

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université de Mohamed Khider, Biskra

Faculté des Sciences et de la technologie

Département de génie civil et d'hydraulique

Réf :



Thèse présentée en vue de l'obtention du Diplôme de

Doctorat LMD

Spécialité : **Hydraulique**

Option : **Sciences de l'eau et de l'environnement**

THEME

Étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique avec une distribution non homogène de la hauteur d'eau transversalement

Présentée par : **DEBABECHE Bouthaina**

Présidente : Benmbarek Naima

Directrice de thèse : Cherhabil Sonia

Co-encadrant : Erpicum Sebastien

Examineur : Kateb Samir

Examineur : Bedjaoui Ali

Professeur Université de Biskra- Algerie

MCA Université de Biskra - Algerie

MCA Université de Liège- Belgique

Professeur Université de Ouergla- Algerie

MCA Université de Biskra- Algerie

Année universitaire : 2024 / 2025

Tables des matières

DEDICACE	I
REMERCIEMENT.....	II
RESUME.....	III
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTES DES TABLEAUX.....	XII
INTRODUCTION GENERALE.....	1

Partie I : Etude bibliographique

Introduction à la première partie.....	6
--	---

Chapitre I : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

I.1. Introduction	8
I.2. Phénomène du ressaut hydraulique	8
I. 3. Ressaut hydraulique sur radier horizontal	10
I.3.1. Classification des ressauts hydrauliques sur radier horizontal	10
I.3.2. Caractéristiques du ressaut hydraulique sur radier horizontal.....	13
I.3.3. Rendement du ressaut hydraulique sur radier horizontal	17
I.4. Conclusion	18

Chapitre II : Ressaut hydraulique dans des canaux non rectangulaires

II.1. Introduction	20
II.2. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire.....	20
II.3. Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique.....	23
II.3.1. Approche de Hager et Wanoschek (1989).....	23
II.4. Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique.....	28
II.4.1. Description de la géométrie du canal trapézoïdal asymétrique.....	28
II.4.2. Etude de Diaz, 1954	29
II.4.3. Etude de Kiri et al., 2018.....	34
II.4.4. Etude de Kiri et al., 2020.....	36
II.5. Conclusion	38

Conclusion de la première partie	40
--	----

Partie II : Etude expérimentale

Introduction à la deuxième partie.....	42
--	----

MODELE I (Canal rectangulaire)

Chapitre I : Description du premier modèle expérimental

I.1. Introduction.....	44
I.2. Description du modèle expérimental.....	44
I.2.1. Caractéristiques du canal rectangulaire.....	45
I.2.2. Vannes réglables en amont.....	46
I.2.2.1. Vanne rectangulaire.....	46
I.2.2.2. Vannes dentées.....	46
I.2.3. Vanne levante en aval	48
I.3. Description de l'appareillage de mesure.....	49
I.3.1. Mesure de surfaces libres.....	49
I.3.2. Mesure de débits.....	53
I.4. Conclusion	53

Chapitre II: Etude expérimentale (Vanne rectangulaire)

II. 1. Introduction	54
II.2. Méthodologie des expérimentations	54
II.2.1. Position du problème.....	54
II.2.2. Description des essais.....	54
II.2.2.1. Emplacement des sondes	54
II.2.2.2. Calibrage des sondes	56
II.2.2.3. Mesure de la hauteur de l'eau.....	58
II.2.3. Procédure expérimentale.....	59
II.2.3.1. Mesure de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal.....	59
II.2.3.2. Mesure de la hauteur de l'eau sur la longueur du canal	59
II.3. Conclusion.....	61

Chapitre III : Etude expérimentale (Vannes dentées)

III.1. Introduction	62
III.2. Méthodologie des expérimentations	62
III 2.1. Position du problème.....	62
III.2.2. Description des essais.....	62
III.2.3. Procédure expérimentale.....	63
III.3. Conclusion.....	66

MODELE II (Canal trapézoïdal asymétrique)

Chapitre IV : Description du deuxième modèle expérimental

IV.1. Introduction.....	67
IV.2. Description du modèle expérimental	67
IV.2.1. Caractéristiques du canal trapézoïdal asymétrique.....	69
IV.2.2. Caractéristiques des vannes en amont.....	70
IV.2.3. Vanne levante en aval.....	71
IV.3. Description de l'appareillage de mesure	71
IV.3.1. Mesure de débits.....	71
IV.3.2. Mesure des surfaces libres	73
IV.4. Conclusion.....	75

Chapitre V : Etude expérimentale (Canal trapézoïdal asymétrique)

V.1. Introduction.....	76
V.2. Méthodologie des expérimentations	76
V.2.1. Position du problème.....	76
V.2.2. Description des essais.....	77
V.2.2.1. Emplacement des sondes	77
V.2.2.2. Calibrage des sondes.....	78
V.2.2.3. Mesure de la hauteur de l'eau.....	80
V.2.3. Procédure expérimentale.....	80
V.4. Conclusion	82
Conclusion de la deuxième partie.....	83

Partie III : Résultats et discussions

Introduction à la troisième partie.....	84
--	-----------

MODELE I (Canal rectangulaire)

Chapitre I : Exploitation des résultats (vanne rectangulaire)

I.1. Introduction.....	85
I.2. Longueur du rouleau.....	85
I.3. Variation de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal.....	86
I.3. Variation de la hauteur de l'eau sur la longueur du canal.....	91
I.4. Comparaison entre $h_{2\text{ finale}}$ et $h_{2\text{ moy}}$	97
I.5. Hauteur supercritique du ressaut	99
I.6. Comparaison entre $h_{1\text{ mes}}$ et $h_{1\text{ theo}}$	103
I.7. Influence de la variation de la hauteur de l'eau sur la charge	105
I.8. Perte de charge dans le canal rectangulaire	106
I.8.1. Pertes de charge en amont du ressaut.....	106
I.8.2. Perte de charge dans le ressaut hydraulique.....	112
I.9. Conclusion	113

Chapitre II : Exploitation des résultats (vannes dentées)

II.1. Introduction.....	114
II.2. Vérification de la hauteur finale h_2	114
II.3. Détermination de la hauteur initiale h_1	118
II.3.1. Modification de la relation Belanger	118
II.4. Conclusion.....	122

MODELE II (Canal trapézoïdal asymétrique)

Chapitre III : Exploitation des résultats (Canal trapézoïdal asymétrique)

III.1. Introduction.....	123
III.2. Description du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique.....	123
III.3. Analyses des résultats expérimentaux	124
III.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	124
III.3.2. Etude des longueurs caractéristiques dans un canal trapézoïdal asymétrique.....	126
III.3.3. Rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique	129
III.4. Conclusion	133

Conclusion de la troisième partie.....137

CONCLUSION GENERALE.....137

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....141

PRINCIPALES NOTATIONS.....144

ANNEXES- TABLEAUX.....145

ANNEXES- FIGURES.....192

Dédicace

Je remercie mes très chers parents qui ont tout sacrifié pour me permettre d'atteindre cet accomplissement. Leur amour et leur patience infinis m'ont été d'un soutien inestimable. Je tiens également à exprimer ma gratitude envers ma famille pour son soutien indéfectible tout au long de ce parcours. Enfin, je souhaite adresser mes remerciements à toutes les personnes, que j'aurais pu oublier, qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

ملخص

نقوم من خلال هذه الأطروحة بدراسة القفزة الهيدروليكية نظرياً وتجريبياً في قناة مستقيمة لتوزيع ارتفاع الماء غير المتجانس عرضياً، سواء بفعل قناة شبه منحرفة غير متمائلة (قاع مائل عرضياً)، أو بفعل وجود صمام غير متطابق المنبع (صمامات مسننة). في الجزء الأول من العمل، تمت دراسة القفزة الهيدروليكية في قناة مستطيلة خلف صمام مسنن. تم تعديل علاقة بيلانجر وكذلك التحقق منها في ظل هذه الظروف غير المتجانسة. بناءً على هاته العلاقة، يمكننا تحديد الارتفاع الأولي للقفزة في ظل الجريان غير المتجانس وبالتالي مقدار فقدان الطاقة بعد PKW. في الجزء الثاني من العمل، تم تحليل الخصائص الرئيسية للقفزة الهيدروليكية تجريبياً في قناة شبه منحرفة غير متمائلة، بما في ذلك الارتفاعات المترافقة، الأطوال المميزة والكفاءة. قورنت خصائص هذه القفزة مع نظائرها في قنوات أخرى. تم اقتراح علاقة لحساب كفاءة القفزة الهيدروليكية للقنوات المثثة وشبه المنحرفة المتناظرة. بالنسبة لـ $F_1 > 5$ ، تبين أن هاته القفزة الهيدروليكية أكثر فعالية من تلك التي تحدث في القنوات المثثة وشبه المنحرفة المتناظرة.

كلمات مفتاحية

بيلانجي، القناة شبه المنحرفة غير المتناظرة، فرود، الارتفاع فوق الحرج، الارتفاعات المترافقة، الأطوال المميزة، فقدان الطاقة، الكفاءة، القفزة الهيدروليكية و الصمامات المسننة.

Resumé :

Cette thèse étudie théoriquement et expérimentalement le ressaut hydraulique dans un canal rectiligne pour une distribution de la hauteur de l'eau non homogène transversalement, soit du fait d'une section de canal trapézoïdale asymétrique (fond incliné transversalement), soit du fait de la présence en amont d'une vanne à section non rectangulaire (vannes dentées). Dans la première partie du travail, le ressaut hydraulique sera étudié dans un canal rectangulaire en aval d'une vanne dentée. La relation de Bélanger sera modifiée et vérifiée dans ces conditions non homogènes. Sur la base de cette relation, nous pouvons déterminer la hauteur initiale du ressaut dans des conditions non homogènes et par conséquent la quantité de perte d'énergie après un PKW. Dans la deuxième partie, les principales propriétés du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique seront analysées expérimentalement, y compris les hauteurs conjuguées, les longueurs caractéristiques et le rendement. Les propriétés de ce ressaut sont comparées à celles de ressauts hydrauliques dans des canaux ayant d'autres types de sections transversales. Une relation permettant de calculer le rendement du ressaut hydraulique sera proposée pour le canal considéré. Pour $F_1 > 5$, le ressaut hydraulique s'avère plus efficace que celui qui se produit dans les canaux triangulaires et trapézoïdaux symétriques.

MOTS-CLÉS

Bélanger, canal trapézoïdal asymétrique, Froude, hauteur supercritique, hauteurs conjuguées, longueurs caractéristiques, perte d'énergie, rendement, ressaut hydraulique et vannes dentées

ABSTRACT

This thesis studies theoretically and experimentally the hydraulic jump in a straight channel for a non-homogeneous water height distribution across the channel, either due to an asymmetrical trapezoidal channel cross-section (transversely inclined bottom), or due to the presence upstream of a sluice gate with a non-rectangular cross-section (toothed gates). In the first part of this work, we will study the hydraulic jump in a rectangular channel downstream of a toothed gate. The Belanger relationship has been modified and verified on these inhomogeneous conditions. With this relationship, we can determine the height of the jump under non-homogeneous conditions and therefore the amount of energy loss after a PKW. In the second part, the properties of this jump are compared to those of hydraulic jumps in channels with other types of cross sections. A relationship for calculating hydraulic jump efficiency is proposed for the considered flume. For $F_1 > 5$, the hydraulic jump is found to be more effective than that occurring in triangular and symmetric trapezoidal channels.

KEYWORDS

Asymmetric trapezoidal channel, Belanger, characteristic lengths, efficiency, energy loss, Froude, hydraulic jump, rectangular channel, sequent depths, supercritical height and toothed sluice.

Remerciements

Louange à Dieu Tout-Puissant, qui m'a donné la force et le courage d'aller au bout de ce travail !

Ma plus grande reconnaissance va à mon encadrante, Madame CHERHABIL Sonia, Docteure à l'Université de Biskra (Algérie). J'ai énormément appris grâce à vous. Merci pour l'attention que vous avez portée à mon travail et pour la patience dont vous avez fait preuve tout au long de ce parcours. Je tiens également à adresser mes remerciements les plus chaleureux à mon co-encadrant, Monsieur ERPICUM Sébastien, Professeur à l'Université de Liège (Belgique), pour son accueil, ses orientations précieuses, sa disponibilité et ses encouragements qui m'ont été d'un grand soutien pour finaliser ma thèse.

Je remercie vivement la présidente ainsi que tous les membres du jury, qui ont accepté de faire partie de ce travail et qui y ont consacré leur temps pour en assurer l'examen et l'évaluation critique. Qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude. Madame la Présidente du jury : BENMBAREK Naima, Professeure au Département d'Hydraulique, Université Mohamed Khider de Biskra. Messieurs les membres du jury : – BEDJAOUI Ali, Maître de conférences au Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie ; – KATEB Samir, Professeur au Département d'Hydraulique, Université de Ouargla, Algérie.

Un grand merci à Mademoiselle DEBABECHE Kaouther, chercheuse au CSTR-A-Biskra, pour son aide et ses précieux conseils. Je tiens également à remercier le personnel du laboratoire HECE à l'Université de Liège (Belgique), ainsi que Messieurs Guettala Ismaël, Soltani Nacer et Merabti Youcef, qui m'ont beaucoup aidé au sein du laboratoire LARGHYDE.

Je remercie sincèrement toutes celles et ceux qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de cette recherche.

Table de figures

Partie I : Partie bibliographique

Chapitre I : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 1.1	Ressaut hydraulique classique	9
Figure 1.2	Types de ressauts hydrauliques classiques	10
Figure 1.3	Ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince	12
Figure 1.4	Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes	13
Figure 1.5	Notations adoptées pour le ressaut hydraulique sur fond horizontal en canal prismatique	14
Figure 1.6	Rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique dans un profil rectangulaire en fonction de Froude F_1	16
Figure 1.7	Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1	18

Chapitre II : Ressaut hydraulique dans des canaux non rectangulaires

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 2.1	Formation de ressauts hydrauliques	20
Figure 2.2	Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour le ressaut hydraulique contrôlé	21
Figure 2.3	Variation expérimentale de $Y(S)$ pour le saut hydraulique contrôlé	22
Figure 2.4	Variation expérimentale de $S(F_1)$ pour le ressaut hydraulique contrôlé	23
Figure 2.5	Schéma de définition selon (Wanoschek & Hager, 1989)	25
Figure 2.6	Caractéristique principale du rouleau de fond	25
Figure 2.7	Longueur relative λ_j du ressaut en fonction de F_1 et de M	26
Figure 2.8	Rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude	27
Figure 2.9	Géométrie d'un canal trapézoïdal asymétrique	28
Figure 2.10	Section transversale du canal trapézoïdal asymétrique	29
Figure 2.11	Section de la bande longitudinale, selon (Diaz, 1954)	30
Figure 2.12	Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de quantité de mouvement (aval/amont) du côté peu profond, selon (Diaz, 1954)	31
Figure 2.13	Schéma général de l'écoulement sur le canal non rectangulaire selon (Diaz, 1954)	32
Figure 2.14	Rapport des hauteurs conjuguées moyennes en fonction du nombre de Froude, selon (Diaz, 1954)	32
Figure 2.15	Modèle de la section transversale du canal, selon (Kiri et al., 2018)	34
Figure 2.16	Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut	35
Figure 2.17	Croquis de définition regardant en aval : $\lambda = W/D = 5$ (Propagation de l'onde positive dans un canal asymétrique)	37

Partie II : Partie expérimentale

MODELE I (Canal rectangulaire)

Chapitre I : Description du premier modèle expérimental (MODELE I)

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 1.1	Schéma simplifié du modèle de section rectangulaire, ayant servi à l'expérimentation	45
Figure 1.2	Photographie du crin de tranquillisation	46
Figure 1.3	Photographie de la vanne rectangulaire	46
Figure 1.4	Géométrie de la vanne rectangulaire	46
Figure 1.5	Photographie de la vanne dentée 1 (0.02m, 2dents)	47
Figure 1.6	Géométrie de la vanne dentée 1 (0.02m, 2dents)	47
Figure 1.7	Photographie de la vanne dentée 2 (0.02m, 4dents)	47
Figure 1.8	Géométrie de la vanne dentée 2 (0.02m, 4dents)	47
Figure 1.9	Photographie de la vanne dentée 3 (0.04m, 2dents)	48
Figure 1.10	Géométrie de la vanne dentée 3 (0.04m, 2 dents)	48
Figure 1.11	Photographie de la vanne dentée 4 (0.04m, 4dents)	48
Figure 1.12	Géométrie de la vanne dentée 4 (0.04m, 4dents)	48
Figure 1.13	Photographie de la vanne levante à l'aval du canal rectangulaire	49
Figure 1.14	Sonde à ultrason de type mic+	49
Figure 1.15	Photographie de la sonde 30-250mm	50
Figure 1.16	Zone d'acquisition de la sonde 30-250mm	50
Figure 1.17	Photographie de la sonde 65-450mm	50
Figure 1.18	Zone d'acquisition de la sonde 65-450mm	50
Figure 1.19	Photographie du boîtier	52
Figure 1.20	Photographie de cadre pour le profil longitudinal	52
Figure 1.21	Photographie du cadre pour le profil transversal	52
Figure 1.22	Photographie du débitmètre	53

