,632	0,3394
0,23034	0,01913	0,434	0,1397	0,0979	1,649	0,278	1,650	0,3340
0,24210	0,02090	0,413	0,1482	0,1049	1,634	0,282	1,635	0,3385
0,25332	0,02213	0,395	0,1539	0,1133	1,646	0,286	1,647	0,3350

Tableau 3.9 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 11,7$  cm ;  $\beta=0,399$  ;  $P=8$  cm

$h_d$ (cm)	$Q_{exp}$ ( $m^3/s$ )	$P^*$	$h_c$	$h_{s\ exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi_{exp}$	$H_d^*_{exp}$	$\mu_{exp}$
0,04642	0,00167	1,723	0,0275	0,0182	1,691	0,147	1,691	0,3216
0,05914	0,00240	1,353	0,0350	0,0228	1,689	0,170	1,690	0,3220
0,10884	0,00610	0,735	0,0652	0,0564	1,669	0,230	1,670	0,3278
0,12532	0,00768	0,638	0,0760	0,0640	1,648	0,244	1,649	0,3342
0,13840	0,00882	0,578	0,0833	0,0680	1,661	0,253	1,662	0,3304
0,14928	0,00995	0,536	0,0903	0,0691	1,652	0,260	1,654	0,3329
0,16260	0,01147	0,492	0,0993	0,0670	1,637	0,267	1,639	0,3375
0,17556	0,01277	0,456	0,1067	0,0699	1,646	0,274	1,647	0,3349
0,18898	0,01432	0,423	0,1151	0,0751	1,641	0,280	1,643	0,3363
0,20246	0,01593	0,395	0,1236	0,0822	1,637	0,286	1,639	0,3375
0,20902	0,01670	0,383	0,1276	0,0851	1,638	0,289	1,640	0,3372
0,21588	0,01767	0,371	0,1325	0,0893	1,630	0,291	1,631	0,3399
0,22328	0,01860	0,358	0,1371	0,0905	1,629	0,294	1,630	0,3402
0,22948	0,01933	0,349	0,1407	0,0968	1,631	0,296	1,633	0,3394
0,23568	0,02017	0,339	0,1447	0,0990	1,629	0,298	1,630	0,3401
0,24244	0,02107	0,330	0,1490	0,1033	1,628	0,300	1,629	0,3405
0,24884	0,02190	0,321	0,1529	0,1078	1,628	0,302	1,629	0,3404
0,25558	0,02280	0,313	0,1570	0,1107	1,628	0,304	1,629	0,3405
0,26172	0,02363	0,306	0,1608	0,1142	1,627	0,306	1,629	0,3406
0,27020	0,02492	0,296	0,1666	0,1193	1,622	0,308	1,624	0,3423

Tableau 3.10 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 11,7$  cm ;  $\beta=0,399$  ;  $P=6$  cm

$h_d$ (cm)	$Q_{exp}$ ( $m^3/s$ )	$P^*$	$h_c$	$h_{s\ exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi_{exp}$	$H_d^*_{exp}$	$\mu_{exp}$
0,05028	0,00188	1,193	0,0298	0,0203	1,688	0,182	1,689	0,3223
0,07726	0,00367	0,777	0,0464	0,0358	1,664	0,225	1,665	0,3295
0,08630	0,00433	0,695	0,0519	0,0418	1,663	0,235	1,664	0,3298
0,10596	0,00590	0,566	0,0638	0,0544	1,662	0,255	1,663	0,3301
0,11570	0,00683	0,519	0,0703	0,0603	1,645	0,263	1,646	0,3350
0,12402	0,00757	0,484	0,0753	0,0629	1,648	0,269	1,649	0,3343
0,13758	0,00890	0,436	0,0839	0,0667	1,640	0,278	1,642	0,3365
0,14410	0,00955	0,416	0,0879	0,0645	1,639	0,282	1,641	0,3369
0,15408	0,01063	0,389	0,0944	0,0668	1,632	0,287	1,633	0,3392
0,16426	0,01173	0,365	0,1008	0,0691	1,629	0,292	1,630	0,3401
0,17112	0,01243	0,351	0,1048	0,0705	1,633	0,295	1,634	0,3389
0,18132	0,01360	0,331	0,1113	0,0731	1,630	0,300	1,631	0,3399
0,18958	0,01460	0,316	0,1167	0,0765	1,625	0,303	1,627	0,3413
0,19954	0,01582	0,301	0,1230	0,0795	1,622	0,307	1,623	0,3424
0,21010	0,01710	0,286	0,1296	0,0849	1,621	0,310	1,623	0,3426
0,22020	0,01838	0,272	0,1360	0,0905	1,619	0,314	1,620	0,3433
0,23074	0,01973	0,260	0,1426	0,0947	1,618	0,317	1,620	0,3435

Tableau 3.11 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 10,2$  cm ;  $\beta=0,348$  ;  $P=8$  cm

$h_d$ (cm)	$Q_{exp}$ ( $m^3/s$ )	$P^*$	$h_c$	$h_{s,exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi_{exp}$	$H_d^*_{exp}$	$\mu_{exp}$
0,05834	0,00202	1,371	0,0342	0,0231	1,708	0,147	1,708	0,3168
0,06214	0,00225	1,287	0,0367	0,0252	1,691	0,152	1,692	0,3215
0,08306	0,00348	0,963	0,0492	0,0350	1,689	0,177	1,690	0,3221
0,09474	0,00427	0,844	0,0563	0,0438	1,683	0,189	1,684	0,3238
0,11632	0,00587	0,688	0,0696	0,0570	1,671	0,206	1,672	0,3273
0,12266	0,00635	0,652	0,0734	0,0609	1,672	0,211	1,672	0,3272
0,13190	0,00710	0,607	0,0790	0,0677	1,669	0,217	1,669	0,3281
0,13990	0,00780	0,572	0,0842	0,0704	1,662	0,221	1,663	0,3299
0,14826	0,00843	0,540	0,0887	0,0744	1,672	0,226	1,673	0,3270
0,16436	0,01000	0,487	0,0993	0,0802	1,655	0,234	1,656	0,3322
0,17394	0,01092	0,460	0,1053	0,0798	1,652	0,238	1,653	0,3331
0,18298	0,01178	0,437	0,1108	0,0785	1,651	0,242	1,652	0,3332
0,19564	0,01305	0,409	0,1186	0,0828	1,649	0,247	1,650	0,3338
0,20824	0,01437	0,384	0,1265	0,0857	1,647	0,251	1,648	0,3346
0,21934	0,01555	0,365	0,1333	0,0910	1,645	0,255	1,646	0,3350
0,22912	0,01658	0,349	0,1392	0,0962	1,647	0,258	1,648	0,3347
0,23780	0,01763	0,336	0,1450	0,1001	1,640	0,260	1,641	0,3366
0,24834	0,01882	0,322	0,1514	0,1058	1,640	0,263	1,642	0,3365