Chapitre II : Etude expérimentale (vanne rectangulaire)

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 2.1	Vue en plan de l'emplacement des sondes sur la largeur du canal	55
Figure 2.2	Vue en long du canal rectangulaire et de son instrumentation	56
Figure 2.3	Tarage des sondes - Détermination de la pente de la courbe de tarage	57
Figure 2.4	Exemple d'une courbe de tarage de la sonde 1	57
Figure 2.5	Photographie du laser utilisé	58
Figure 2.6	Configuration étudiée pour mesurer de hauteurs de la surface libre	59
Figure 2.7	Exemple du début du Ressaut hydraulique formé le canal rectangulaire, (ouverture 0.03m ; $Q= 0.058 \text{ m}^3/\text{s}$)- vanne rectangulaire	60

Chapitre III : Etude expérimentale (Vannes dentées)

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 3.1	Vue en long du canal rectangulaire et de son instrumentation (vanne dentée)	63

MODELE II (Canal trapézoïdal asymétrique)

Chapitre IV : Description du deuxième modèle expérimental

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 4.1	Photographie du modèle expérimentale du canal trapézoïdal asymétrique	68
Figure 4.2	Schéma simplifié du modèle de section trapézoïdal asymétrique, ayant servi à l'expérimentation	68
Figure 4.3	Photographie du bassin	69
Figure 4.4	Photographie de la vanne de réglage du débit ; vanne de refoulement	69
Figure 4.5	Photographie du canal trapézoïdal asymétrique	69
Figure 4.6	Hauteur de l'ouverture des deux vannes parallélogrammes : $h_v=0.04m$; $h_v=0.06m$	70
Figure 4.7	Photographie de la vanne parallélogramme $h_v=0.06m$	70
Figure 4.8	Hauteur de l'ouverture de la vanne triangulaire	70
Figure 4.9	Photographie de la vanne triangulaire $h_{v\ max}=0.07m$	70
Figure 4.10	Vanne levante en aval du canal trapézoïdal asymétrique	71
Figure 4.11	Débitmètre à ultrasons placé sur la conduite d'alimentation du canal	73
Figure 4.12	Materiel de mesure de la hauteur de l'eau : 1: sondes à ultrasons microsonic ;2 : boîtier; 3: cables ; 4: chargeur 12V	74
Figure 4.13	Connectique du boîtier ; 1 : Connecteur chargeur 12V ; 2 : Connecteurs câbles	74
Figure 4.14	Ecran du boîtier	75

Chapitre V : Etude expérimentale (Canal trapézoïdal asymétrique)

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 5.1	Vue transversale de l'emplacement des sondes dans un canal trapézoïdal asymétrique	77
Figure 5.2	Tarage des sondes - Détermination de la pente de la courbe de tarage (vue transversale)	78
Figure 5.3	Exemple d'une courbe de calibrage de la sonde (1)- coté peu profond du canal ; $x=2.5m$; $y=0.04m$	79
Figure 5.4	Configuration étudiée pour mesurer de hauteurs de la surface libre	80
Figure 5.5	Vue en long du canal trapézoïdal asymétrique et de son instrumentation (vue de profil)	81

Partie III : Résultats et discussion

MODELE I (canal rectangulaire)

Chapitre I : Exploitation des résultats (vanne rectangulaire)

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 1.1	Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.0385 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$; $F_1=4.69$)	86
Figure 1.2	Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.0485 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$; $F_1=5.92$)	87
Figure 1.3	Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.09 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$; $F_1= 3.28$)	88
Figure 1.4	Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.11 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$; $F_1= 3.78$)	89
Figure 1.5	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.0385\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	93
Figure 1.6	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.042 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	93
Figure 1.7	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.045 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	93
Figure 1.8	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.0485 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	93
Figure 1.9	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.053 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	94
Figure 1.10	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.058 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	94
Figure 1.11	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.063 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	94
Figure 1.12	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.068 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	94
Figure 1.13	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.07 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{m}$	95
Figure 1.14	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.08 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{m}$	95
Figure 1.15	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.085 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{m}$	95
Figure 1.16	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.09 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{m}$	95
Figure 1.17	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.09 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	96
Figure 1.18	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.01 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	96
Figure 1.19	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.0106 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	96
Figure 1.20	Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal - $Q= 0.011 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	96
Figure 1.21	Comparaison entre $h_{2(s5)}$ et $h_{2 \text{ moy}}$ pour tous débits étudiés	98
Figure 1.22	Variation des rapports des hauteurs initiales/ h_r en fonction de $Fr(h_r)$	100

Figure 1.23	Comparaison entre h_{1mes} et h_{1theo} - canal rectangulaire en avant d'une vanne rectangulaire	103
Figure 1.24	Perte de charge entre l'abscisse 0.1 et le début du ressaut hydraulique ($Q=0.106 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05 \text{ m}$; $F_1=3.79$)	106
Figure 1.25	Coefficient de contraction (α) en fonction de (h_r/b)	107
Figure 1.26	Comparaison de la perte d'énergie en amont $\Delta H_{1(amont \text{ du ressaut})}$ (1.8) avec $\Delta H_{(en \text{ amont du ressaut}) \text{ calc}}$ (1.11)	108
Figure 1.27	Comparaison de h_{1theo} (1.6); avec $h_{1 \text{ calc}}$ (1.12)	109
Figure 1.28	Comparaison de h_{rmes} avec $h_{r \text{ calc}}$ (1.13)	109
Figure 1.29	Perte de charge dans le ressaut hydraulique- canal rectangulaire en aval d'une vanne rectangulaire	112
Figure 1.30	Perte de charge dans le ressaut hydraulique en fonction d'un nombre de Froude ; $\Delta H= H_{1mes}-H_2$	112

Chapitre II : Exploitation des résultats (vannes dentées)

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 2.1	Comparaison entre $h_{2 \text{ moy}}$ et $h_{2 \text{ finale}}$; cas de la vanne dentée n°1 (0.02m, 2 dents)	114
Figure 2.2	Comparaison entre $h_{2 \text{ moy}}$ et $h_{2 \text{ finale}}$; cas de la vanne dentée n°2 (0.02m, 4 dents)	114
Figure 2.3	Comparaison entre $h_{2 \text{ moy}}$ et $h_{2 \text{ finale}}$; cas de la vanne dentée n°3 (0.04m, 2 dents)	115
Figure 2.4	Comparaison entre $h_{2 \text{ moy}}$ et $h_{2 \text{ finale}}$; cas de la vanne dentée n°4 (0.04m, 4 dents)	115
Figure 2.5	Vue transversale d'un ressaut hydraulique formé à l'aval d'une vanne dentée n°2 (0,02m, 4 dents) ; ($Q= 0.045 \text{ m}^3/\text{s}$; $F_1=4.66$)	118
Figure 2.6	Correction de l'équation de Bélanger ; $h_{1 \text{ calc}} = f\left(\frac{2h_2}{\sqrt{1+8F_{1 \text{ theo}}^2} - 1}\right)$	118
Figure 2.7	Comparaison entre $h_{r \text{ mes}}$ et $h_{r \text{ calc}}$ – toutes les vannes dentées	119

Chapitre III : Exploitation des résultats (Canal trapézoïdal asymétrique)

Numéro de figure	Titre de figure	Page
Figure 3.1	Vue transversale d'un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique a) écoulement à proximité de la vanne triangulaire ; b) ressaut hydraulique ; vanne triangulaire ; $F_1=1,90$; c) ressaut hydraulique ; vanne à parallélogramme ; $F_1=3,82$	124
Figure 3.2	Rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude en aval de la vanne à parallélogramme, $h_v=0,04m$; canal rectangulaire ; et canal triangulaire. ($\alpha=90^\circ$)	125
Figure 3.3	Longueurs relatives $\frac{L_r}{h_2 - h_1}$, $(\frac{L_r}{h_2 - h_1})_{\text{peu prof}}$ du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour tous les cas étudiés	126
Figure 3.4	Longueurs relatives $\frac{L_r}{h_2}$, $\frac{L_r \text{ peu prof}}{h_{2 \text{ moy}}}$ et $\frac{L_r \text{ plus prof}}{h_{2 \text{ moy}}}$ du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour tous les cas étudiés	127
Figure 3.5	Rendement η en fonction du F_1 pour les canaux (rectangulaire, trapézoïdal symétrique et trapézoïdal asymétrique)	131

Table des tableaux

II- Partie expérimentale

MODELE I (canal rectangulaire)

Chapitre I : Description du premier modèle expérimental

Numéro de tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 1.1	Caractéristiques du canal rectangulaire	45
Tableau 1.2	Gamme de données d'entrées et de sorties pour les sondes 30-250 mm et 65-450mm	51

Chapitre II : Etude expérimentale (Vanne rectangulaire)

Numéro de tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 2.1	Gamme des débits utilisés pour le profil transversal	59
Tableau 2.2	Gamme de débits utilisés pour le profil longitudinal	60
Tableau 2.3	Gamme des débits et du nombre de Froude (canal rectangulaire-vanne rectangulaire)	61

Chapitre III : Etude expérimentale (vannes dentées)

Numéro de tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 3.1	Gamme de débits utilisés, vanne dentée n°1	64
Tableau 3.2	Gamme de débits utilisés, vanne dentée n°2	64
Tableau 3.3	Gamme de débits utilisés, vanne dentée n°3	65
Tableau 3.4	Gamme de débits utilisés, vanne dentée n°4	66

Chapitre IV: Description du deuxième modèle expérimental

Numéro de tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 4.1	Caractéristiques générales du canal trapézoïdal asymétrique	70
Tableau 4.2	Valeurs des mesures du débit par l'étalonnage	72

Chapitre V : Etude expérimentale (Canal trapézoïdal asymétrique)

Numéro de tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 5.1	Hauteurs totales mesurées par le mètre et hauteurs calculées par les relations du calibrage	79
Tableau 5.2	Gamme de mesures- vannes 'rectangulaire et triangulaire'	82

II. Résultats et discussion

MODELE I (canal rectangulaire)

Chapitre I : Exploitation des résultats (vanne rectangulaire)

Numéro de tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 1.1	Gamme étudiée pour le profil transversal	86
Tableau 1.2	Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal (Q=0.0385 m ³ /s; 0.02m)	87
Tableau 1.3	Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal (Q=0.0485 m ³ /s ; h _v =0.02m)	88
Tableau 1.4	Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal (Q=0.09 m ³ /s; h _v =0.05m)	89
Tableau 1.5	Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal (Q=0.11 m ³ /s; h _v =0.05m)	90
Tableau 1.6	Début du ressaut hydraulique, pour les valeurs calculées et mesurées	97
Tableau 1.7	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de la comparaison entre h _{2 (s5)} et h _{2moy}	98
Tableau 1.8	Rapports des hauteurs initiales/h _r ; F(h _r)	101
Tableau 1.9	Comparaison entre h _{1théo} et les hauteurs h _v , h _{1mes} et h _{0.32}	101
Tableau 1.10	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de la comparaison entre h _{1mes} et h _{1theo}	104
Tableau 1.11	Écarts types des hauteurs et des charges en amont du ressaut	105
Tableau 1.12	Critères de sélection des H _{1mes}	107
Tableau 1.13	Coefficient de contraction α _{mes} en fonction de (h _r /b)	110
Tableau 1.14	Comparaison de la perte d'énergie en amont ΔH _{1(amont du ressaut)} (Equation 8) avec ΔH _{(en amont du ressaut) calc} (Equation 11)	110
Tableau 1.15	Comparaison de h _{1theo} (Equation 7); avec h _{1 calc} (Equation 12)	111
Tableau 1.16	Comparaison de h _{rmes} avec h _{r mes} (Equation 13)	111
Tableau 1.17	Perte de charge dans le ressaut ΔH= H _{1mes} -H ₂	113

Chapitre II : Exploitation des résultats (vannes dentées)

Numéro de tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 2.1	$h_{2\text{ moy}}$ et $h_{2\text{ finale}}$ pour les vannes dentées 1 et 2	116
Tableau 2.2	$h_{2\text{ moy}}$ et $h_{2\text{ finale}}$ pour les vannes dentées 3 et 4	117
Tableau 2.3	Correction de l'équation de Bélanger ; $h_{1\text{ calc}}$; $h_{1\text{ theo}}$; toutes les vannes dentées	120
Tableau 2.4	$h_{r\text{ mes}}$ et $h_{r\text{ calc}}$ – toutes les vannes dentées	121

MODELE II (Canal trapézoïdal asymétrique)

Chapitre III : Exploitation des résultats (Canal trapézoïdal asymétrique)

Numéro de tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 3.1	Données expérimentales et théoriques pour différents paramètres	128
Tableau 3.2	Rendement η du ressaut hydraulique de notre cas d'étude	132
Tableau 3.3	Rendement η du ressaut hydraulique de l'étude de (DEBABECHE and Al 2009) et l'étude (Wanoschek and Hager 1989)	133

Table des annexes a

Numéro de tableau	Titre du tableau	Page
Tableau a.1	Mesure expérimentales ayant servi au traçage de $h_{mes}/h_r=f(y/b)$; $Q=0.0385\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	145
Tableau a.2	Mesure expérimentales ayant servi au traçage de $h_{mes}/h_r=f(y/b)$; $Q=0.0485\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	147
Tableau a.3	Mesure expérimentales ayant servi au traçage de $h_{mes}/h_r=f(y/b)$; $Q=0.9\text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	149
Tableau a.4	Mesure expérimentales ayant servi au traçage de $h_{mes}/h_r=f(y/b)$; $Q=0.11\text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	151
Tableau a.5	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.0385\text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	153
Tableau a.6	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.042\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{ m}$	155
Tableau a.7	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L)$; $Q=0.045\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	157
Tableau a.8	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L)$; $Q=0.0485\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	159
Tableau a.9	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.053\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	162
Tableau a.10	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L)$; $Q=0.058\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	164
Tableau a.11	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.063\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	166
Tableau a.12	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.068\text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{ m}$	168
Tableau a.13	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.07\text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{ m}$	171
Tableau a.14	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.08\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=4\text{ cm}$	174
Tableau a.15	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.085\text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{ m}$	176
Tableau a.16	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.09\text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{ m}$	179
Tableau a.17	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.09\text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{ m}$	182
Tableau a.18	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L)$; $Q=0.1\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{ m}$	184
Tableau a.19	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$; $Q=0.106\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	186
Tableau a.20	Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L)$; $Q=0.11\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{ m}$	189

Table des annexes b

Figures des ressauts hydrauliques formés dans le canal rectangulaire- vanne rectangulaire

Numéro de la figure	Titre de la figure	Page
Figure b.1	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.0385\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	192
Figure b.2	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.042\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	192
Figure b.3	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.045\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	192
Figure b.4	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.0485\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$	192
Figure b.5	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.053\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	193
Figure b.6	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.058\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	193
Figure b.7	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.063\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	193
Figure b.8	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.068\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$	193
Figure b.9	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.07\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{m}$	194
Figure b.10	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.08\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{m}$	194
Figure b.11	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.085\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{m}$	194
Figure b.12	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.09\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.04\text{m}$	194
Figure b.13	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.09\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	195
Figure b.14	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.1\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	195
Figure b.15	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.106\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	195
Figure b.16	Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire $Q= 0.11\text{m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$	195

Introduction générale

Des découvertes archéologiques récentes nous montrent que les barrages simples en terre et les réseaux de canaux remontent à 2000 ans avant Jésus-Christ. Ils fournissaient à la population la source fiable d'eau dont elle avait besoin pour vivre. La construction du barrage du Maarib au Yémen commença en 750 avant JC et dura 100 ans. Ce barrage de 4 mètres de haut et a des orifices en pierre pour réguler les écoulements pour l'irrigation et pour les besoins domestiques. Un des plus anciens barrages encore en service aujourd'hui est une digue faite de terre et de rochers construits vers 1300 avant JC dans un pays qui porte aujourd'hui le nom de Syrie. En Chine, un système de barrages et des canaux a été construit en 2280 avant JC. Plusieurs barrages anciens datant du 13^{ème} et 16^{ème} siècle en Iran sont encore utilisés aujourd'hui (Navale, 2011).

Historiquement, les barrages ont permis aux populations de collecter et stocker l'eau et de l'utiliser pendant les périodes de sécheresse. A la fin du 19^{ème} siècle, on y a ajouté l'énergie électrique et la navigation. Les loisirs ont été aussi un apport bénéfique de plus, à de nombreux projets de barrages. C'est plus récemment que les barrages ont été créés pour répondre à plusieurs objectifs. La sécurité des barrages est nécessaire pour assurer une surveillance optimale. L'évacuateur de crue constitue l'organe principal de cette sécurité, son rôle est d'assurer le passage des eaux en surplus dans des conditions favorables à la sécurité du barrage et sans créer le risque d'érosion ou d'inondation en aval. Cependant, le coût de cet ouvrage reste une préoccupation majeure pour les concepteurs.

Les aménagements hydrauliques, tels que les barrages construits le long des cours d'eau, engendrent des variations de niveau entre l'amont et l'aval du barrage. En période de crue, lorsque le réservoir est plein, les eaux excédentaires sont relâchées directement dans la rivière. Cependant, la différence de hauteur entre le déversoir de crue et la partie aval du barrage peut entraîner des débits d'eau importants à grande vitesse. Afin d'éviter des changements significatifs et incontrôlés du lit de la rivière sous l'impact de ces eaux, il est souvent nécessaire d'installer des dispositifs de dissipation d'énergie. Le choix du type de dissipateur dépend des caractéristiques hydrauliques, topographiques et géologiques du site (Hager. 1988).

1. Aspects historiques

Le rôle principal du ressaut hydraulique est la dissipation de l'excès d'énergie cinétique de l'eau s'écoulant en aval des structures hydrauliques telles que les déversoirs et les vannes. D'autres utilisations comprennent l'aide au mélange et au transfert intense de gaz pendant les réactions chimiques, le mélange de produits chimiques, le dessalement de l'eau et l'aération des cours d'eau contaminés par des déchets biodégradables (Afzal et Bushra 2002). Le ressaut est un phénomène intrigant et intéressant qui a attiré l'attention de nombreux chercheurs depuis sa description par Léonard de Vinci dans les années 1500 (Yasuki Nakayama. 2013). Pendant plus de 300 ans, l'énigme du ressaut hydraulique n'a pas intéressé les chercheurs jusqu'à l'arrivée de l'ingénieur italien Bidone en 1818 (Gupta, Mehta, et Dwivedi 2013), crédité de la première investigation expérimentale de ce phénomène.

Plusieurs chercheurs ont défini le ressaut hydraulique. Par exemple, (Hager. 1989) a décrit le ressaut hydraulique comme un phénomène rapide qui apparaît dans tous les dissipateurs. C'est une transition brusque d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial, caractérisée par une augmentation soudaine de la hauteur de l'eau sur une courte distance, accompagnée d'une forte dissipation d'énergie et d'un entraînement d'air.

En 1828, Bélanger publie une relation qui portera son nom. Il s'agit de la relation des hauteurs conjuguées, cette relation caractérise le lien entre la hauteur supercritique de l'eau en amont du ressaut hydraulique et la hauteur sous-critique de l'eau en aval. De nombreux spécialistes ont contribué au développement de ce domaine au XIXe siècle : Darcy et Bazin (1856/58, publié en 1865), Bresse (1860) et Unwin (1880), qui ont fait une description de ce phénomène, une vérification de la loi de Newton ainsi qu'une discussion de la longueur du ressaut (Schulz et al. 2015).

Au vingtième siècle, plus précisément en 1930, les dissipateurs d'énergie ont été développés et ont connu d'importantes améliorations de conception. Hager était le premier à compiler un livre sur la conception des dissipateurs d'énergie en 1992, au cours duquel il a présenté l'état de l'art des ressauts hydrauliques et des bassins de tranquillisation associés. Hager a présenté de nombreux articles sur les sujets étudiés (Hager. 1992). De plus, le chercheur a donné des critères de conception et des recommandations. Depuis lors et au cours des deux dernières décennies, les études sur ce sujet n'ont cessé de se développer, car elles ont connu un ressaut qualitatif, grâce au développement de la technologie, des outils de mesure et des programmes de calcul.

2. Canaux rectangulaires et non rectangulaires

Le ressaut hydraulique peut être formé dans un canal de forme rectangulaire comme dans d'autres de forme non rectangulaire.

2.1. Canaux rectangulaires

Par ailleurs, de nombreuses études ont été menées sur le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, considéré comme le ressaut le plus étudié en raison de son efficacité, de sa simplicité géométrique et de sa facilité de mise en œuvre. L'équation de la quantité de mouvement et l'équation de Bélanger sont liées l'une à l'autre, dont l'application de l'équation de la quantité de mouvement vise à définir la relation entre le rapport $Y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude incident.

2.2. Canaux non rectangulaires

Les canaux non-rectangulaires se divisent en deux catégories, des canaux symétriques et des canaux asymétriques. Les études menées sur le ressaut dans un canal non rectangulaire ont prouvé que ce type de ressaut est plus efficace (dissipation d'énergie plus importante) que celui formé dans un canal rectangulaire pour des valeurs égales de F_1 et h_1 (Hager et Wanoschek.1989) pour les canaux trapézoïdaux symétriques et (Diaz. 1954) pour les canaux trapézoïdaux asymétriques. Nous citons les publications de Hager et Wanoschek comme exemples d'études sur le ressaut hydraulique évoluant dans les canaux trapézoïdaux symétriques (Hager et Wanoschek. 1989). Comme dans le cas d'un canal rectangulaire, le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique est régi par l'équation de quantité de mouvement.

Selon (Hager et Wanoschek. 1989), le phénomène de ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique diffère de celui formé dans un canal rectangulaire par l'existence du rouleau de fond, où il y a eu une diminution significative des vitesses sur le fond. Le flux principal est remonté à la surface, mais diverge de part et d'autre du canal.

Les canaux asymétriques non rectangulaires peuvent être triangulaires asymétriques ou trapézoïdaux asymétriques. Il faut également différencier les canaux trapézoïdaux asymétriques. Dans la littérature, la forme la plus étudiée de canal trapézoïdal asymétrique est celle où le fond du canal est horizontal, et les parois latérales sont inclinées de façon asymétrique. L'autre forme considérée comme la plus rare est celle où les parois sont parallèles et le fond incliné transversalement à l'horizon.

Le ressaut hydraulique dans les canaux à section trapézoïdale asymétrique a fait l'objet de peu d'études jusqu'à présent. (Diaz. 1954) est considéré comme le premier à étudier le ressaut hydraulique formé dans un canal trapézoïdal asymétrique où les parois sont parallèles, et le fond est incliné transversalement par rapport à l'horizon (Diaz. 1954). Après plus d'un demi-siècle, (Kiri and al. 2018, 2020) ont mené une série d'études sur ce type de ressaut. Le nombre d'études portant sur ce type de ressaut étant limité.

4. Objectifs du travail

Notre travail concerne l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectiligne pour une distribution de la hauteur de l'eau non homogène transversalement, soit le premier cas une section de canal trapézoïdale asymétrique (fond incliné transversalement), ou le deuxième cas de la présence en amont d'une vanne à section non rectangulaire (vannes dentées).

Avant d'entamer l'analyse des résultats dans le cas d'une distribution non homogène de la hauteur de l'eau, il fallait tout d'abord vérifier les résultats pour une distribution homogène. Pour cela, un ressaut hydraulique est étudié dans un canal rectangulaire en aval d'une vanne rectangulaire.

Le premier objectif sera d'étudier et de vérifier plusieurs paramètres du ressaut hydraulique dans des conditions homogènes de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal, tels que : les profils transversaux et longitudinaux ; la hauteur supercritique du ressaut ; l'influence de la variation des hauteurs sur la charge ; la dissipation d'énergie dans le canal rectangulaire. Une relation générale pour la perte d'énergie en amont du ressaut sera développée pour but de calculer la hauteur initiale du ressaut hydraulique.

Le deuxième objectif sera d'étudier le ressaut hydraulique dans des conditions non homogènes de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal, cette homogénéité sera engendrée par la forme géométrique de :

- Vannes dentées :

L'objectif principal est de modifier la relation de Bélanger, pour qu'elle soit applicable dans les conditions non homogènes. Avec cette relation modifiée, nous pouvons désormais déterminer la hauteur du ressaut hydraulique dans des conditions non homogènes, quantifiant ainsi la perte d'énergie en aval des PKW.

- Canal trapézoïdal asymétrique :

L'objectif est d'étudier les propriétés du ressaut hydraulique, tels que le rapport des hauteurs conjuguées et les longueurs caractéristiques, nous chercherons également de développer une relation pour calculer le rendement du ressaut dans ce type de canal. Les résultats ont mis en évidence de nouvelles informations sur le rendement d'un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique. Ce rendement a été comparé à d'autres types de canaux.

5. Contexte de l'étude

Notre présente thèse comporte trois parties :

- Partie I : Etude bibliographique ;
 - Partie II : Etude expérimentale ;
 - Partie III : Résultats et discussion.
-
- ✓ La première partie est divisée en deux chapitres. Le premier chapitre présente les études consacrées au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, tandis que le deuxième chapitre s'intéresse aux travaux réalisés sur le ressaut hydraulique dans des canaux de formes non rectangulaires (triangulaire, trapézoïdal symétrique et trapézoïdal asymétrique) ;
 - ✓ La deuxième partie sera consacrée à la représentation des études expérimentales, cette partie est divisée en deux nouvelles parties, la première sera sacrée à l'étude expérimentale du modèle I (canal rectangulaire en aval d'une vanne rectangulaire et 4 vannes dentées), et la deuxième concerne le modèle II (canal trapézoïdal asymétrique) ;
 - ✓ La troisième partie contient une discussion des résultats expérimentaux obtenus lors des essais réalisés sur les deux modèles étudiés.

Partie I :
Etude bibliographique

Introduction à la première partie

Dans cette partie une synthèse bibliographique sera soumise, elle fait le point sur le phénomène qui apparaît dans tous les dissipateurs d'énergie (ressaut hydraulique), celui qui est définie comme une diminution locale de la vitesse moyenne sur une faible longueur, accompagnée d'une réduction importante de l'énergie mécanique de l'écoulement. (Hager et al., 1988).

Afin d'organiser notre travail, nous allons diviser la partie bibliographique en deux chapitres essentiels :

Dans le premier chapitre, nous allons citer les travaux relatifs au ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire sur radier horizontal. Trois types de ressaut seront alors présentés : ressaut hydraulique classique, ressaut hydraulique contrôlé et ressaut hydraulique forcé. Le ressaut classique est présenté par (Hager et al., 1990) et (Hager et Sinniger, 1985) ; le ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince par (Forster et Skrinde, 1950) ; celui à paroi épaisse par (Govind et Muralidhar, 1963). Tandis que, le ressaut forcé est classifié par (W. Rand, 1957) et par (Bretz, 1988). Dans cette partie, l'équation de Bélanger (1828) sera bien présentée, c'est elle qui donne la relation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident. Nous allons également présenter les caractéristiques du ressaut.

Dans le deuxième chapitre, nous nous intéressons aux études réalisées sur les ressauts hydrauliques dans des canaux non rectangulaires, notamment :

- Ressaut évoluant en canal triangulaire, Nous allons donc citer les travaux de (Debabeche et Achour, 2007) . Les auteurs ont examiné expérimentalement le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique horizontal à angle d'ouverture de 90° , les ressauts contrôlés et B-minimum sous diverses conditions de l'écoulement incident.

- Ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal symétrique, les travaux de (Wanoschek et Hager, 1989) relatifs au ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal de pente géométrique horizontale, à parois latérales inclinées d'un angle de 45° sont présentés.

- Ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal asymétrique. Trois études seront exposées. La première étude est effectuée par (Diaz, 1954), les deux autres études sont analysées par (Kiri et al.) en 2018 et 2020. Signalons ici que ce type de ressaut n'a connu que très peu d'études, et fera l'objet de notre développement théorique et analyse expérimentale, dans une partie de ce travail.

Chapitre I :
Ressaut hydraulique dans
un canal rectangulaire

Chapitre I : Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

I.1. Introduction

Le phénomène du ressaut hydraulique a été largement étudié à la fois sur le plan théorique et expérimental. Les recherches ont démontré de manière générale que le ressaut est régulé efficacement par l'équation de la quantité de mouvement, quelle que soit la configuration du canal considérée. (Achour et al., 2002).

Dans ce chapitre, nous allons tout d'abord mettre en place le phénomène du ressaut hydraulique et présenter ensuite les travaux relatifs aux trois types de ressauts hydrauliques développant dans un canal rectangulaire sur radier horizontale, ils s'agissent du ressaut hydraulique classique, ressaut hydraulique contrôlé et ressaut forcé.

I.2. Phénomène du ressaut hydraulique

D'après (Hager & Sinniger, 1989), l'écoulement dans les canaux découverts peut être caractérisé par le nombre de Froude:

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA^3} \frac{\partial A}{\partial h} \quad (1.1)$$

F_1 , le nombre incident de Froude de l'écoulement incident (-) ;

Q , le débit (m^3/s);

g , l'accélération gravitationnelle (m/s^2) ;

A , $A(x,h)$ la section mouillée dont x est la coordonnée longitudinale et h la hauteur d'eau (m^2);

Le nombre de Froude peut être interprété comme un indice de l'importance des effets d'inertie de l'écoulement considéré.

En introduisant la vitesse moyenne $V=Q/A$, le nombre de Froude s'exprime également par $F=V/\sqrt{gA/(\frac{\partial A}{\partial h})}$. $F=0$ est obtenu pour $V=0$ et indique un état purement hydrostatique. L'autre extrême $F \rightarrow \infty$, correspond à un écoulement à vitesse V infiniment plus grande que la vitesse de référence.

$$V^* = \sqrt{gA / \left(\frac{\partial A}{\partial h}\right)} \quad (1.2)$$

Finalement, si $V=V^*$, $F_1=1$, les effets d'inertie et de pression sont égaux ; cet état est appelé condition d'écoulement critique. Pour $F_1 < 1$, l'écoulement se trouve dans la condition fluviale, tandis que la condition torrentielle apparaît pour un écoulement caractérisé par $F_1 > 1$.

La vitesse V absolue ne suffit pas pour caractériser la condition d'écoulement. Suivant la vitesse de référence V^* , un écoulement à vitesse donnée peut être fluvial et un deuxième écoulement à plus petite vitesse peut être torrentiel. La vitesse de référence, V^* , ne dépend pas de débit ou de la vitesse d'écoulement, mais uniquement de la géométrie du profil en un point $x=x^*$ considéré (Hager & Sinniger, 1989).

Le ressaut hydraulique s'établit lorsqu'il y a une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors de passage du régime torrentiel $F_1 > 1$ au régime fluvial $F_1 < 1$. Il est accompagné d'une agitation marquée de grandes pertes d'énergie (figure 1.1).

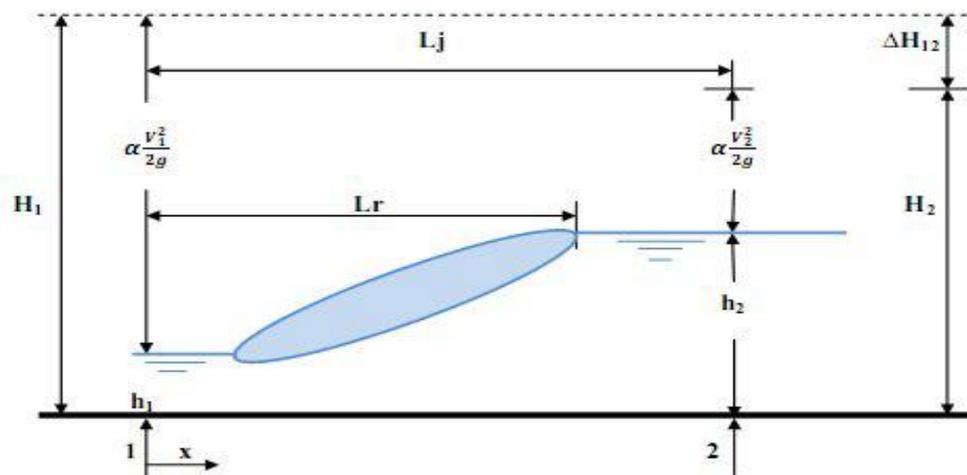


Figure 1.1. Ressaut hydraulique classique

I.3. Ressaut hydraulique sur radier horizontal

I.3.1. Classification des ressauts hydrauliques sur radier horizontal

a. Ressaut hydraulique classique :

Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu' il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval. (WH. Hager et al., 1990)

Selon la valeur du nombre de Froude amont, F_1 , un ressaut peut correspondre à différents types d'écoulement. La (figure 1.2) permet d'établir une classification selon l'allure générale de la surface libre.

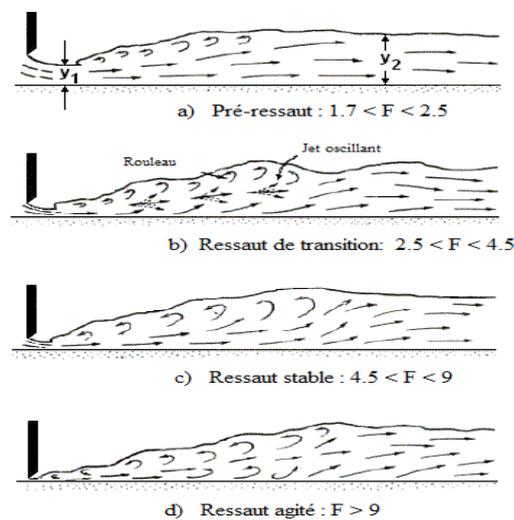


Figure 1. 2. Types de ressauts hydrauliques classiques pour divers domaines du nombre de Froude selon (J. N. Bradley & A. J. Peterka, 1957)

Pour $1 < F_1 < 1.7$: Un ressaut ondulé apparaît. La transition entre l'écoulement torrentiel et l'écoulement fluvial est graduellement variée, les pertes de charges étant essentiellement dues au frottement sur les parois du canal.