Tableau 3.12 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 10,2$  cm ;  $\beta=0,348$  ;  $P=6$  cm

$h_d$ (cm)	$Q_{exp}$ ( $m^3/s$ )	$P^*$	$h_c$		$h_d^*$ (m)	$\psi_{exp}$	$H_d^*_{exp}$	$\mu_{exp}$
0,07300	0,00290	0,822	0,0435	0,0299	1,678	0,191	1,678	0,3254
0,08562	0,00370	0,701	0,0512	0,0382	1,673	0,205	1,673	0,3269
0,09738	0,00450	0,616	0,0583	0,0466	1,670	0,215	1,670	0,3278
0,11028	0,00545	0,544	0,0663	0,0549	1,664	0,225	1,665	0,3294
0,12540	0,00658	0,478	0,0752	0,0637	1,668	0,235	1,669	0,3281
0,13848	0,00775	0,433	0,0838	0,0718	1,653	0,243	1,653	0,3329
0,15236	0,00900	0,394	0,0926	0,0782	1,646	0,250	1,647	0,3350
0,16692	0,01033	0,359	0,1015	0,0828	1,644	0,256	1,645	0,3354
0,17882	0,01143	0,336	0,1086	0,0788	1,647	0,261	1,648	0,3347
0,20098	0,01367	0,299	0,1223	0,0883	1,643	0,268	1,644	0,3357
0,20876	0,01448	0,287	0,1271	0,0900	1,642	0,270	1,643	0,3361
0,21960	0,01570	0,273	0,1342	0,0951	1,637	0,273	1,638	0,3377
0,22900	0,01667	0,262	0,1396	0,0984	1,640	0,276	1,641	0,3366
0,23718	0,01758	0,253	0,1447	0,1039	1,639	0,278	1,640	0,3369
0,24946	0,01892	0,241	0,1519	0,1101	1,642	0,281	1,643	0,3360
0,26044	0,02022	0,230	0,1588	0,1167	1,640	0,283	1,641	0,3367
0,26814	0,02117	0,224	0,1637	0,1215	1,638	0,284	1,639	0,3374
0,27718	0,02228	0,216	0,1694	0,1278	1,636	0,286	1,637	0,3380
0,28744	0,02350	0,209	0,1756	0,1319	1,637	0,288	1,639	0,3375

Tableau 3.13 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,

$H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 8,8$  cm ;  $\beta=0,3$  ;  $P=10$  cm

$h_d$ (cm)	$Q_{exp}$ ( $m^3/s$ )	$P^*$	$h_c$	$h_{s\ exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi_{exp}$	$H_d^*_{exp}$	$\mu_{exp}$
0,07764	0,00268	1,288	0,0456	0,0308	1,703	0,131	1,703	0,3182
0,08758	0,00323	1,142	0,0516	0,0388	1,696	0,140	1,697	0,3200
0,10814	0,00442	0,925	0,0636	0,0482	1,701	0,156	1,702	0,3186
0,13258	0,00608	0,754	0,0787	0,0652	1,685	0,171	1,685	0,3233
0,14586	0,00700	0,686	0,0864	0,0726	1,688	0,178	1,689	0,3224
0,15866	0,00800	0,630	0,0944	0,0808	1,680	0,184	1,680	0,3248
0,16576	0,00858	0,603	0,0990	0,0837	1,675	0,187	1,675	0,3263
0,17596	0,00937	0,568	0,1049	0,0880	1,677	0,191	1,678	0,3256
0,18346	0,01008	0,545	0,1102	0,0912	1,665	0,194	1,665	0,3292
0,19088	0,01067	0,524	0,1144	0,0937	1,668	0,197	1,669	0,3281
0,20066	0,01143	0,498	0,1198	0,0950	1,675	0,200	1,675	0,3263
0,21186	0,01250	0,472	0,1272	0,0954	1,666	0,204	1,667	0,3289
0,22566	0,01362	0,443	0,1346	0,0997	1,676	0,208	1,677	0,3259
0,24266	0,01533	0,412	0,1457	0,1068	1,665	0,212	1,666	0,3291
0,24932	0,01603	0,401	0,1501	0,1102	1,661	0,214	1,661	0,3304
0,25616	0,01670	0,390	0,1543	0,1128	1,661	0,216	1,661	0,3305
0,26410	0,01752	0,379	0,1593	0,1180	1,658	0,218	1,659	0,3311
0,27204	0,01830	0,368	0,1640	0,1227	1,659	0,219	1,660	0,3309

Tableau 3.14 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,

$H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 8,8$  cm ;  $\beta=0,3$  ;  $P=8$  cm

$h_d$ (cm)	$Q_{exp}$ ( $m^3/s$ )	$P^*$	$h_c$	$h_{s\ exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi_{exp}$	$H_d^*_{exp}$	$\mu_{exp}$
0,07892	0,00277	1,014	0,0465	0,0308	1,696	0,149	1,696	0,3201
0,08596	0,00315	0,931	0,0507	0,0347	1,694	0,155	1,695	0,3207
0,09446	0,00365	0,847	0,0560	0,0407	1,688	0,162	1,688	0,3225
0,10628	0,00437	0,753	0,0631	0,0457	1,685	0,171	1,685	0,3233
0,11874	0,00520	0,674	0,0709	0,0524	1,675	0,179	1,676	0,3260
0,12820	0,00583	0,624	0,0765	0,0609	1,676	0,185	1,676	0,3260
0,14108	0,00677	0,567	0,0845	0,0687	1,670	0,191	1,671	0,3276
0,14796	0,00727	0,541	0,0886	0,0723	1,670	0,195	1,671	0,3276
0,16300	0,00843	0,491	0,0978	0,0771	1,666	0,201	1,667	0,3288
0,17566	0,00945	0,455	0,1055	0,0824	1,664	0,206	1,665	0,3293
0,18276	0,01005	0,438	0,1100	0,0845	1,662	0,209	1,663	0,3300
0,19116	0,01077	0,418	0,1151	0,0866	1,660	0,211	1,661	0,3305
0,20180	0,01168	0,396	0,1216	0,0910	1,660	0,215	1,661	0,3306
0,20858	0,01228	0,384	0,1257	0,0888	1,659	0,217	1,660	0,3308
0,21848	0,01320	0,366	0,1319	0,0928	1,657	0,220	1,657	0,3316
0,22906	0,01417	0,349	0,1382	0,0980	1,657	0,222	1,658	0,3315
0,23954	0,01517	0,334	0,1447	0,1031	1,656	0,225	1,657	0,3319
0,24978	0,01617	0,320	0,1510	0,1087	1,655	0,227	1,655	0,3322
0,26038	0,01723	0,307	0,1575	0,1133	1,653	0,229	1,654	0,3328
0,27202	0,01822	0,294	0,1635	0,1209	1,664	0,232	1,665	0,3294