Pour $1.7 < F_1 < 2.5$: L'apparition du ressaut est encore ondulée, mais avec des zones de séparation à la surface. La dissipation d'énergie est encore faible et c'est la raison pour laquelle le domaine $1 < F_1 < 2.5$ est normalement exclu pour les ressauts hydrauliques proprement dits.

Pour $F_1 > 2.5$: Le ressaut hydraulique se présente sous la forme typique. Pourtant le domaine d'application du ressaut dans les constructions hydrauliques se situe entre $3.5 < F_1 < 9$.

Pour $F_1 > 9$: Le ressaut est si fort qu'il devient presque impossible de protéger le dissipateur contre les forces libérées. De plus l'écoulement prend plutôt l'allure de mousse que d'eau, tant l'entraînement d'air est important. Finalement une forte ondulation de la surface ne manifeste à l'aval du ressaut.

b. Ressaut hydraulique avec un seuil (contrôlé) :

Le ressaut hydraulique dit contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle (NV. Bretz, 1988).

Seuil continu à paroi mince : En admettant une répartition hydrostatique des pressions est une distribution uniforme des vitesses dans les sections de part et d'autre du ressaut, (John W. Forster & Raymond A. Skrinde, 1950) ont aboutis à un diagramme, liant les trois paramètres adimensionnels suivants :

- Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.
- La position relative du seuil x/h_2 .
- La hauteur relative du seuil s/h_1 .

L'étude expérimentale de (John W. Forster & Raymond A. Skrinde, 1950) vise à définir la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour des valeurs données de la position x/h_2 du seuil.

Pour chaque essai effectué, le rapport x/h_2 est maintenu tout en assurant la formation complète du ressaut. La longueur du bassin amortisseur est à la limite égale à la position x du seuil comptée à partir du ressaut (figure 1.3).

Le seuil de hauteur (s) est dénoyé et fonctionne comme un déversoir ; la profondeur h_3 de l'écoulement à l'aval n'a ainsi aucune influence sur le débit franchissant le seuil. Cette condition est satisfaite lorsque :

$$h_3 < h_2 - 0,75.s \quad (1.3)$$

La (figure 1.3) montre schématiquement un ressaut hydraulique contrôlé sur un fond horizontal par un seuil à paroi mince.

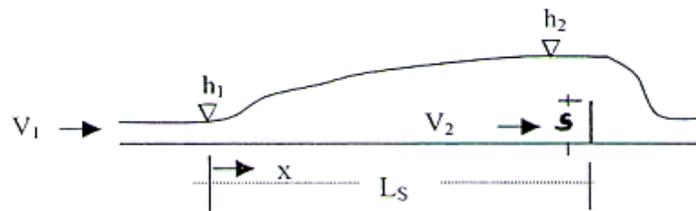


Figure1. 3. Ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince, selon (John W. Forster & Raymond A. Skrinde, 1950)

c. Ressaut hydraulique forcé :

Le ressaut hydraulique est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle (W. Rand, 1957) et (NV. Bretz, 1988).

En 1957, Rand a proposé d'établir une certaine classification pour le bassin avec seuil continu à son extrémité. Il était le premier qui a classifié le ressaut forcé par seuil en 10 cas typiques, se rapportant aux effets de la hauteur du seuil et de sa position, le ressaut classique servant du cas de référence.

Ces cas peuvent être groupés en trois classes se distinguant par la position du seuil par rapport au pied du ressaut (figure 1.4) :

1. Position minimale en amont L_s , min.
2. Position intermédiaire L_s .
3. Position maximale L_s , max.

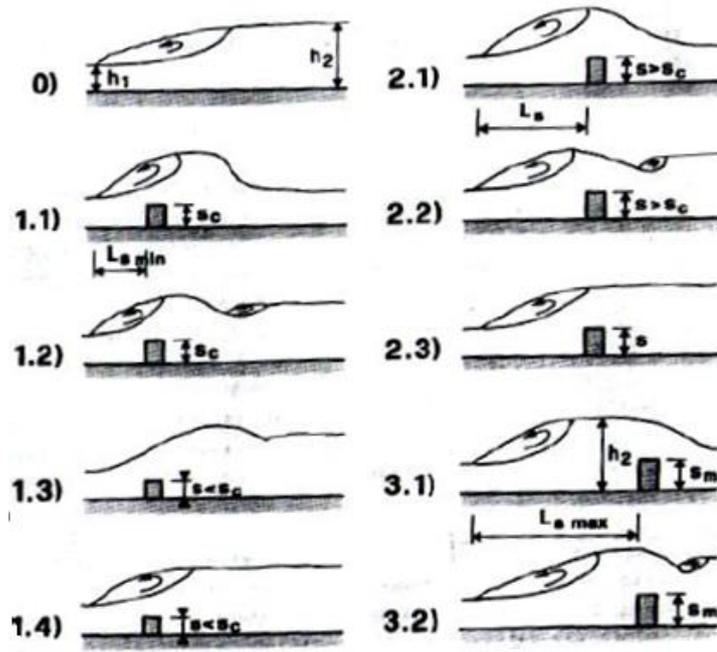


Figure 1. 4. Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes selon (W. Rand, 1957)

0) Ressaut classique avec hauteurs conjuguées h_1 et h_2 ;

1) classe 1, longueur L_s , min. ;

2) classe 2, longueur intermédiaire L_s ;

3) classe 3, longueur L_s max. ; s : hauteur du seuil, s_c : hauteur critique du seuil et s_{max} : hauteur maximale du seuil.

I.3.2. Caractéristiques du ressaut hydraulique sur radier horizontal

a. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Le passage de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial se manifeste par un ressaut hydraulique, c'est-à-dire par un changement brusque de la hauteur d'eau. Pour un ressaut hydraulique sur un fond horizontal en canal prismatique, la (figure 1.5) montre deux types d'écoulement, à l'amont du ressaut, l'écoulement est caractérisé par la hauteur d'eau h_1 et la charge $H_1 = h_1 + Q^2 / (2gA_1^2)$. A l'aval du ressaut hydraulique de longueur L_j l'écoulement devient de nouveau parallèle au fond, à hauteur d'eau h_2 et charge H_2 .

Les lignes de courant aux extrémités du ressaut étant parallèles au fond, on peut admettre que la répartition de pression est hydrostatique. De plus, la répartition des vitesses aux extrémités du ressaut est sensiblement uniforme. Comme le ressaut hydraulique est un

phénomène local, caractérisé par la perte de charge $\Delta H = H_1 - H_2$ due à la turbulence interne, les effets de frottement sont négligeables.

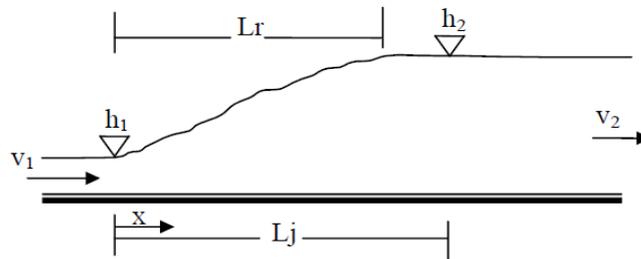


Figure 1. 5. Notations adoptées pour le ressaut hydraulique sur fond horizontal en canal prismatique

Dans un canal de section droite et rectangulaire, on constate que :

L'application du théorème de *Bernoulli* entre les sections 1 et 2 pour déterminer les profondeurs conjuguées du ressaut est impossible, étant donné que le terme ΔH_{1-2} , qui représente la perte de charge, n'est pas connu et que les formules du régime uniforme ne sont pas applicables. C'est le théorème d'Euler qui permet de résoudre ce problème. Donc l'auteur a appliqué ce théorème à la masse liquide contenue entre les sections (A₁) et (A₂) et a supposé:

- La répartition des pressions dans les sections (A₁) et (A₂) est hydrostatique.
- Les frottements sur les parois et le fond du canal le long de la faible distance séparant (A₁) et (A₂) sont négligeables par rapport à la perte de charge due à la turbulence créée par le ressaut.
- Les vitesses des différents filets liquides dans chacune des sections (A₁) et (A₂) sont parallèles à la vitesse moyenne V , et considérées uniformes.
- La résistance de l'aire est négligeable.

Donc l'application de la deuxième loi de *Newton* nous donne :

$$\beta_2 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_2 - \beta_1 \cdot \rho \cdot Q \cdot V_1 = P_1 - P_2 + G \cdot \sin \theta - f \quad (1.4)$$

Où :

β : facteur de correction de la quantité de mouvement qui sera considéré égale à l'unité

Puisque la répartition des vitesses est supposée uniforme.

ρ : la masse volumique du liquide en mouvement.

Q : débit volume.

V : vitesse d'écoulement.

g : accélération de la pesanteur.

G : poids de la tranche liquide située entre 1 et 2.

P₁ et P₂ : forces des pressions hydrostatiques.

θ : angle d'inclinaison du canal (pour un ressaut classique θ = 0°)

f : force de frottement (considérée comme négligeable).

En tenant compte de tous ces paramètres la relation (1.3) s'écrit :

$$\frac{1}{2} \omega \cdot b \cdot h_1^2 + \rho \cdot Q \cdot V_1 = \frac{1}{2} \omega \cdot b \cdot h_2^2 + \rho \cdot Q \cdot V_2 \quad (1.5)$$

Le nombre de *Froude* F₁ caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut évoluant dans un canal rectangulaire s'écrit.

$$F_1^2 = Q^2 / (g \cdot b^2 \cdot h^3) \quad (1.6)$$

Après avoir introduire les relations $V_1 = QA_1$ et $A_1 = b \cdot h_1$ et (1.6) dans la relation (1.6), on obtiendra :

$$Y^* = h_2^*/h_1 = 0,5 [\sqrt{1 + 8 F_1^2} - 1] \quad (1.7)$$

La relation (1.8) est connue sous le nom d'équation de Bélanger et permet d'évaluer le rapport Y* des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F₁. (Hager & Sinniger, 1985)proposent une relation approchée applicable pour le nombre de Froude F₁>2:

$$Y^* = h_2^*/h_1 = \sqrt{2} \cdot F_1 - 1/2 \quad (1.8)$$

La relation (1.8) montre que Y* et F₁ sont linéairement dépendants, les relations (1.6) et (1.6) sont représentées graphiquement dans le système d'axes à coordonnées cartésiennes de la (figure 1.6).

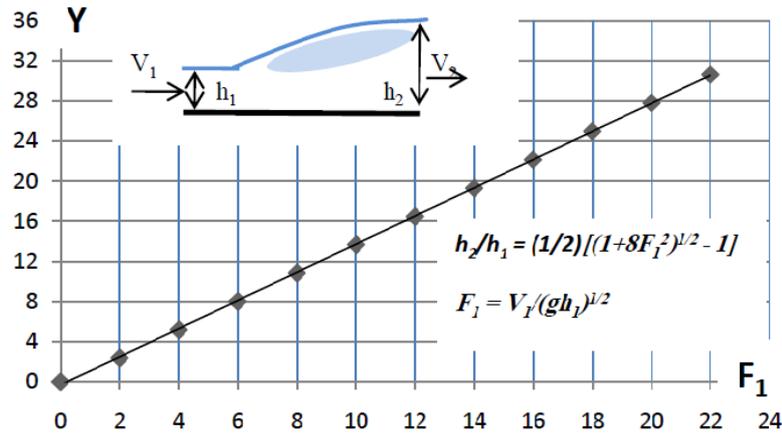


Figure 1. 6. Rapport Y^ des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique dans un profil rectangulaire en fonction de Froude F_1 selon (Hager & Sinniger, 1985)*

b. Longueurs caractéristiques du ressaut

Mises à part les hauteurs conjuguées et l'efficacité d'un ressaut hydraulique, la longueur sur laquelle il se manifeste est importante.

Selon les critères appliqués, différentes extensions longitudinales d'un ressaut hydraulique peuvent être considérées :

- Longueur du ressaut hydraulique L_j ;
- Longueur du rouleau L_r ;
- Longueur L_f .

Du point de vue de la facilité d'observation, la longueur L_r peut être aisément estimée par des observations expérimentales. Par contre, les deux autres longueurs L_j et L_f (plus grandes que L_r) ne sont pas suffisamment définies. En effet le profil de surface et la répartition verticale des vitesses s'approchent asymptotiquement des valeurs de calcul, h_2 et V_2 . C'est la raison pour laquelle les résultats concernant L_j et L_f divergent considérablement selon différents observateurs (Hager & Sinniger, 1989).

Longueur du ressaut (L_j) : La longueur L_j n'a pas pu être quantifiée que par voie expérimentale et sa définition varie d'un auteur à un autre. En effet, on estime que la longueur L_j^* doit être mesurée toujours entre le pied du ressaut et la section aval de sorte que :

1. la surface libre est pratiquement horizontale.
2. la surface de turbulence du rouleau est faible.

3. les grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface sont inexistantes.
4. l'écoulement graduellement varié apparaît à l'extrémité aval du rouleau.

Toutes ces définitions ont pour but d'indiquer la limite aval du ressaut au-delà de laquelle la protection ou le rendement du bassin d'amortissement n'est pas nécessaire.

Les essais de (J. N. Bradley & A. J. Peterka, 1957) ont permis à (WH. Hager et al., 1990) de déterminer une relation permettant d'évaluer la longueur L_j^* du ressaut. Celle-ci, rapportée à la hauteur initiale h_1 du ressaut, peut s'écrire:

$$L_j^* / h_1 = 220. Tgh [(F_1-1)/22] \quad (1.9)$$

D'après (WH. Hager et al., 1990), la variation de la longueur relative L_j^*/h_2^* en fonction du nombre de Froude F_1 indique que ce dernier rapport prend une valeur moyenne égale à 6 pour la gamme pratique $4 < F_1 < 12$.

$$L_j^*/h_2^* = 6 \quad (1.10)$$

Longueur du rouleau (L_r): Selon (WH. Hager et al., 1990), on définit les longueurs de rouleau suivant le type de ressaut étudié et on introduit ainsi la notion de longueur de rouleau développé et non développé.

Longueur (L_f): La Longueur L_f c'est la longueur où la vitesse V_f au fond et la vitesse moyenne soient à peu près identiques.

I.3.3. Rendement du ressaut hydraulique sur radier horizontal

D'après (Hager & Sinniger, 1989), l'intérêt technique du ressaut hydraulique est particulièrement dû à la dissipation d'énergie mécanique qu'il permet de réaliser. En se basant sur la figure précédente, l'équation généralisée de Bernoulli impose

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2g A_1^2} = h_2 + \frac{Q^2}{2g A_2^2} + \Delta H = H_2 + \Delta H_{1-2} \quad (1.11)$$

L'efficacité du ressaut hydraulique η est définie par :

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad (1.12)$$

Dans le cas du canal rectangulaire, le rendement du ressaut est donné par :

$$\eta^* = 1 - \frac{y + \frac{F_1}{2y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (1.13)$$

Bien que la relation (1.14) permette le calcul explicite du rendement η^* , (Hager & Sinniger, 1989) proposent une expression approchée, applicable pour $F_1 > 2$:

$$\eta^* = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right]^2 \quad (1.14)$$

Les relations (1.20) et (1.21) sont représentées graphiquement dans le système d'axes de coordonnées cartésiennes de la (figure 1.7).

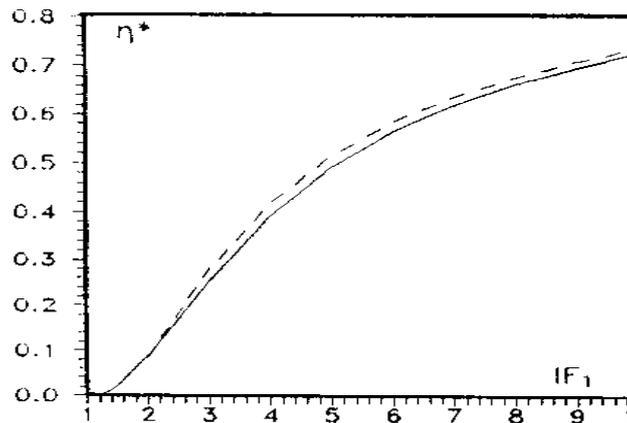


Figure 1.7. Rendement η^* du ressaut classique en fonction du nombre de Froude F_1 . (—) Courbe tracée selon la relation (1.20). (---) Courbe tracée selon la relation (1.21), selon (Hager & Sinniger, 1989)

La (figure 1.8) montre d'une part que le rendement η^* du ressaut classique est supérieur à 50% pour $F_1 \geq 5,1$ et que les rendements calculés en application de la relation approchée (1.21) sont légèrement supérieurs à ceux obtenus par la relation exacte (1.20) d'autre part ; l'écart maximum observé peut atteindre les 2%.

I.4. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons commencé par la mise en place du phénomène du ressaut hydraulique, suivie par la représentation des travaux effectués dans le domaine du ressaut dans un canal rectangulaire sur un radier horizontal. Trois types des ressauts ont été présentés i) ressaut hydraulique classique, ii) ressaut hydraulique contrôlé, iii) et ressaut hydraulique forcé.