Tableau 3.15 : Valeurs des paramètres mesurés  $h_d$  et  $Q_{exp}$  et valeurs calculées des paramètres  $P^*$ ,  $h_c$ ,  $h_d^*$ ,  $\psi$ ,  $H_d^*$  et  $\mu$ .  $B=29,3$  cm ;  $b= 8,8$  cm ;  $\beta=0,3$  ;  $P=6$  cm

$h_d$ (cm)	$Q_{exp}$ ( $m^3/s$ )	$P^*$	$h_c$	$h_{s,exp}$	$h_d^*$ (m)	$\psi_{exp}$	$H_d^*_{exp}$	$\mu_{exp}$
0,05056	0,00140	1,187	0,0295	0,0224	1,711	0,137	1,711	0,3159
0,05708	0,00170	1,051	0,0336	0,0229	1,697	0,146	1,698	0,3198
0,06724	0,00218	0,892	0,0397	0,0265	1,692	0,159	1,692	0,3213
0,07558	0,00260	0,794	0,0446	0,0317	1,693	0,167	1,693	0,3210
0,08714	0,00325	0,689	0,0518	0,0369	1,682	0,178	1,683	0,3241
0,09804	0,00388	0,612	0,0583	0,0432	1,681	0,186	1,681	0,3245
0,13988	0,00672	0,429	0,0841	0,0688	1,664	0,210	1,665	0,3294
0,15150	0,00753	0,396	0,0907	0,0759	1,670	0,215	1,670	0,3277
0,16204	0,00838	0,370	0,0974	0,0814	1,663	0,219	1,664	0,3297
0,17156	0,00915	0,350	0,1033	0,0856	1,661	0,222	1,662	0,3303
0,18216	0,01005	0,329	0,1100	0,0892	1,657	0,226	1,657	0,3316
0,19720	0,01132	0,304	0,1190	0,0935	1,657	0,230	1,658	0,3315
0,20720	0,01220	0,290	0,1251	0,0973	1,656	0,233	1,657	0,3319
0,22044	0,01340	0,272	0,1332	0,0984	1,655	0,236	1,656	0,3322
0,23086	0,01438	0,260	0,1396	0,1013	1,653	0,238	1,654	0,3327
0,24450	0,01573	0,245	0,1483	0,1082	1,649	0,241	1,650	0,3339
0,25610	0,01688	0,234	0,1554	0,1150	1,648	0,243	1,649	0,3342
0,26534	0,01777	0,226	0,1608	0,1198	1,650	0,245	1,651	0,3335

Il apparaît des tableaux 3.3 à 3.15 que pour les dispositifs testés la hauteur critique apparaît sur du seuil du dispositif ce qui confirme l'hypothèse de démarrage.

### III.8. Validation des expressions théoriques

Cette partie de notre étude a pour but de valider les relations théoriques développées précédemment au deuxième chapitre, ces relations comprennent la hauteur relative de déversement  $h_d^*$ , la charge totale relative de déversement  $H_d^*$  et le coefficient de débit  $\mu$ .

#### III.8.1. Hauteur relative de déversement

La hauteur relative de déversement  $h_d^*$  comme elle a été déjà défini représente la hauteur de déversement  $h_d$  rapportée à la hauteur critique de l'écoulement  $h_c$  à l'intérieur du dispositif.

Nous avons représenté sur les figures 3.5 à 3.9 la variation théorique de la hauteur relative de déversement  $h_d^*$  en fonction de la hauteur relative de pelle  $P^*$  pour les différentes valeurs de la contraction latérale  $\beta$  testée selon la relation (2.7), ainsi que les points expérimentaux selon les tableaux de 3.3 à 3.15.

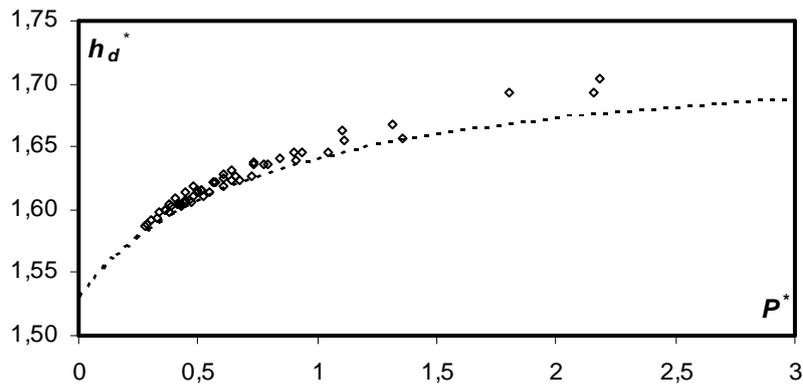


Figure 3.5 : Variation théorique et expérimentale de la hauteur relative de diversement  $h_d^*$  en fonction de  $P^*$ , pour les dispositifs avec  $\beta=0,501$  et  $P= 10cm ;8cm ;6cm$ .

----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

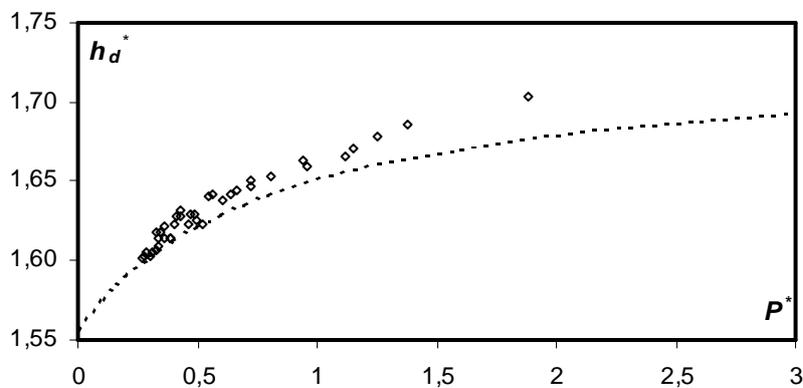


Figure 3.6 : Variation théorique et expérimentale de la hauteur relative de diversement  $h_d^*$  en fonction de  $P^*$ , pour les dispositif avec  $\beta=0,45$  et  $P= 8cm ;6cm$ .