Les études effectuées sur ces trois types ont été exposées, ces dernières analysent les caractéristiques du ressaut hydraulique telles que le rapport des hauteurs conjuguées, les longueurs caractéristiques et le rendement du ressaut.

D'une part, les différentes formes du ressaut hydraulique classique ont été définies selon la classification de (J. N. Bradley & A. J. Peterka, 1957). D'autre part, les travaux effectués sur le ressaut contrôlé par seuil ont été donnés par (John W. Forster & Raymond A. Skrinde, 1950) pour un seuil à paroi mince et par (N.S . GOVIND A RAO & D. MURALIDHAR, 1963) pour un seuil à paroi épaisse. En revanche, le ressaut hydraulique forcé par seuil a été étudié par (W. Rand, 1957), l'auteur a établi donc une relation entre la hauteur du seuil et sa position, pour faire une classification du ressaut forcé en 10 cas typiques. Dans le même cadre du ressaut forcé, les résultats de (NV. Bretz, 1988) conduisent aux trois équations, qui expriment le rapport des hauteurs conjuguées d'une part, le nombre de Froude F_1 et la hauteur relative du seuil d'autre part. Ces trois cas correspondent aux trois types du ressaut : ressaut type A, ressaut type B et ressaut type B-min. L'auteur a présenté la longueur relative du bassin amortisseur, sous forme de trois équations, correspond aux trois types du ressaut étudié.

Chapitre II :
Ressaut hydraulique dans
des canaux non
rectangulaires

CHAPITRE II : Ressaut hydraulique dans des canaux non rectangulaires

II.1. Introduction

L'étude du ressaut hydraulique dans des canaux non rectangulaires, tels que les sections triangulaires, trapézoïdales symétriques et asymétriques, présente un intérêt particulier en ingénierie hydraulique. Ces configurations, fréquemment rencontrées sur le terrain, influencent fortement le comportement du ressaut, notamment en termes de hauteur, position et perte d'énergie. Une analyse adaptée à chaque géométrie est donc essentielle pour une meilleure compréhension et une conception optimisée des ouvrages.

Dans ce chapitre, nous allons présenter quelques études de ressauts hydrauliques dans des canaux à sections triangulaires, trapézoïdales symétriques et asymétriques, afin de mieux comprendre l'impact de la géométrie sur leurs caractéristiques hydrauliques.

II.2. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire

Le ressaut hydraulique dans un canal ouvert triangulaire a reçu beaucoup d'attention. Parmi les travaux pertinents qui ont été consacrés à ce type de ressaut est celui de (Debabeche et Achour, 2007). Les auteurs dans leur étude ont examiné expérimentalement un ressaut hydraulique dans un canal triangulaire symétrique horizontal à angle d'ouverture de 90° , les ressauts contrôlés et B-minimum sous diverses conditions de l'écoulement incident (figure 2.1). Les auteurs ont déduit des relations modélisant l'effet du nombre de Froude incident sur la hauteur relative du seuil, le rapport des hauteurs conjuguées et la position relative du seuil.

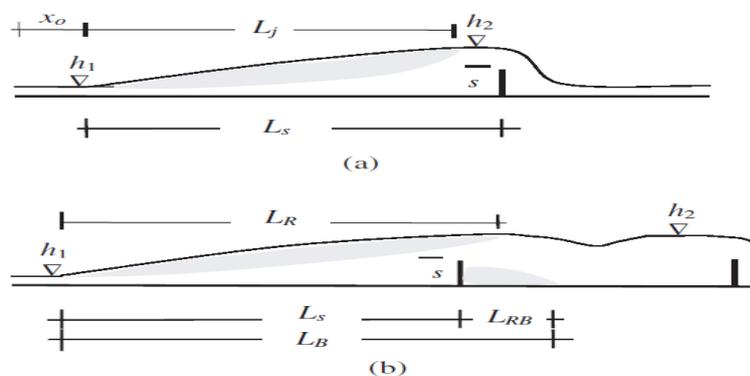


Figure 2. 1. Formation de ressauts hydrauliques : (a) ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince, (b) ressaut minimum-B forcé (Debabeche & Achour, 2007)

Rapport des hauteurs conjuguées

L'étude de Debabeche et Achour (2003) a été menée dans un canal horizontal de section triangulaire symétrique (figure 2.2), dont les parois sont inclinées à 45°, et d'une longueur de 4 mètres. L'écoulement initial est généré par un convergent en charge de section triangulaire. Pour chaque valeur de Froude F_1 (comprise entre 1,60 et 10,90), la hauteur du seuil est ajustée de manière à obtenir une longueur de ressaut Δx d'environ 4 à 5 cm.

La relation du rapport des hauteurs conjuguées est donnée par :

$$Y = 1 + \alpha \ln \left[\frac{(F_1 + 4)}{5} \right] \quad (2. 1)$$

Avec :

$\alpha = 3,96$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince (Achour & Debabeche, 2003);
 $\alpha = 3,78$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à crête large ; $\alpha = 3,33$ pour le ressaut forcé minimum-B par un seuil mince.

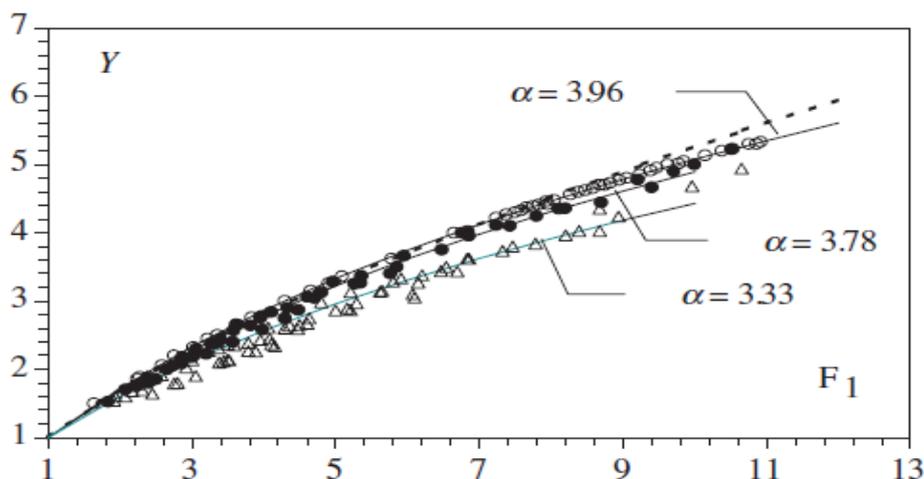


Figure 2. 2. Variation expérimentale de $Y(F_1)$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par (°) seuil à crête mince (Achour et Debabeche, 2003), (●) seuil à crête large, (Δ) ressaut forcé minimum-B par un seuil à crête mince, (- - -) $Y^* = h_2^*/h_1$. (Debabeche & Achour, 2007)

La figure (2.2) montre les données expérimentales du rapport des hauteurs conjuguées Y par rapport à la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$ pour les deux types de ressauts hydrauliques testés. Comme on peut le voir, Y peut être lié linéairement à S comme :

$$Y = 1 + \beta \quad (2. 2)$$

Avec :

$\beta = 0,96$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à crête mince (Achour et Debabeche, 2003) ; $\beta = 1,02$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à crête large ; $\beta = 0,82$ pour le ressaut forcé minimum-B par un seuil à crête mince.

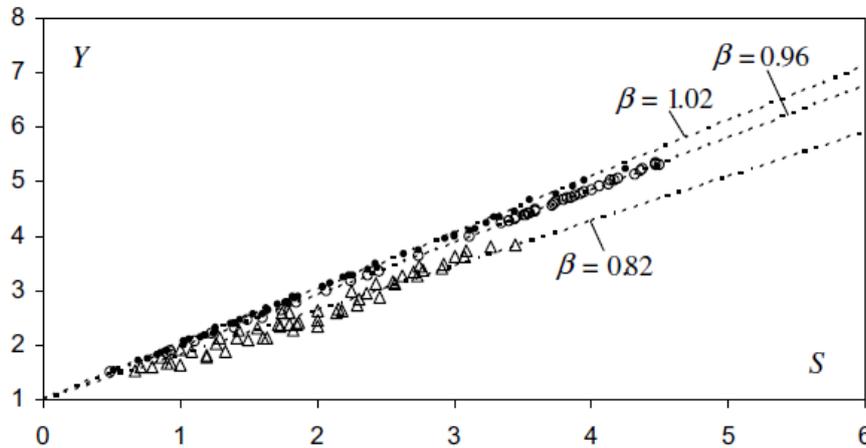


Figure 2. 3. Variation expérimentale de $Y(S)$ pour le saut hydraulique contrôlé par (°) seuil à crête mince (Achour et Debabeche, 2003), (•) seuil à crête large, (Δ) ressaut forcé minimum-B par un seuil à crête mince, (- - -) Éq. (2.2).(Debabeche & Achour, 2007)

Hauteur relative du seuil

Selon (Debabeche & Achour, 2007), la hauteur de seuil relative $S(F_1)$ est donnée par l'équation (2.3) :

$$S = \gamma \ln \left[\frac{(F_1 + 4)}{5} \right] \quad (2. 1)$$

Avec :

$\gamma = 4,13$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à crête mince (Achour et Debabeche, 2003) ; $\gamma = 3,71$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à crête large ; $\gamma = 4,06$ pour le saut forcé minimum-B par un seuil à crête mince.

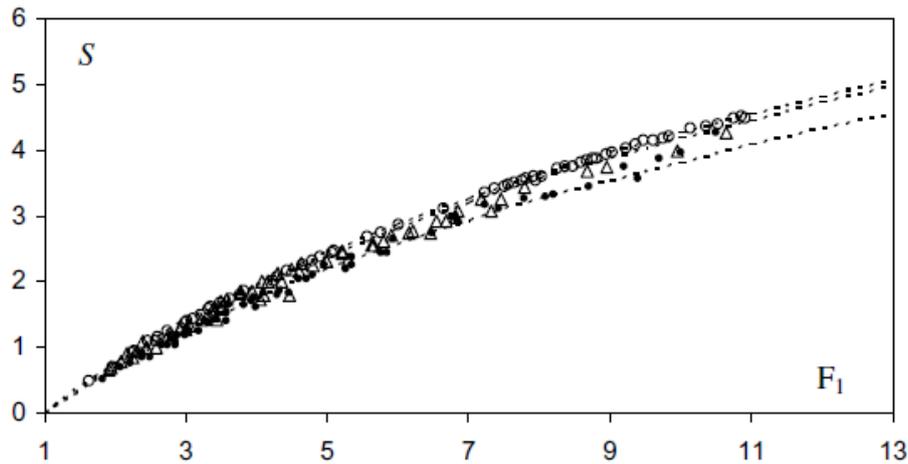


Figure 2. 4. Variation expérimentale de $S(F_1)$ pour le ressaut hydraulique contrôlé par (°) seuil à crête mince (Achour et Debabeche, 2003), (•) seuil à crête large, (Δ) minimum-B ressaut forcé par un seuil à crête, (- - -) Éq. (2.3). (Debabeche & Achour, 2007)

II.3. Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique

Les travaux de (Wanoschek et Hager, 1989) sont consacrés à l'étude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal symétrique, à pente géométrique horizontale et à parois latérales inclinées à un angle de 45° .

II.3.1. Approche de Hager et Wanoschek (1989)

Description des essais

Les essais faites par (Wanoschek et Hager, 1989) ont été menés dans un canal trapézoïdal symétrique, la pente des parois latérales est de 45° ($m=1$), de largeur de fond 0.2 m, de largeur de la grande base 1.6 m, de profondeur 0.7 m et une longueur de 8m. Les valeurs de $h_1=20$; 40 ; 60 et 80mm ont été examinés, pour lesquels $M=0.1$; 0.2; 0.3 et 0.4 respectivement.

Relation du rapport des hauteurs conjuguées

Dans un canal horizontal à section trapézoïdale, l'équation de quantité de mouvement appliquée aux parties initiale et finale d'un ressaut hydraulique est donnée pour :

$$A_1 = b \cdot h_1 + m \cdot h_1^2 \quad (2.4)$$

$$A_2 = b \cdot h_2 + m \cdot h_2^2 \quad (2.5)$$

Les centres de gravité des sections initiales et finales sont :

$$h_1 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \left(\frac{3b + 2mh_1}{A_1} \right) \quad (2.6)$$

$$h_2 = \frac{h_1^2}{6} \cdot \left(\frac{3b+2mh_2}{A_2} \right) \quad (2.7)$$

Les forces de pressions des sections initiales et finales sont :

$$P_1 = \bar{\omega} h_1 \bar{A}_1 \quad (2.8)$$

$$P_2 = \bar{\omega} h_2 \bar{A}_2 \quad (2.9)$$

L'application de cette équation donne :

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{mh_1^2}{3} + \frac{Q^2}{gA_1} = \frac{bh_2^2}{2} + \frac{mh_2^2}{3} + \frac{Q^2}{gA_2} \quad (2.10)$$

Le nombre de Froude F_1 , qui décrit l'écoulement dans la section initiale du ressaut, est le suivant :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 (b+2mh_1)}{g (bh_1+mh_1^2)^3} \quad (2.11)$$

En insérant le paramètre Y , qui définit le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, l'équation devient :

$$F_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{(1+2M)}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(\frac{1+2M}{3} \right) \right] \quad (2.12)$$

Tels que :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} \text{ et } M = \frac{mh_1}{b} \quad (2.13)$$

L'équation (2.12) à cinq variables est réduite à trois variables (F_1^2 , M , Y).

Les éléments connus sont Q , h_1 , b et m qui forment :

$$F_1^2 = \frac{Q^2 (b+2mh_1)}{g (bh_1+mh_1^2)^3} \quad (2.14)$$

$$\text{Avec : } M = \frac{mh_1}{b} \quad (2.15)$$

Connaissant F_1^2 et M on peut tirer à partir du graphique, le rapport $Y = \frac{h_2}{h_1}$ d'où $h_2 = Yh_1$

Longueurs caractéristiques du ressaut

a. Longueur du rouleau de fond

L'apparition du rouleau du fond est une caractéristique distincte des ressauts trapézoïdaux pour $F_1 > 4$; la (figure 2.5) représente un dessin de définition. L_u (la distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau du fond), L_b (la longueur du rouleau du fond) et h_b (la

hauteur maximale du rouleau du fond) peuvent être utilisées pour calculer les dimensions du rouleau du fond.

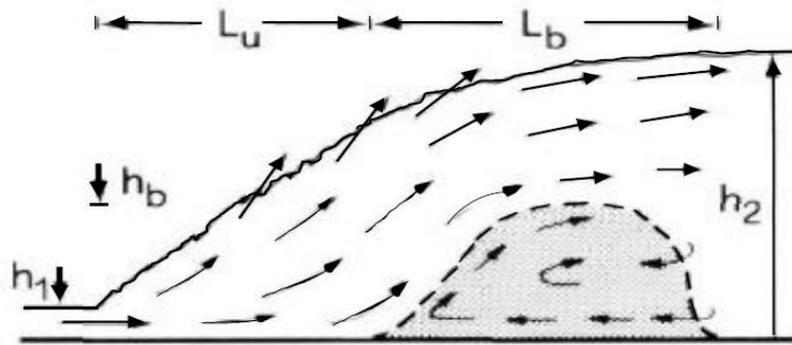


Figure 2.5. Schéma de définition selon (Wanoschek et Hager, 1989)

Les rapports $\lambda_u=L_u/h_2$, $\lambda_b=L_b/h_2$, et h_b/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 pour M varié sont représentés sur les figures (2.6.a à c). où h_2 désigne la profondeur de l'écoulement en aval du ressaut.

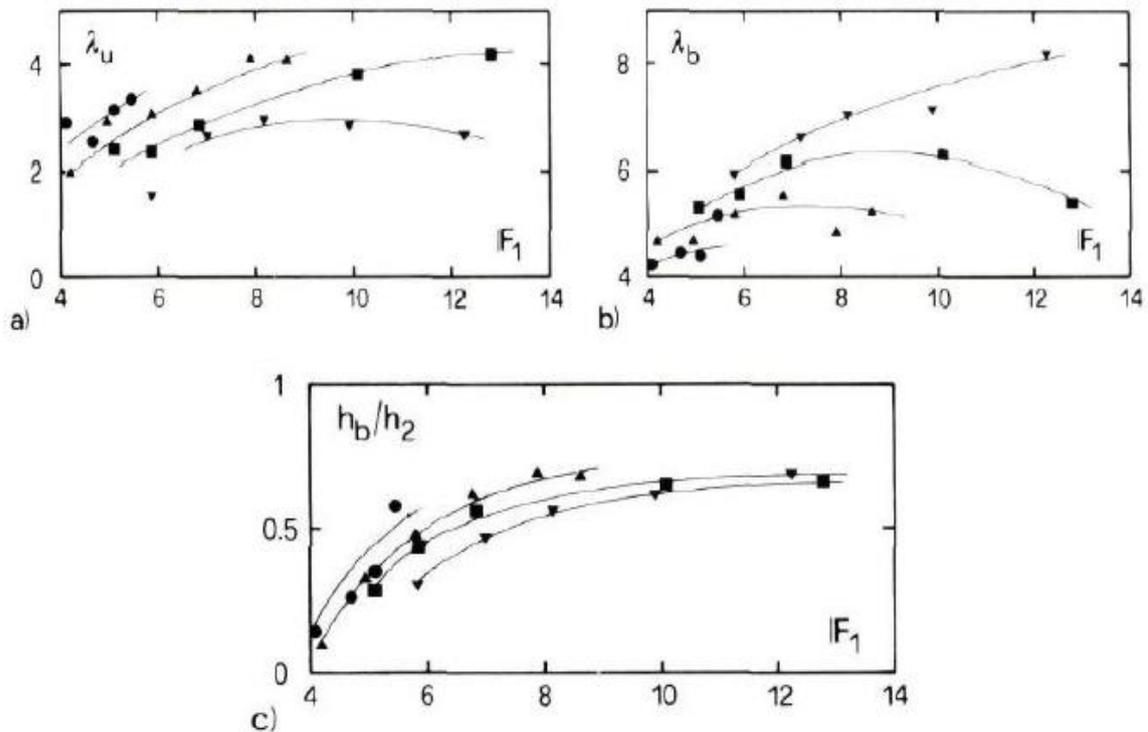


Figure 2. 6. Caractéristique principale du rouleau de fond: a) distance d'approche, b) longueur maximale, c) hauteur maximal, selon (Wanoschek et Hager, 1989)

Comme la montre la (figure 2.6) : i) $2 < \lambda_u < 4$, tout à fait près au pied du ressaut, ii) Pour une valeur bien déterminé de F_1 , λ_u augmente avec l'augmentation de M , iii) $\lambda_b \gg \lambda_u$ et peut atteindre des valeurs aussi supérieures que la valeur 8, iv) λ_b diminue avec l'augmentation de M , v) La fin du rouleau de fond ($\lambda_u + \lambda_b$) est pratiquement indépendante de M , et augmente avec l'augmentation de F_1 arrivant à 10,5, et vi) h_b/h_2 augmente avec l'augmentation de M et de F_1 .

b. Longueur du ressaut

La longueur de ressaut L_j est une autre longueur non négligeable, malgré le fait que de nombreuses définitions de mesure ont été proposées ; il était recommandé de laisser la position de la fin du ressaut où l'ébullition de surface disparaît. A ce stade, des poches de bulles d'air remontent à la surface, signalant la fin de la zone de dégazage ; naturellement, le degré de turbulence chute considérablement, signalant la fin du ressaut (Hager et Sinniger, 1989).

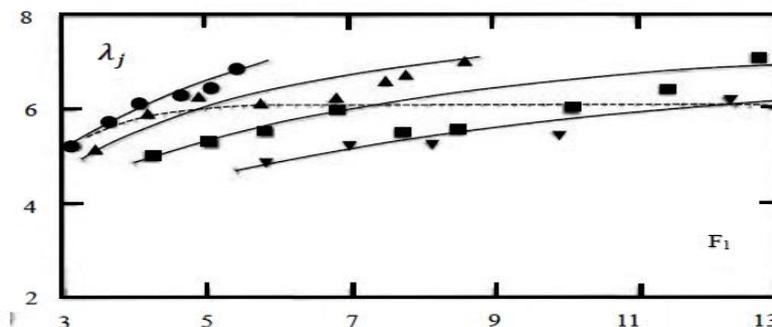


Figure 2. 7. Longueur relative λ_j du ressaut en fonction de F_1 et de M , selon (Wanoschek & Hager, 1989)

La (figure 2.7) représente les mesures expérimentales de (Wanoschek & Hager, 1989) ($m=1$) concernant la longueur relative L_j/h_2 en fonction du nombre de Froude F_1 et de M , de ce fait, il apparaît que la longueur relative L_j/h_2 dépend uniquement de M et F_1 .

Rendement du ressaut

La charge totale dans la section initiale du ressaut est écrite en utilisant le plan 0-0 :

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \cdot \frac{V_1^2}{2g} \tag{2.1}$$

La charge totale dans la section finale est donnée par :

$$H_2 = h_2 + \alpha_2 \cdot \frac{V_2^2}{2g} \tag{2.2}$$

α signifie le facteur de correction de l'énergie cinétique dont on admet que la valeur est égale à l'unité.

La perte de charge ΔH^* due au ressaut est la différence des charges totales initiale et finale:

$$\Delta H^* = H_1 - H_2^* \quad (2.18)$$

En raison du caractère permanent de l'écoulement, l'équation de continuité reste en vigueur, on écrit donc :

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2^* \cdot A_2 \quad (2.19)$$

Dans un canal à section droite trapézoïdale, le nombre de Froude de l'écoulement incident est décrit par la relation (2.11).

Le rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal horizontal s'écrit comme suit, en tenant compte des relations a priori :

$$\eta = \frac{1 - Y + \frac{F_1^2}{2} \left(1 - \frac{(h_1 - \frac{D}{2})^2}{(h_2 - \frac{D}{2})^2}\right)}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (2.20)$$

Le rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire est donné par (Hager et Wanoschek, 1987), dont $M \rightarrow \infty$:

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4}}{1 + \frac{F_1^2}{4}} \quad (2.21)$$

$$\eta = \left[1 - \frac{12}{F_1^4}\right]^{1/3} \quad ; \text{ For } F_1 > 3 \quad (2.22)$$

Le rendement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire est donné par (Hager et Wanoschek, 1987), dont $M=0$:

$$\eta^* = 1 - \frac{y + \frac{F_1}{2y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (2.23)$$

$$\eta = [1 - \sqrt{2}/F_1]^2 \quad ; \text{ For } F_1 > 2.5 \quad (2.24)$$

$Y = h_2^*/h_1$ étant le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.

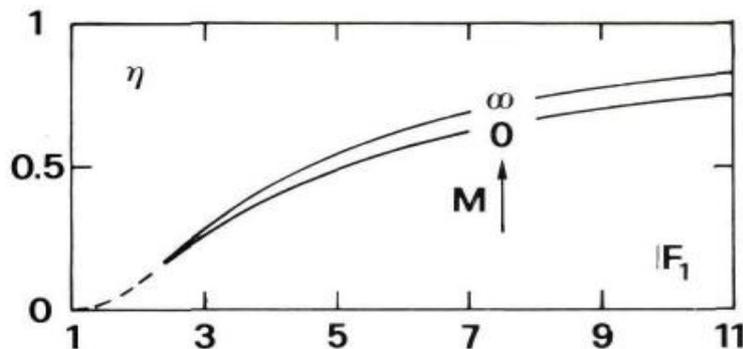


Figure 2.8. Rendement η du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude, $M \rightarrow \infty$: Cas du canal triangulaire. $M = 0$: Cas du canal rectangulaire, selon (Hager & Wanoschek, 1987)

Les courbes du rendement du ressaut dans les canaux trapézoïdaux sont comprises entre les courbes du rendement du ressaut dans le canal triangulaire et le canal rectangulaire, comme le montre la figure (2.8). De plus, le rendement du canal triangulaire est important pour un même nombre de Froude F_1 .

II.4. Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique

Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique a été relativement peu étudié. L'attention est donc portée sur l'analyse de ce phénomène dans ce type de canal. Il convient d'abord de décrire la géométrie du canal trapézoïdal asymétrique, puis de mentionner quelques travaux menés sur le sujet, notamment ceux de Diaz (1954) ainsi que de Kiri et al. (2018, 2020).

II.4.1. Description de la géométrie du canal trapézoïdal asymétrique

Un canal trapézoïdal asymétrique est un canal qui a une géométrie particulière, dans lequel ces parois latérales sont parallèles, et son fond est incliné transversalement par rapport à l'horizon (figure 2.9)

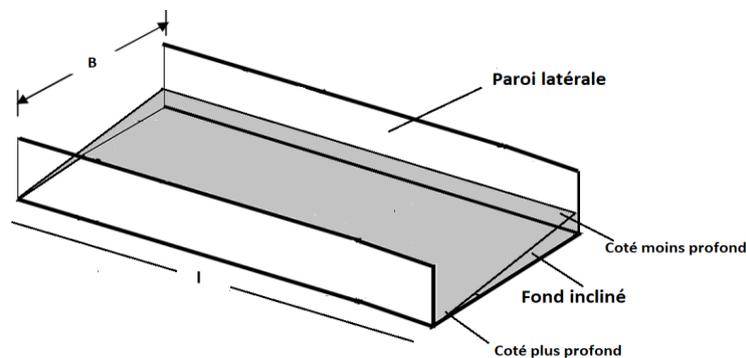


Figure 2.9. Géométrie d'un canal trapézoïdal asymétrique

II.4.2. Etude de Diaz, 1954

Représentation du modèle d'étude

(Diaz, 1954) ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique, les parois latérales du canal sont parallèles, et le fond est incliné transversalement avec un angle de $(m = \frac{1}{3})$ par rapport à l'horizon. Les auteurs ont modifié la largeur du canal 5 fois. La section de ce canal est présentée en coupe transversale dans la (figure 2.10). Les objectifs du travail de (Diaz, 1954) sont d'analyser en premier lieu, les caractéristiques de la vague déferlante et du ressaut hydraulique et d'étudier ensuite le critère de l'existence du ressaut hydraulique de toute forme ou distribution de vitesse.

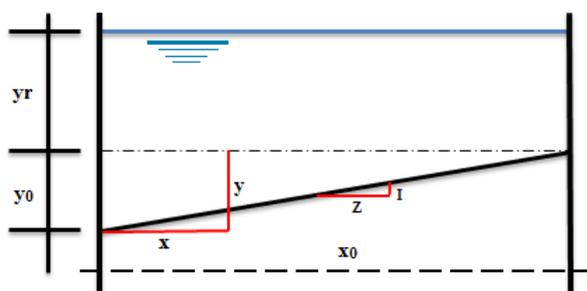


Figure 2.10. Section transversale du canal trapézoïdal asymétrique (Diaz, 1954)

Légende :

x_0 : Largeur de la section transversale
 y_0 : Différence de la profondeur de l'eau entre le côté plus profond et le côté peu profond
 Y_r : Profondeur de l'eau sur le côté peu profond
 Y_{moy} : Hauteur moyenne de l'eau
 X_a : Longueur du transfert latéral sur le côté peu profond du canal
 X_b : Longueur du transfert latéral sur le côté plus profond du canal
 V : Vitesse
 Q : Débit
 $P+M$: Force de pression + quantité de mouvement

G : Rapport de force de pression et de l'écoulement amont et aval

$$\Psi = P + M / At \cdot \frac{y_0}{2}$$

$A_t = \frac{x_0 y_0}{2}$ Surface du triangle (Air d'apparition du ressaut)

$$\Phi = y_r / y_0$$

$$\Theta = (Q / At)^2 / g y_0$$

F_1 = Nombre de Froude

γ : Poids spécifique de l'eau

ρ : Densité de la masse

g : Accélération de la gravité

- L'indice 1 est utilisé pour noter la section amont de la vague ;
- L'indice 2 est utilisé pour noter la section aval de la vague ;
- L'indice S est utilisé pour noter la bande.

Analyse de bande longitudinale

D'après (Diaz, 1954), la somme de la force de pression et de la quantité de mouvement, sur les deux côtés de la largeur canal (peu profond et plus profond) est différente. Cette différence a été expliquée par le retour latéral de la quantité de mouvement du côté plus profond vers le côté peu profond (augmentation sur le côté plus profond et une diminution sur le côté peu profond). Quand le retour latéral de la quantité de mouvement est très grand, le retour physique sera impossible. Les critères de l'existence du ressaut hydraulique sont basés donc sur l'ampleur (magnitude) du retour latéral de la quantité de mouvement.

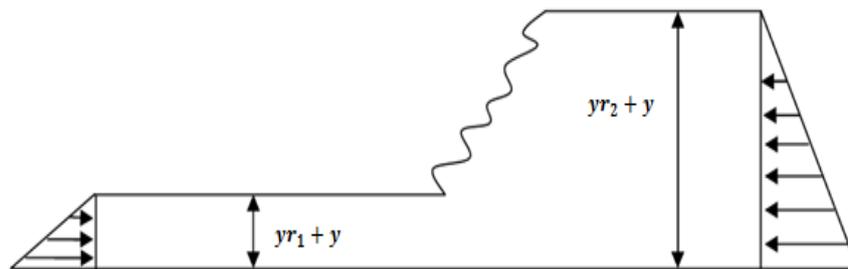


Figure 2.11. Section de la bande longitudinale, selon (Diaz, 1954)

L'équation de la quantité de mouvement est donnée par (Diaz, 1954), comme suit :

$$\frac{1}{2} \gamma (y_{r1} + y)^2 + v_1^2 (y + y_{r1}) = \frac{1}{2} \gamma (y_{r2} + y)^2 + v_2^2 (y + y_{r2}) \quad (2.25)$$

On a : $V = Q/A_t(1+2\phi)$, divisant par γy_o^2 , l'expression suivante est obtenue pour la bande.

$$P + M/\gamma y_o^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{y_o} + \phi_1\right)^2 + \Theta (y/y_o + \phi_1)/(1+2\phi_1)^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{y}{y_o} + \phi_2\right)^2 + \Theta \left(\frac{y}{y_o} + \phi_2\right)/(1+2\phi_2)^2 \quad (2.26)$$

Pour l'équilibre

$$(P+M)_{s1} = (P+M)_{s2} \quad (2.27)$$

On a :

$$G = (P+M)_{s2}/(P+M)_{s1} \quad (2.28)$$

$M=1$ pour l'équilibre

$M>1$ pour $P+M$; déficit en amont

$M<1$ pour $P+M$; surplus en amont

De la géométrie :

$$y/y_o = 1 - x/x_o \quad (2.29)$$

Remplaçant (2.29) dans (2.26) :

$$\frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{x_o} + \phi_1\right)^2 + \Theta \left(1 - \frac{x}{x_o} + \phi_1\right) / (1+2\phi_1)^2 = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{x}{x_o} + \phi_2\right)^2 + \Theta \left(1 - \frac{x}{x_o} + \phi_2\right) / (1+2\phi_2)^2 \quad (2.30)$$

Remplaçant (2.30) dans (2.28) :

$$G = \frac{\frac{1}{2} (1-x/x_0 + \phi_2)^2 + \theta (1-x/x_0 + \phi_2) / (1+2\phi_2)^2}{\frac{1}{2} (1-x/x_0 + \phi_1)^2 + \theta (1-x/x_0 + \phi_1) / (1+2\phi_1)^2} \quad (2.31)$$

La valeur de G_m sur toute la bande longitudinale, et la valeur de H représente la mesure approchée de la quantité de mouvement dans la couche limite. Autrement, le critère de séparation de la couche limite est souvent exprimé par le taux de changement de H plutôt que la valeur communément utilisée de H . La valeur de G ou $\frac{dG}{d(x_0-x)}$ peuvent être des mesures valables si le ressaut hydraulique est possible.

La valeur maximale de G se produit au fond le peu profond, où $x/x_0 = 1$

$$G_m = \frac{\frac{1}{2} \phi_2^2 + \theta \phi_2 / (1+2\phi_2)^2}{\frac{1}{2} \phi_1^2 + \theta \phi_1 / (1+2\phi_1)^2} \quad (2.32)$$

Le diagramme de G_m et $\frac{dG/d(x/x_0)}{x/x_0} = 1$ montre les valeurs correspondant aux essais de (Diaz, 1954). Ces essais sont effectués à 5 largeurs différentes de canal ou à 5 valeurs différentes de $\frac{y r_1}{y r_1 + y_0}$.

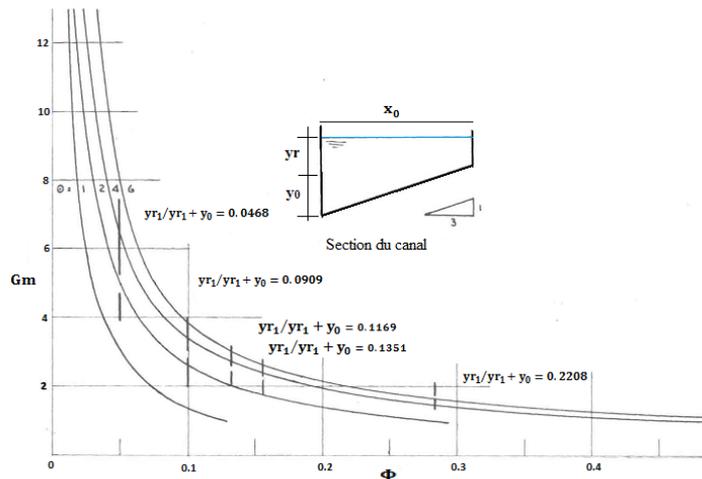


Figure 2.12 Diagramme adimensionnel de la force de pression plus le rapport d'écoulement de quantité de mouvement (aval/amont) du côté peu profond, selon (Diaz, 1954)

Les valeurs théoriques calculées pour le rapport G_m et tracées dans la (figure 2.12) sont constamment supérieures à l'unité. Ceci indique une augmentation de la quantité de mouvement du côté profond du canal et une diminution du côté peu profond.