----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

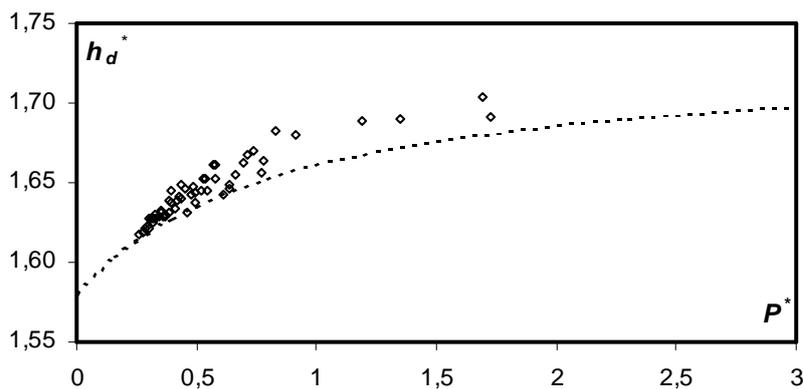


Figure 3.7 : Variation théorique et expérimentale de la hauteur relative de diversement  $h_d^*$  en fonction de  $P^*$ , pour les dispositif avec  $\beta=0,399$  et  $P= 10cm ;8cm ;6cm$ .

----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

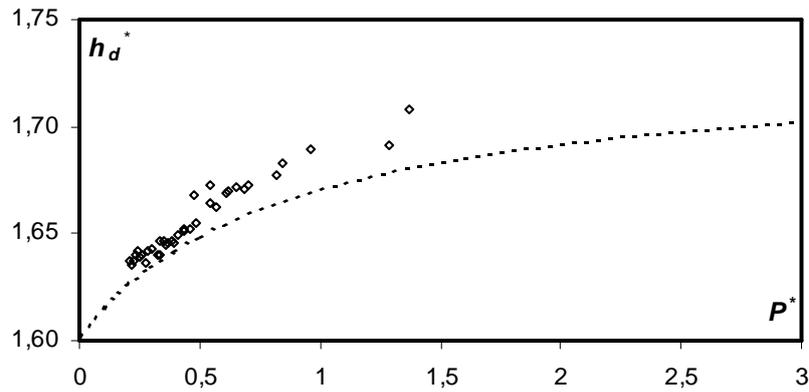


Figure 3.8 : Variation théorique et expérimentale de la hauteur relative de diversement  $h_d^*$  en fonction de  $P^*$ , pour les dispositif avec  $\beta=0,348$  et  $P= 8cm ;6cm$ .

----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

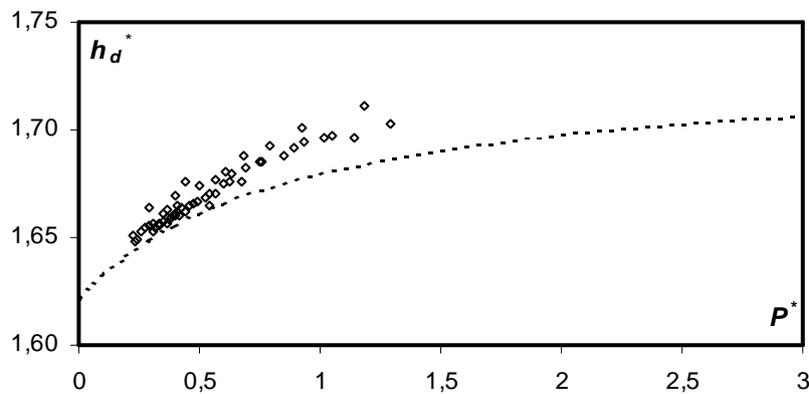


Figure 3.9 : Variation théorique et expérimentale de la hauteur relative de diversement  $h_d^*$  en fonction de  $P^*$ , pour les dispositif avec  $\beta=0,3$  et  $P= 10cm ;8cm ;6cm$ .

----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

Les figures 3.5 à 3.9 montrent que les points expérimentaux se coïncident avec les courbes théoriques pour les faibles valeurs de la hauteur relative de pelle  $P^*$  et plus que cette dernière augmente, plus que les points expérimentaux s'éloignent des courbes théoriques. Cependant, cette remarque est illustrée beaucoup plus, en allant vers les faibles valeurs de la contraction latérale  $\beta$ . La figure 3.10 représente la variation de la hauteur relative de déversement  $h_d^*$  en fonction du paramètre adimensionnel  $\psi$  selon la relation (2.7), ainsi que les points expérimentaux selon les tableaux de 3.3 à 3.15.

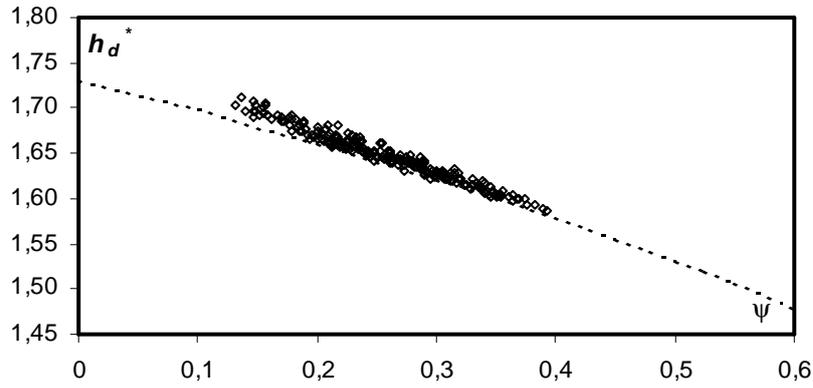


Figure 3.10 : Variation théorique et expérimentale de la hauteur relative de déversement  $h_d^*$  en fonction du paramètre adimensionnel  $\psi$ .  
 --- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

La figure 3.10, quant à elle montre que les points expérimentaux sont dans la globalité sur la courbe théorique pour les grandes valeurs du paramètre adimensionnel  $\psi$ , en allant vers les faibles valeurs du paramètre adimensionnel  $\psi$ , les points expérimentaux s'éloignent de la courbe théorique.

Les calculs ainsi faits montrent que l'écart relatif maximal  $\left[ \frac{h_{d \text{ exp}}^*}{h_{d \text{ th}}^*} - 1 \right]$  entre les valeurs de la hauteur relative de déversement obtenues de l'expérimentation et ceux obtenues par application de la relation (2.7) est de l'ordre de 1,68 %.

Nous avons représenté sur la figure 3.11 la variation de la hauteur relative de déversement expérimentale en fonction de celle théorique.

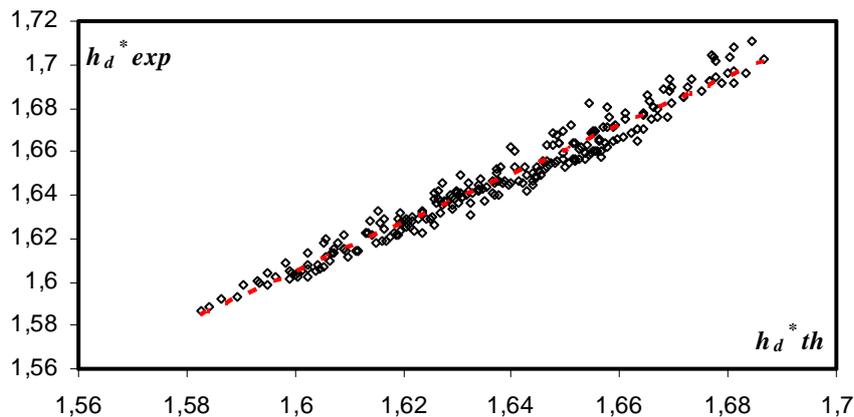


Figure 3.11 : Variation de la hauteur relative de déversement expérimentale en fonction de celle théorique.

Un ajustement de type puissance des points représentant la variation de la hauteur relative de déversement expérimentale en fonction de celle théorique, et les résultats de *Hachemi Rachedi* (2005) nous ont permis d'écrire :

$$h_{d \text{ exp}}^* = 0,9984 h_{d \text{ th}}^{*1,0165} \quad (3.1)$$

Tenant compte de la relation précédente, la relation (2.7) devient :

$$h_d^* = 2,0197 [\text{Cos}(\alpha / 3)]^{1,0165} \quad (3.2)$$

Avec  $\alpha = a \cos(-\psi)$

L'écart relatif maximal  $\left[ \frac{h_{d \text{ exp}}^*}{h_{d \text{ th}}^*} - 1 \right]$  en utilisant la relation (3.2) en remplacement de la relation (2.7) se réduit jusqu'à 0,9%.

### III.8.2. Charge totale relative de déversement

La charge totale relative de déversement représente la somme des charges cinétique ( $V^2/2g$ ) et potentielle  $h_d$ , rapportées à la hauteur critique  $h_c$  de l'écoulement dans le dispositif.

La charge potentielle est une grandeur mesurable directement par le procédé expérimental, et elle représente la hauteur de déversement. Tandis que l'énergie cinétique est obtenue de la deuxième grandeur mesurée expérimentalement qui est le débit  $Q$ .

L'expression théorique de la charge totale relative de déversement est donnée par la relation (2.10), tout en tenant compte des modifications apportées sur la relation donnant la hauteur relative de déversement, comme le montre la relation (3.2).

Nous avons représenté sur la figure 3.12, les points expérimentaux reliant la charge totale relative de déversement  $H_d^*$  au paramètre adimensionnel  $\psi$ , ainsi que la courbe théorique tracée selon la relation (2.10).

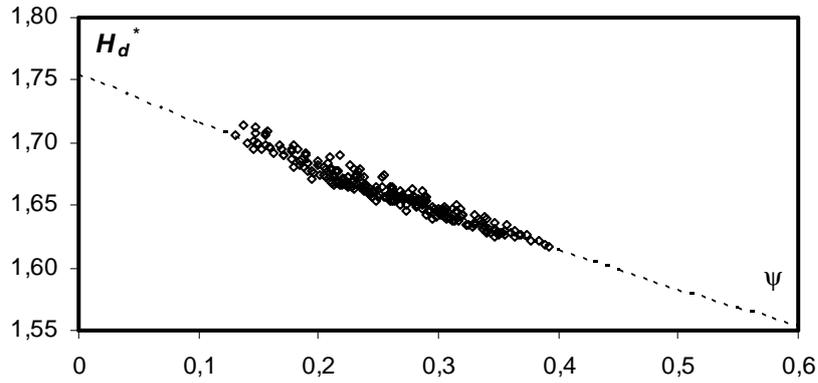


Figure 3.12 : Représentation graphique de la relation  $H_d^* = f(\psi)$  théorique selon la relation (2.15), et les points expérimentaux selon les tableaux de 3.3 à 3.15.

### III.8.3. Coefficient et expression de débit

Nous avons pu montrer au cours du deuxième chapitre que le coefficient de débit  $\mu$  n'est fonction que du paramètre adimensionnel  $\psi$ , tel qu'il figure dans la relations (2.21).

Tenant compte des modifications apportées sur la relation de la hauteur relative de déversement donnée par la relation (3.2), le coefficient de débit donné par la relation (2.21) devient :

$$\mu = 0,2463 \left[ \cos\left(\frac{\alpha}{3}\right) \right]^{1,5247} \left[ 1 + 0,0607 \left[ \cos\left(\frac{\alpha}{3}\right) \right]^{-3,195} \psi^2 \right]^{-3/2} \quad (3.3)$$

Rappelons que :

$$\alpha = a \cos(-\psi) \quad \text{et} \quad \psi = \frac{\beta}{1 + P^*}$$

Les figures 3.13 à 3.17 représentent la variation théorique du coefficient de débit  $\mu$  en fonction de la hauteur relative de pelle  $P^*$  pour les différentes valeurs de la contraction latérale  $\beta$  testé, selon la relation (3.3), ainsi que les points expérimentaux figurant dans les tableaux 3.3 à 3.15.