Discussion des résultats expérimentaux

D'après l'étude (Diaz, 1954), deux types différents d'écoulement qui existent (figure 2.13):

- Des Ondes ondulantes à travers le canal et des rouleaux sur le côté peu profond. Une seconde vague bien définie a toujours été observée (2.13 a et 4.5b) ;
- Une onde perpendiculaire à la section transversale qui peut être appelée ressaut hydraulique ; aucune seconde vague n'a été observée (2.13 et 4.5d).

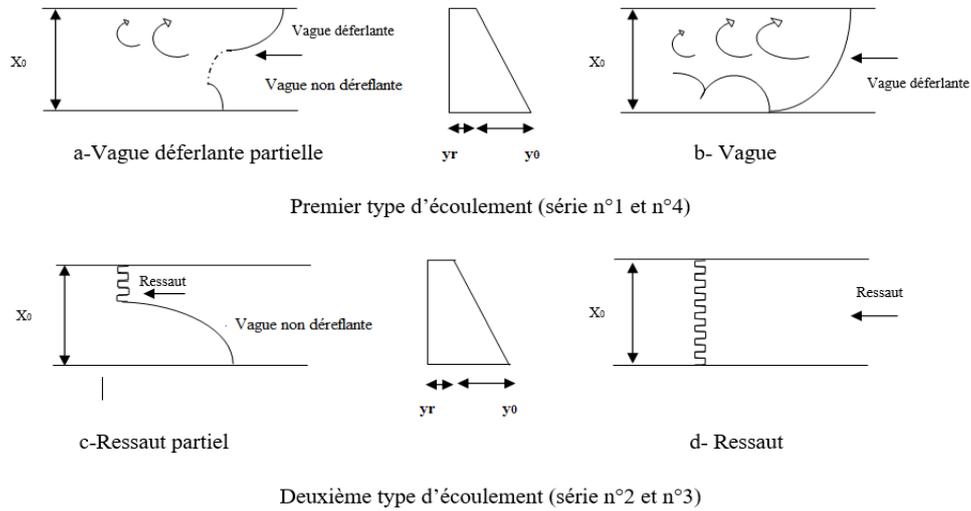


Figure 2.13. Schéma général de l'écoulement sur le canal non rectangulaire selon (Diaz, 1954)

La (figure 2.14) représente le rapport des hauteurs conjuguées moyennes en fonction du nombre de Froude, selon les travaux de (Diaz, 1954).

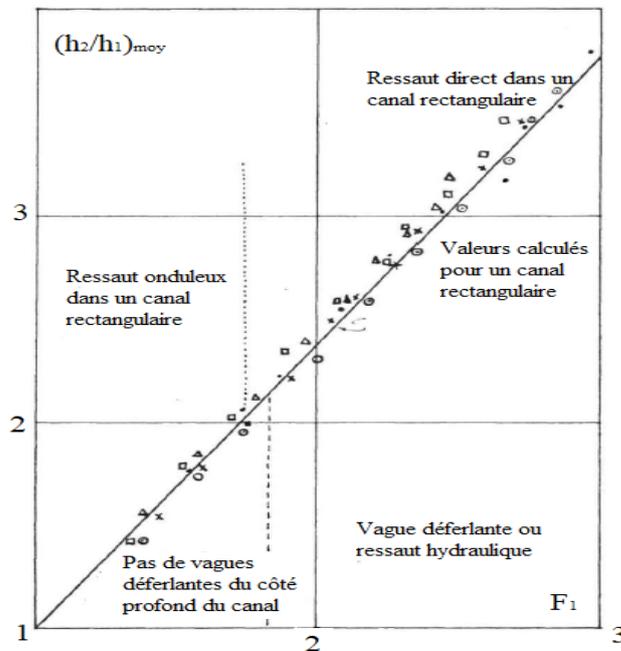


Figure 2.14. Rapport des hauteurs conjuguées moyennes en fonction du nombre de Froude, selon (Diaz, 1954)

D'après (Diaz, 1954), le ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal asymétrique est plus efficace que son homologue évoluant en canal rectangulaire. Les résultats de leur étude se résument dans les paramètres suivants : i) L'écoulement est divisé en deux types selon le nombre de Froude, si $F_1 < 1.83$, des vagues déferlantes partielles sont obtenues ; si $F_1 > 1.83$, des vagues déferlantes complètes sur toute la section du canal sont observées, ii) quelle que soit la forme géométrique du canal, le nombre de Froude est légèrement inférieur à 2, la valeur limite théorique pour les conditions de ressaut irrégulier et direct est $F_1 = 1.73$; dans un canal rectangulaire, et $F_1 = 1.83$; dans un canal trapézoïdale asymétrique, iii) ils existent deux types différents de l'écoulement : des vagues ondulantes et un ressaut hydraulique dans le côté peu profond. La ligne de démarcation entre ces deux types d'écoulement est donnée soit par la valeur de G ou bien par la valeur de $\frac{dG}{d(\frac{x}{x_0})}$ du côté peu profond. La condition de formation du ressaut est donc : $G_m < 2.8$ ou $\frac{dG}{d(\frac{x}{x_0})} = 1 < 18.4$, iv) la longueur du transfert latéral sur le côté plus profond est toujours plus petite que celle sur le côté peu profond, cette dernière augmente avec la diminution de la largeur du canal, et, v) La longueur du transfert latéral sur le côté peu profond dans un canal trapézoïdal asymétrique ($F_1 > 1.83$ et $G_m < 2.8$) est plus petite que la longueur dans un canal rectangulaire.

II.4.3. Etude de Kiri et al., 2018

Propagation d'une onde positive dans un canal trapézoïdal asymétrique

Les essais entrepris par (Kiri et al., 2018) sur un ressaut formé dans un canal trapézoïdal asymétrique. Cette étude s'est concentrée sur la propagation ascendante du ressaut. Des expériences détaillées ont été menées dans un canal mesurant 0,7 m de largeur sur 19 m de longueur, avec une pente de lit transversal de 1V:5H. Des mesures instationnaires ont été réalisées à l'aide de compteurs de déplacement acoustique, d'un profilomètre ADV et d'un vélocimètre ADV. Une caractéristique essentielle était le mouvement d'écoulement instationnaire en trois dimensions. Cela a donné lieu à un mouvement secondaire transitoire complexe et à un mélange transversal amélioré par rapport à la propagation des ondes positives dans les canaux rectangulaires. Alors que le mouvement secondaire ne différait pas significativement du mouvement observé dans les écoulements continus dans les canaux prismatiques, les résultats ont mis en évidence la nature transitoire et l'intensité élevée du mouvement secondaire dans les ondes positives.

Représentation du modèle d'étude

La (figure 2.15) représente le modèle de la section transversale du canal d'étude et la figure (2.16) représente le modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique (trapézoïdal asymétrique), selon (Kiri et al., 2018).

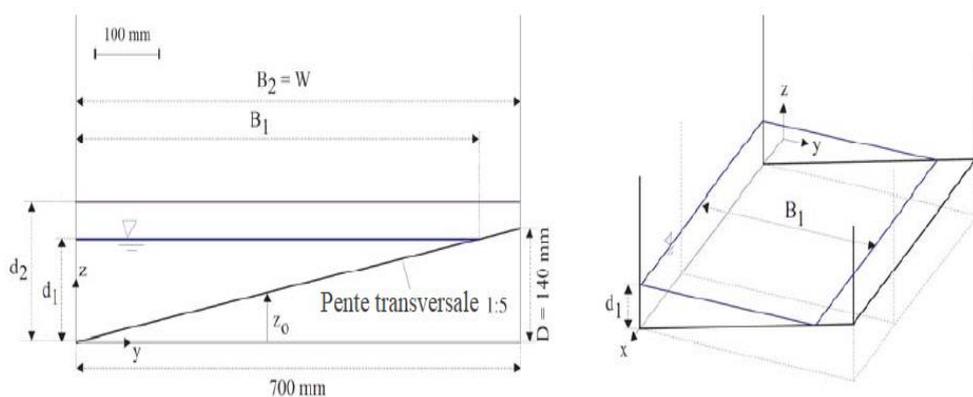


Figure 2.15. Modèle de la section transversale du canal, selon (Kiri et al., 2018)

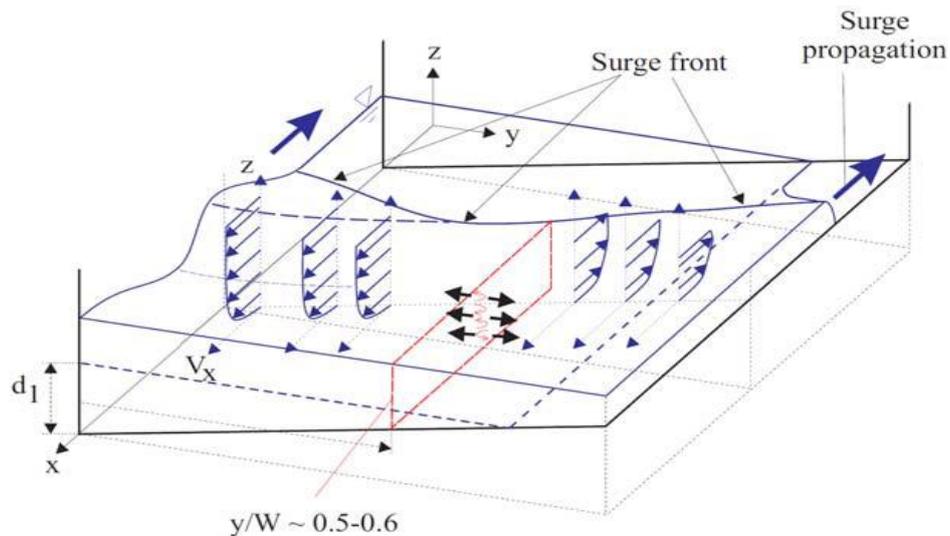


Figure 2.16. Modèle tridimensionnel du mouvement secondaire transitoire lors de la propagation positive du ressaut dans un canal composé prismatique ($d_1/D < 1$), selon (Kiri et al., 2018)

Discussion des résultats expérimentaux

L'objectif de cette recherche est d'analyser les processus d'écoulement tridimensionnel instable et de mélange transversal à l'aide de mesures de vitesse et d'augmentation de la surface libre. La présence de transferts de mouvement secondaire et de moment transversal de la section peu profonde vers la section plus profonde de la configuration de lit asymétrique a été démontrée en analysant l'écoulement constant dans la configuration de lit asymétrique. Lorsque le débit initial est stable (en amont de l'onde positive). Les expériences sur l'onde positive sont effectuées 25 fois pour chaque condition d'écoulement, et les données sont moyennées pour caractériser la valeur médiane et la fluctuation. En général, le champ turbulent instable diffère significativement de celui observé dans les canaux rectangulaires. Par conséquent, les résultats quantitatifs obtenus dans les canaux rectangulaires peuvent ne pas être immédiatement transférables aux canaux asymétriques non rectangulaires. Alors, dans ce type de sections 'asymétriques non rectangulaires', il faut s'attendre à un mouvement secondaire transitoire important, associé à des niveaux de contrainte de cisaillement turbulents plus élevés. En outre, (Kiri et al., 2018) disent que leurs résultats peuvent avoir des implications directes pour la modélisation numérique de la propagation des ondes dans les canaux trapézoïdaux artificiels et les canaux naturels de forme irrégulière.

D'après ces auteurs, les modèles numériques classiques à profondeur moyenne, tels que ceux basés sur les équations de St Venant et de Boussinesq, ne permettent pas, de modéliser le

mouvement turbulent tridimensionnel complexe dans des canaux irréguliers. Bien qu'une validation approfondie soit nécessaire et nécessite des données de modélisation physique suffisantes et de haute qualité, un modèle tridimensionnel complet de dynamique des fluides numérique (CFD) basé sur les équations de Navier-Stokes est requis (Leng et al., 2017).

II.4.4. Etude de Kiri et al., 2020

(Kiri et al., 2020) dans leur travail, s'intéressent à l'étude des caractéristiques de la propagation de l'onde positive dans un canal trapézoïdal asymétrique.

En comparant la propagation de l'onde positive dans les canaux rectangulaires avec celle dans les canaux asymétriques, la propagation dans les canaux asymétriques est caractérisée par un mouvement d'écoulement tridimensionnel instable, entraînant un mouvement secondaire transitoire compliqué (Kiri et al., 2020).

Contexte théorique

Selon (Kiri et al., 2020), le rapport $\frac{A_2}{A_1}$ est donné par la relation suivante :

$$\frac{A_2}{A_1} = \frac{1}{2} \times \frac{\sqrt{\left(2 - \frac{B'}{B}\right)^2 + 8 \frac{B'}{B} F_1^2 - \left(2 - \frac{B'}{B}\right)}}{\frac{B'}{B}} \quad (2.33)$$

Dont : B et B' représentent les largeurs caractéristiques liées à la forme de la section :

$$B = \frac{A_2 - A_1}{d_2 - d_1} \quad (2.34)$$

$$B' = \frac{\int_{A_1}^{A_2} \int g(d^2 - y) dA}{\frac{1}{2} g (d_2 - d_1)^2} \quad (2.35)$$

$$A = \frac{1}{2} \times \lambda \times d^2 \quad \text{et } B = \lambda \times d \quad d_1 < D \quad (2.36)$$

$$A = W \times \left(d - \frac{D}{2}\right) \quad \text{et } B = W \quad d_1 > D \quad (2.37)$$

Où λ^{-1} représente la pente transversale du lit, W est la largeur totale et D est la différence transversale d'élévation du lit, c'est-à-dire $D = W / \lambda$ (figure 4.9). Pour cette géométrie, trois conditions aux limites peuvent se produire en fonction des hauteurs conjuguées : (1) $d_1 < d_2 < D$, (2) $d_1 < D < d_2$ et (3) $D < d_1 < d_2$.

Le nombre de Froude pour un canal trapézoïdal asymétrique est donné par la relation suivante :

$$F_1 = \frac{U+V_1}{\sqrt{g \frac{A_1}{B_1}}} \quad (2.38)$$

Avec :

A ; section transversale du canal mesurée perpendiculairement à la direction de l'écoulement ;

B_1 ; largeur initiale de la surface libre, les indices 1 et 2 se réfèrent respectivement aux conditions d'écoulement immédiatement avant et après l'onde ;

V ; vitesse d'écoulement positive en aval ;

U ; la vitesse de l'onde positive en amont ;

g ; L'accélération de la pesanteur.

Représentation du modèle d'étude

Les expériences de (Kiri et al., 2020), ont été menées dans un canal trapézoïdal asymétrique de 19 m de long et 0,7 m de largeur, précédemment utilisé par Leng et Chanson (2015, 2016) avec une section rectangulaire. Le lit du canal a été modifié avec l'installation d'une pente transversale 1 V: 5H (c'est-à-dire $\lambda = 5$), en PVC et la pente longitudinale du lit était quasi-horizontale ($S_o = 0,22\%$).

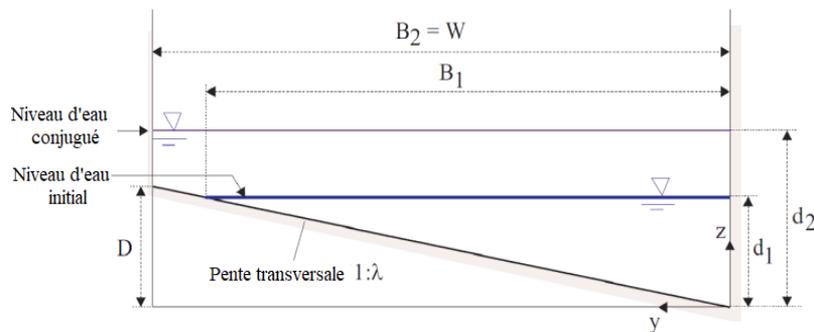


Figure 2.17. Croquis de définition regardant en aval : $\lambda = W/D = 5$ (Propagation de l'onde positive dans un canal asymétrique), selon (Kiri et al., 2020)

Discussion des résultats

Selon (Kiri et al., 2020), l'aspect majeur de la propagation positive de l'onde positive dans un canal asymétrique est le mouvement d'écoulement tridimensionnel instable. Dans cette étude, les auteurs ont utilisé des compteurs de déplacement acoustiques pour prendre des mesures instables, et les données ont été moyennées par ensemble. Le nombre de de Froude F_1

et la profondeur d'écoulement initiale relative d_1/D ont été utilisés pour déterminer le modèle d'écoulement de déferlement positif. Lors de la propagation du front d'onde, le bord d'attaque de l'onde arrive en premier dans la partie peu profonde. Cela a entraîné un mélange turbulent tridimensionnel associé à la formation des traces superficielles et à un mouvement secondaire transitoire compliqué derrière l'amont d'onde. Alors que les observations actuelles sont similaires à celles faites auparavant dans les canaux rectangulaires, la nature tridimensionnelle du front de surtension dans le canal asymétrique non rectangulaire était une différence significative.