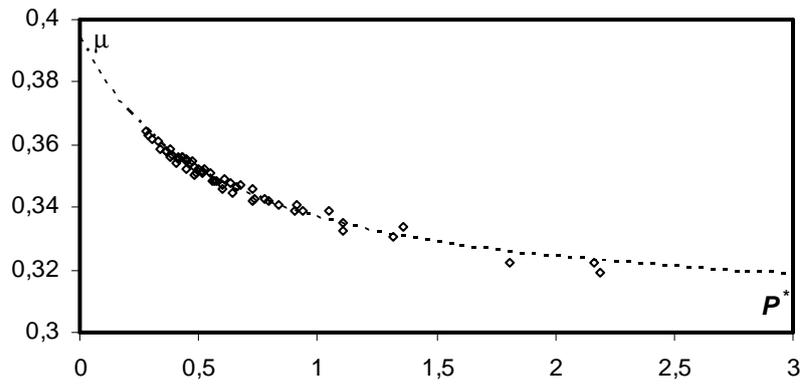


Figure 3.13 : Variation théorique et expérimentale du coefficient de débit  $\mu$  en fonction de la hauteur relative de pelle  $P^*$ , pour le dispositif avec  $\beta=0,501$  et  $P= 10cm ; 8cm ; 6cm$ .

----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

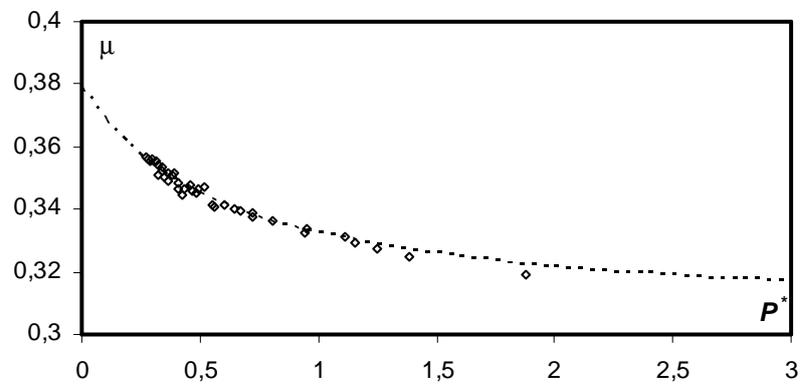


Figure 3.14 : Variation théorique et expérimentale du coefficient de débit  $\mu$  en fonction de la hauteur relative de pelle  $P^*$ , pour le dispositif avec  $\beta=0,45$  et  $P= 8cm ; 6cm$ .

----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

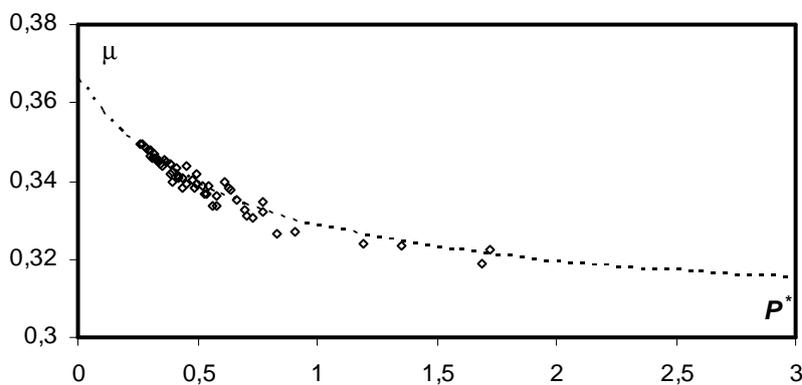


Figure 3.15 : Variation théorique et expérimentale du coefficient de débit  $\mu$  en fonction de la hauteur relative de pelle  $P^*$ , pour le dispositif avec  $\beta=0,399$  et  $P= 10cm ; 8cm ; 6cm$ .

----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

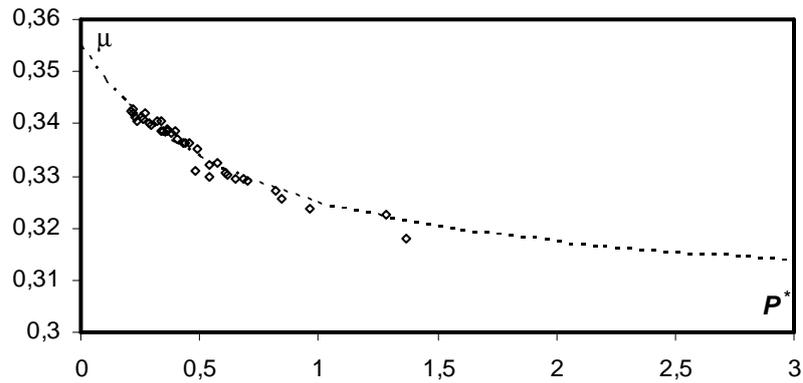


Figure 3.16 : Variation théorique et expérimentale du coefficient de débit  $\mu$  en fonction de la hauteur relative de pelle  $P^*$ , pour le dispositif avec  $\beta=0,348$  et  $P= 10cm ; 8cm ; 6cm$ .

----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

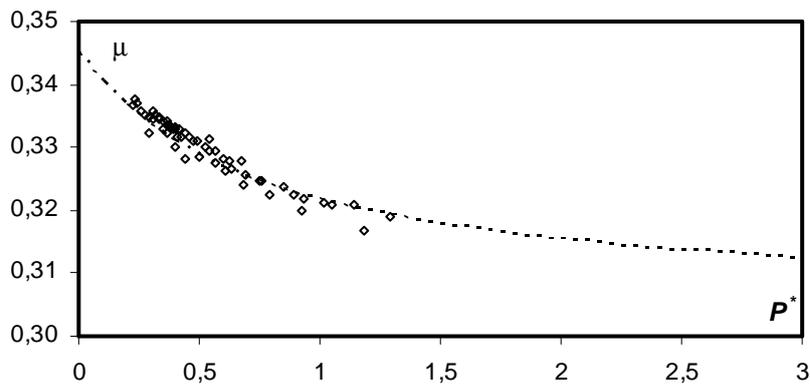


Figure 3.17 : Variation théorique et expérimentale du coefficient de débit  $\mu$  en fonction de la hauteur relative de pelle  $P^*$ , pour le dispositif avec  $\beta=0,3$  et  $P= 10cm ; 8cm ; 6cm$ .

----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

Représentant ainsi, sur le même graphique, la variation théorique et expérimentale du coefficient de débit  $\mu$  en fonction du paramètre adimensionnel  $\psi$ , illustré sur la figure 3.12.

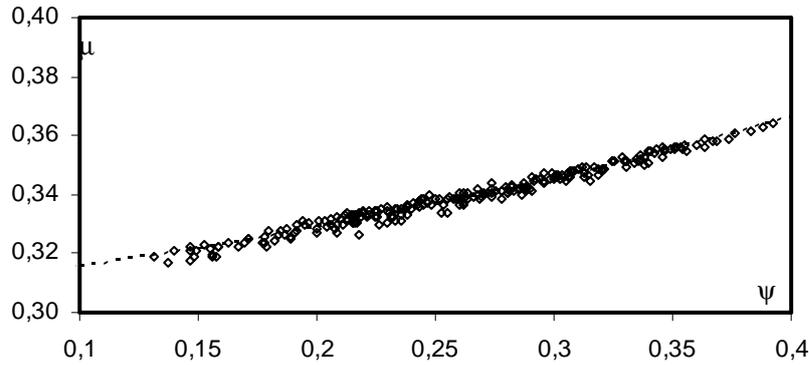


Figure 3.18 : Représentation graphique de la variation théorique et expérimentale du coefficient de débit  $\mu$  en fonction du paramètre adimensionnel  $\psi$ .  
 ----- courbe théorique,  $\diamond$  points expérimentaux.

Il ressort de la figure 3.18 que les points expérimentaux sont répartis autour de la courbe théorique du coefficient de débit corrigé donné par la relation (3.3) et l'écart relatif maximal  $\left[ \frac{\mu_{exp}}{\mu_{th}} - 1 \right]$  est de l'ordre de 1,01%.

### III.9. Conclusion

Le but visé par cette partie de notre étude a été de valider les relations théoriques du débit et du coefficient de débit établies au cours de la deuxième partie de notre travail.

Le banc d'essai qui a servi de tester le dispositif étudié a été défini et schématiquement décrit, puis les appareils utilisés dans la mesure de la profondeur et du débit ont été décrits, ainsi que les caractéristiques des dispositifs testés.

Pour atteindre le but visé, nous avons testé treize dispositifs de différentes contractions latérales et différentes hauteurs de pelle. Les résultats de ces treize dispositifs ont servi pour la validation des relations théoriques établies dans la deuxième partie de notre étude et la correction de ces dernières par comparaison aux résultats expérimentaux. La relation de la hauteur relative de déversement a été corrigée à l'aide d'un ajustement de la relation liant les deux hauteurs relatives de déversement théorique et expérimentale.

L'écart relatif maximal sur le coefficient était de 1,01%, la relation donnant le coefficient de débit après correction de la relation donnant la hauteur relative de déversement est telle que :

$$\mu = 0,2463 \left[ \cos\left(\frac{\alpha}{3}\right) \right]^{1,5247} \left[ 1 + 0,0607 \left[ \cos\left(\frac{\alpha}{3}\right) \right]^{-3,195} \psi^2 \right]^{-3/2}$$

Dans laquelle  $\alpha = a \cos(-\psi)$ ,  $\psi = \frac{\beta}{1+P^*}$  est le paramètre adimensionnel représentant la contraction de la section de l'écoulement.

Cette partie de notre étude nous a permis de conclure la validité des relations précédemment établies.

## CONCLUSION GENERALE

Notre travail a eu pour principal objectif la conception, la réalisation et l'expérimentation d'un dispositif de mesure de débit dans les canaux ouverts.

L'appareil est formé par un large seuil de hauteur de pelle  $P$  et doté d'une contraction latérale.

L'objectif visé par l'étude de ce dispositif est l'établissement de l'expression de la loi *hauteur-débit* ainsi que celle du coefficient de débit.

Pour mieux mener notre étude, nous avons présenté notre travail en trois chapitres principaux. Au cours de la première partie, nous avons tenté de rappeler l'essentiel des connaissances sur les travaux antérieurs effectués dans le domaine de la débitmétrie dans les canaux ouverts. Nous nous sommes intéressés exclusivement aux appareils utilisant le libre déversement, et dont le fonctionnement repose sur une contraction verticale de l'écoulement ou sur la combinaison d'une contraction à la fois verticale ou horizontale de l'écoulement. Les déversoirs sont dotés, dans leur ensemble, d'une hauteur de pelle qui provoque une contraction verticale de l'écoulement lorsque le dispositif est démuné d'une contraction latérale de sa géométrie. Par contre, pour ceux dotés d'une hauteur de pelle et d'une contraction latérale, l'écoulement qui les franchit subit à la fois une contraction verticale et horizontale. Nous avons indiqué l'expression du débit unitaire écoulé par le canal de forme rectangulaire dans lequel ces dispositifs sont insérés. Pour le cas des dispositifs constitués d'échancrure rectangulaire, avec ou sans contraction latérale, la relation hauteur – débit est :

$$q = \mu \sqrt{2g} h_d^{3/2}$$

$q = Q/B$  désigne le débit unitaire écoulé par le canal rectangulaire de largeur  $B$ ,  $Q$  est le débit volume,  $h_d$  est la hauteur de déversement et  $g$  représente l'accélération de la pesanteur. Le paramètre  $\mu$  désigne le coefficient de débit et son évaluation n'a été possible que grâce aux essais au laboratoire. Pour un même dispositif, le coefficient du débit  $\mu$  peut répondre aux diverses formules, selon l'auteur.

Nous avons poursuivi notre étude bibliographique par un rappel des dispositifs de mesure de débit dans les canaux ouverts, constitués d'un seuil large. Leur profil en long peut être de forme triangulaire ou rectangulaire. Nous avons alors présenté les déversoirs à paroi épaisse de type Bazin et de type Crump. Nous avons indiqué leurs caractéristiques géométriques et notamment les valeurs de leurs pentes amont et aval. Les conditions de leur bon fonctionnement ont été également présentées, tout en insistant sur la nécessité de leur strict respect.

En ce qui concerne le déversoir à seuil épais à échancrure rectangulaire, l'expression du débit correspond à celle des déversoirs en mince paroi à échancrure rectangulaire et dont le débit est proportionnel à la puissance  $3/2$  de la hauteur de déversement. Nous avons regroupé dans les tableaux (I.1) et (I.2) les valeurs expérimentales du coefficient de débit.

Par contre le déversoir à seuil épais de type Bazin, le débit est donné par l'expression de la forme :

$$Q = K B h_d^{3/2}$$

Où le paramètre  $K$  peut être considéré comme un coefficient de débit, puisqu'il est lié à  $\mu$  par la relation :

$$K = \mu \sqrt{2g}$$

La hauteur  $h_d$  ainsi que la largeur  $B$  du canal d'amenée sont exprimées en centimètres et le débit volume  $Q$  s'exprime alors en litres par seconde. Nous avons regroupé dans le tableau (I.5) les valeurs expérimentales du coefficient  $K$ , pour diverses valeurs des pentes amont et aval du dispositif ainsi que pour différentes valeurs de la hauteur déversée  $h_d$ .

Quant au déversoir à seuil épais à profil en long triangulaire de type Crump, nous avons indiqué que le débit volume  $Q$  répondait à la relation :

$$Q = C_e C_v \sqrt{g} B h_d^{3/2}$$

Où  $C_e$  est un coefficient sans dimension et dont la valeur est de 0,626. Par contre,  $C_v$  désigne le coefficient de vitesse, dépendant de la largeur  $B$  du canal d'amenée, de la hauteur déversée  $h_d$  et de la hauteur de pelle  $P$ .

La relation ci-dessus est applicable sous les conditions limites d'utilisation suivantes :

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

Nous avons donné un bref rappel sur les appareils qui utilisent la propriété du ressaut pour surélever le plan d'eau amont. Ces appareils sont appelés jaugeurs à ressaut.

Le second chapitre de notre étude, a été consacré à l'étude théorique du dispositif choisi. Pour atteindre le but visé par ce chapitre, nous avons eu recours à l'application de l'équation de quantité de mouvement entre une section droite prise dans le canal d'amenée ainsi que la section de l'écoulement critique à l'intérieur du dispositif de mesure. Cette application a tenu compte de la force de réaction de la paroi amont du dispositif opposée à l'écoulement, par contre les forces de frottement sur le fond et sur les parois du canal ont été négligées.

L'équation de quantité de mouvement a permis de conclure que la hauteur relative de déversement  $h_d^* = h_d/h_c$  est fonction du seul paramètre adimensionnel  $\psi$  et par conséquent du paramètre  $\beta = b/B$ , ainsi que du paramètre  $P^* = P/h_d$ , où  $h_d$  est la profondeur de déversement au-dessus du seuil du dispositif, mesurée à l'amont dans le canal d'amenée,  $b$  est la largeur de la section du dispositif dans laquelle s'effectue l'écoulement,  $h_c$  représente la profondeur de l'écoulement critique à l'intérieur du dispositif.

L'équation obtenue est du troisième degré vis-à-vis de la hauteur relative de déversement  $h_d^*$ , la résolution mathématique de cette dernière nous a permis de déterminer la variable recherchée, telle que :

$$h_d^* = 2 \cos(\alpha / 3) \text{ où } \cos(\alpha) = -\psi$$

La vitesse d'approche a été négligée, dans un premier temps, et le coefficient de débit a été déterminé par la combinaison de l'équation générale du débit des déversoirs à échancrure rectangulaire avec la condition de criticité, il a été trouvé que le coefficient de débit  $\mu$  est fonction du seul paramètre adimensionnel  $\psi$  et par conséquent du paramètre  $\beta$ , ainsi que du paramètre  $P^*$ .

La relation du coefficient de débit était de la forme :

$$\mu_0 = \frac{1}{\sqrt{2} h_d^{*3/2}}$$

Dans un second temps, l'effet de la vitesse d'approche sur le coefficient d'écoulement a été quantifié à l'aide des relations donnant le débit écoulé à travers le dispositif avec et sans prise en compte de la vitesse d'approche de l'écoulement, dans lesquels on a introduit la relation de la charge totale relative de déversement  $H_d^*$ . Il a été trouvé que :

$$\mu = \mu_0 (1 + \psi^2 \mu_0^2)^{3/2}$$

A travers une présentation graphique, nous avons pu montrer comment l'effet de la vitesse d'approche peut influencer sur le coefficient de débit et avec quel taux.

L'expression du débit montre que l'appareil est de type semi-modulaire, dépendant des caractéristiques géométriques  $b$ ,  $B$  et  $P$  et de la lame de déversement  $h_d$ .

La relation du débit ainsi établit est telle que :

$$Q = \left[ \frac{1}{\sqrt{2} h_d^{*3/2}} \left( 1 + \frac{\psi^2}{2 h_d^{*3}} \right)^{3/2} \right] b \sqrt{2g} h_d^{3/2}$$

Le troisième chapitre de notre travail, a été consacré à la représentation et l'interprétation des résultats expérimentaux effectués sur treize dispositifs présentant une large gamme des valeurs de la contraction latérale et de la hauteur de pelle. Cette dernière partie nous a permis de corriger les relations issues du développement théorique, et le coefficient de débit corrigé était tel que :

$$\mu = 0,2463 \left[ \cos\left(\frac{\alpha}{3}\right) \right]^{1,5247} \left[ 1 + 0,0607 \left[ \cos\left(\frac{\alpha}{3}\right) \right]^{-3,195} \psi^2 \right]^{-3/2}$$

Dans laquelle  $\cos(\alpha) = -\psi$ ,  $\psi = \frac{\beta}{1 + P^*}$  est le paramètre adimensionnel traduisant la contraction de la section de l'écoulement.

L'application de cette relation nécessite la vérification de la position de la hauteur critique de l'écoulement qui dépend de la longueur du dispositif, cette dernière doit être sur le seuil du dispositif.

## **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, Ed. Dunod, Paris.

BOUSSINESQ J.M. (1877). Théorie des eaux courantes. Mémoires présentés par divers savants, Vol. 23, Académie des Sciences, France.

CARLIER M. (1972). Hydraulique Générale et Appliquée. Ed. Eyrolles, Paris.

DE COURSEY D.E., BLANCHARD B.J. (1970). Flow analysis over large triangular weir, Proc. ASCE, J. Hydraulics Division, Vol. 96, HY 7, 1435-1454.

CRUMP E.S. (1952). A new method of gauging stream flow with little afflux by means of submerged weir of triangular profile. Proc. Inst. Civ. Eng., Vol. 1, London.

HACHEMI RACHEDI L. ACHOUR B. (2005). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, Mémoire de Magister, Université de Biskra.

HAGER W.H. (1986). Discharge measurement structures, Communication 1, Département de Génie Civil, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse.

LAMOEN J. (1947). Note sur quelques types de canaux à ressaut, Annales des travaux publics de Belgique, pp. 323-345.

LANCASTRE A. (1961). Manuel d'hydraulique générale. Edition Eyrolles, Paris.

REHBOCK T.(1929). Wassermessung mit scharfkantigen Ueberfaellen, Zeitschrift VdI, Vol. 73, pp. 817-823.

REMENIERAS G. (1949). L'hydraulique des stations limnimétriques pour le jaugeage des cours d'eau, Annuaire hydrologique de la France.

REMENIERAS G. (1972). L'Hydrologie de l'ingénieur. Ed. Eyrolles, 456 p., Paris.

SIA (1926). Contribution à l'étude des méthodes de jaugeages, Bull. 18, Schow. Bureau Wasserforschung, Bern.