II.5. Conclusion

L'étude des ressauts hydrauliques dans des canaux à sections non rectangulaires permet d'approfondir la compréhension des phénomènes complexes influencés par la géométrie des ouvrages. Dans ce chapitre, le ressaut hydraulique est étudié dans des canaux à section triangulaire, trapézoïdale symétrique et asymétrique. Les analyses détaillées de ces configurations fournissent des informations cruciales pour l'optimisation de la conception des infrastructures hydrauliques, garantissant ainsi une gestion plus efficace des flux d'eau et une réduction des pertes énergétiques.

(Debabeche & Achour, 2007) ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Les auteurs ont proposé des équations adimensionnelles régissant à la fois le rapport des hauteurs conjuguées Y et la hauteur relative du seuil S pour les trois types de ressauts hydrauliques évalués. Ils ont prouvé que Y pourrait être lié linéairement à S , alors que Y et S sont tous deux liés au nombre de Froude incident F_1 par une loi logarithmique. Si l'un de S ou F_1 est donné, la relation généralisée $f(S, F_1, \lambda) = 0$ est bien définie et permet une détermination directe de l'emplacement relatif du seuil.

Le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique à pente latérale de 45° a fait l'objet de l'étude de (Wanoschek et Hager 1989), les profils triangulaires et rectangulaires ont été considérés comme des cas extrêmes du profil trapézoïdal. Les auteurs ont présenté donc, une description détaillée sur ce type de ressaut, indiquant pour la première fois l'apparition d'un rouleau de fond pour $F_1 > 4$, et également l'absence d'un rouleau de surface. Dans cette étude, (Wanoschek et Hager, 1989) montrent que le rendement des ressauts dans les canaux trapézoïdaux est beaucoup plus efficace que dans les canaux rectangulaires. Contrairement aux

ressauts hydrauliques dans les canaux rectangulaires, les ressauts trapézoïdaux sont caractérisés par de fortes propriétés d'écoulement spatial. L'existence d'un rouleau de fond et de zones de retour latérales est une caractéristique unique des ressauts trapézoïdaux.

Dans le domaine du ressaut hydraulique évoluant dans un canal à section trapézoïdale asymétrique, le travail de (Diaz, 1954) a d'abord été présenté. Les objectifs de leur travail sont d'abord d'étudier les caractéristiques de longueur et de hauteur du ressaut hydraulique. Selon cet auteur, les critères de formation d'un ressaut hydraulique sont liés à l'amplitude du retour latéral de la quantité de mouvement, cela s'explique par l'augmentation de la quantité de mouvement du côté le plus profond du canal et aussi la diminution de ce moment du côté le moins profond. Par conséquent, les deux conditions pour la formation d'un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique sont $F_1 > 1.83$ et $G_m < 2.8$.

En deuxième lieu, nous avons présenté les travaux effectués par (Kiri et al., 2018, 2020), qui s'intéressaient à l'étude de la propagation de l'onde positive dans un canal trapézoïdal asymétrique. En 2018, (Kiri et al.) ont analysé les processus d'écoulement tridimensionnel instable et de mélange transversal à l'aide de mesures de vitesse et d'augmentation de la surface libre. La présence de transfert de mouvement secondaire et de moment transversal de la section peu profonde vers la section plus profonde de la configuration de lit asymétrique a été démontrée en analysant l'écoulement constant dans la configuration de lit asymétrique.

En 2020, ces derniers montrent que, la grande différence entre les canaux d'une géométrie rectangulaire et ceux d'une géométrie trapézoïdale asymétrique s'agit de la nature tridimensionnelle de l'amont de l'onde dans les canaux trapézoïdaux asymétriques.

Conclusion de la première partie

L'étude bibliographique consiste à faire la revue des littératures, cette dernière permet de répertorier les travaux de recherche déjà entrepris concernant le ressaut hydraulique. La rédaction de cette bibliographie permet de rehausser notre travail de recherche et d'appuyer nos opinions par des affirmations ou des démonstrations déjà entreprises par d'autres auteurs.

Les principales investigations sur le ressaut hydraulique ont été reportées à travers deux chapitres :

Le premier chapitre a été consacré au ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, ce type de ressaut est considéré comme la base théorique des études dans ce domaine. Dans ce chapitre, nous avons représenté le phénomène du ressaut hydraulique. D'après (Hager et al., 1989) le ressaut hydraulique s'établit lorsqu'il y a une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors de passage du régime torrentiel $F_1 > 1$ au régime fluvial $F_1 < 1$, qui est également accompagné d'une agitation marquée de grandes pertes d'énergie. Pour cela, la relation du nombre de Froude a été bien décrite. Plusieurs travaux effectués sur les trois types de ressauts hydrauliques évoluant en canal rectangulaire (ressaut classique, ressaut contrôlé et ressaut forcé).

Le deuxième chapitre a traité le ressaut dans des canaux non rectangulaires :

- Commenant par l'étude de ressaut dans un canal triangulaire, À ce sujet, nous avons notamment évoqué les travaux de (Hager et Wanoschek, 1987), Et celle de (Debabeche & Achour, 2007).

- D'autres études ont été consacrées aux ressauts hydrauliques dans des canaux trapézoïdaux, qu'ils soient symétriques ou asymétriques. Nous avons d'abord abordé les travaux de (Wanoschek et Hager, 1989) relatifs au ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal symétrique de pente géométrique horizontale, à parois latérales inclinées d'un angle de 45° .

Par la suite, nous avons exposé plusieurs recherches concernant le ressaut hydraulique dans des canaux trapézoïdaux asymétriques, notamment l'étude de (Diaz, 1954), et celles de (Kiri et al., 2018, 2020). La représentation du modèle d'étude et la discussion de résultats de ces travaux a été bien décrite.

Conclusion de la première partie

L'étude bibliographique a montré que le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal asymétrique est plus performant en tant que dissipateur d'énergie que celui se développant dans une section rectangulaire.

Partie II :

Etude expérimentale

Introduction à la deuxième partie

Les études expérimentales ont pour but de comprendre le comportement global du phénomène de ressaut hydraulique. Les travaux de la deuxième partie de notre étude, consistent à analyser expérimentalement les caractéristiques du ressaut hydraulique.

Des travaux expérimentaux seront réalisés, dans deux cas différents : distribution homogène et distribution non homogène de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal. Afin d'atteindre les objectifs ciblés, plusieurs essais sont réalisés sur deux modèles différents au niveau de deux laboratoires de recherche :

- ✓ Le premier modèle se retrouve au niveau du laboratoire d'hydraulique des Constructions (HECE) à l'université de Liège, ce dernier se compose principalement d'un canal rectangulaire de 10m de long et 0.985m de largeur ;
- ✓ Le deuxième modèle se retrouve au niveau du laboratoire de recherche hydraulique (LARGHYSS) à l'université de Biskra, le canal est d'une section trapézoïdale asymétrique, de 7m de long et 0.305m de largeur.

Dans le cas du premier modèle, l'objectif du travail sera d'étudier les propriétés du ressaut dans un canal rectangulaire en aval d'une vanne rectangulaire, et 4 vannes dentées différentes.

Dans le cas du deuxième modèle, le but du travail sera d'étudier le ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal asymétrique à vannes parallélogrammes et triangulaire.

Dans le but d'organiser ce travail, nous allons diviser la partie expérimentale en deux parties, la première sera sacrée pour le modèle I (canal rectangulaire) et la deuxième pour le modèle II (canal trapézoïdal asymétrique).

Premier modèle : (Canal rectangulaire)

Le premier modèle se compose de trois chapitres :

- Le premier chapitre représentera la description du modèle expérimental et de l'appareillage de mesure utilisés pour entamer l'étude expérimentale du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire ;
- Le deuxième chapitre sera consacré à l'étude expérimentale du ressaut dans le cas d'un canal rectangulaire à vanne rectangulaire, afin de donner une description détaillée des essais ;
- Le troisième chapitre sera dédié à l'étude expérimentale du ressaut dans un canal rectangulaire en aval de 4 vannes dentées, pour but de présenter le processus expérimental.

Deuxième modèle : (Canal trapézoïdal asymétrique).

Le deuxième modèle sera divisé en deux chapitres :

- Le quatrième chapitre sera consacré à la description du modèle expérimental et du matériel de mesure utilisé afin d'aborder l'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique, d'abord équipé de deux vannes parallélogrammes, puis d'une vanne triangulaire.
- Le cinquième chapitre traitera l'étude expérimentale afin de donner une description détaillée des essais.

MODELE I
(Canal rectangulaire)

Chapitre I:

Description du premier modèle expérimental

MODELE I (Canal rectangulaire)

Chapitre I : Description du premier modèle expérimental

I.1. Introduction

Ce chapitre est consacré à la description du modèle expérimental et de l'instrumentation utilisée pour l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Deux configurations seront examinées :

- Ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire en aval d'une vanne rectangulaire ; Dans ce cas, la distribution de la hauteur de l'eau est homogène sur la largeur du canal.
- Ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire en aval de 4 vannes dentées ; Ces vannes possèdent des dents pour objectif de provoquer une distribution non homogène de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal.

I.2. Description du modèle expérimental

Le premier modèle physique se retrouve au laboratoire d'hydraulique des constructions (HECE) à l'université de Liège. Ce modèle est composé principalement d'un canal rectangulaire horizontal de 10m de long et 0.985 m de largeur, sa partie amont est équipée d'un réservoir alimenté par une pompe. L'eau est alors acheminée par la pompe vers le réservoir à l'aide d'une conduite circulaire.

Nous avons placé également dans le réservoir un crin de tranquillisation (figure 2.2). Ce dernier a pour rôle d'éviter les perturbations de la surface libre qui peuvent affecter le fonctionnement de la pompe. La pompe permet d'alimenter le réservoir avec une gamme de débits s'étendant de 0 à 0.15 m³/s.

Dans le cadre de cette étude, on a changé la vanne en amont 5 fois, la première est de forme rectangulaire et les quatre autres sont dentées. La vanne rectangulaire permet de distribuer la hauteur de l'eau homogènement sur la largeur du canal, tandis que les 4 vannes dentées provoquent une distribution non homogène de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal.

Le modèle est finalement équipé d'une vanne levante à l'extrémité aval du canal rectangulaire, cette dernière permet de régler la hauteur de l'eau dans le canal et également de positionner le ressaut hydraulique à l'abscisse voulue.

La figure (1.1) représente le modèle étudié :

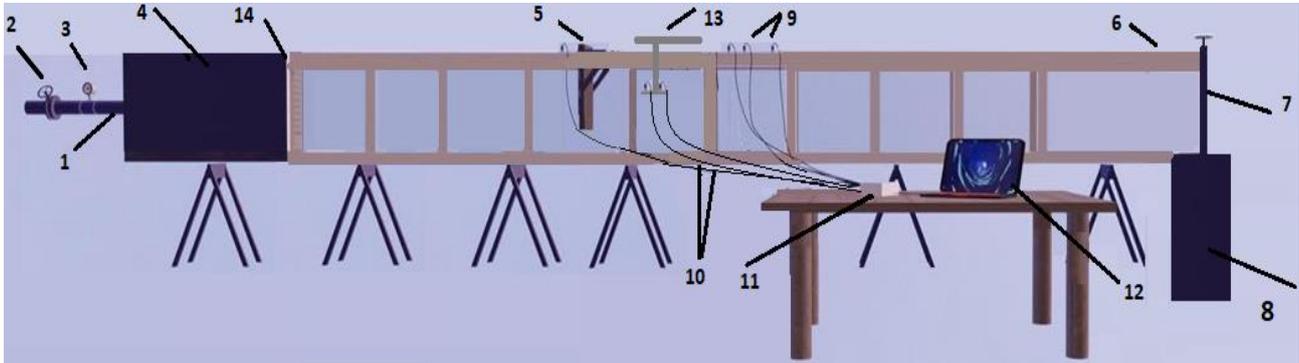


Figure 1. 1. Schéma simplifié du modèle de section rectangulaire, ayant servi à l'expérimentation

Légende :

- | | |
|-----------------------------------|-------------------------------|
| 1- Conduite d'alimentation ; | 10- Câbles ; |
| 2- Vanne de régulation de débit ; | 11- Boitier ; |
| 3- Débitmètre ; | 12- Ordinateur portable ; |
| 4- Réservoir ; | 13- Cadre ; |
| 5- Vanne réglable en amont ; | 14- Crin de tranquillisation. |
| 6- Canal rectangulaire ; | |
| 7- Vanne levante en aval ; | |
| 8- Canal de récupération ; | |
| 9- Sondes à ultrasons ; | |

I.2.1. Caractéristiques du canal rectangulaire

Le canal étudié dans le cadre de cette étude possède la caractéristique d'être lisse avec une pente nulle, le fond et les parois du canal sont en verre.

Les principales caractéristiques du canal sont reprises dans le tableau (1.1) :

Tableau 1. 1. Caractéristiques du canal rectangulaire

/	Longueur (m)	Largeur (m)	Q max (m ³ /s)	Charge max (m)
Canal	10	0.985	0.15	0.5



Figure 1 2. Photographie du crin de tranquillisation

I.2.2. Vannes réglables en amont

5 vannes réglables (1 vanne rectangulaire et 4 vannes dentées), ont été placées en amont du canal rectangulaire en remplaçant chaque fois, l'une par l'autre.

I.2.2.1. Vanne rectangulaire

La vanne rectangulaire est représentée par les deux figures en-dessous (figure 1.3 et 1.4).



Figure 1. 3. Photographie de la vanne rectangulaire

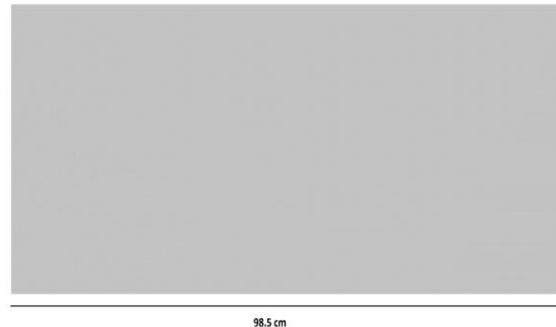


Figure 1. 4. Géométrie de la vanne rectangulaire

I.2.2.2. Vannes dentées

Les vannes dentées sont constituées de deux éléments principaux : vanne rectangulaire et des dents, ces dernières étant placées sous la vanne rectangulaire.

- Vanne dentée 1 (0.02m,2dents) : cette vanne se compose d'une vanne rectangulaire et 2 dents, la hauteur de chaque dent est 0.02m ;
- Vanne dentée 2 (0.02m,4dents) : cette vanne se compose d'une vanne rectangulaire et 4 dents, la hauteur de chaque dent est 0.02m ;
- Vanne dentée 3 (0.04m,2dents) : cette vanne se compose d'une vanne rectangulaire et 2 dents, la hauteur de chaque dent est 0.04m ;

- Vanne dentée 4 (0.04m,4dents) : cette vanne se compose d'une vanne rectangulaire et 4 dents, la hauteur de chaque dent est 0.04m.

a. Vanne dentée '1'

Les deux figures en dessous représentent la vanne dentée n°1 (0.02m, 2 dents) :



Figure 1. 5. Photographie de la vanne dentée 1 (0.02m, 2dents)

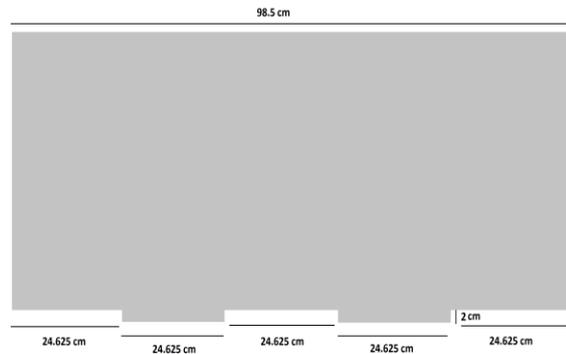


Figure 1. 6. Géométrie de la vanne dentée 1 (0.02m, 2dents)

b. Vanne dentée '2'

Les deux figures en dessous représentent la vanne dentée n°2 (0.02m, 4 dents) :



Figure 1. 7. Photographie de la vanne dentée 2 (0.02m, 4dents)

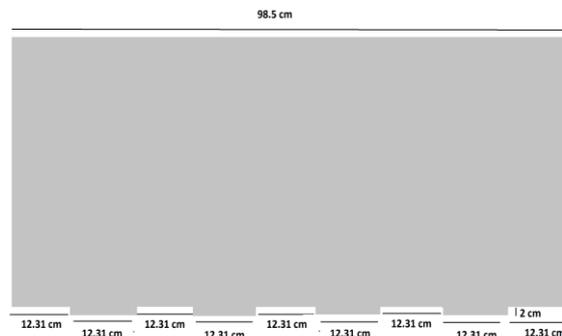


Figure 1. 8. Géométrie de la vanne dentée 2 (0.02m, 4dents)

c. Vanne dentée '3'

Les deux figures en dessous représentent la vanne dentée n°3 (0.04m, 2 dents) :



Figure 1. 9. Photographie de la vanne dentée 3 (0.04m, 2dents)

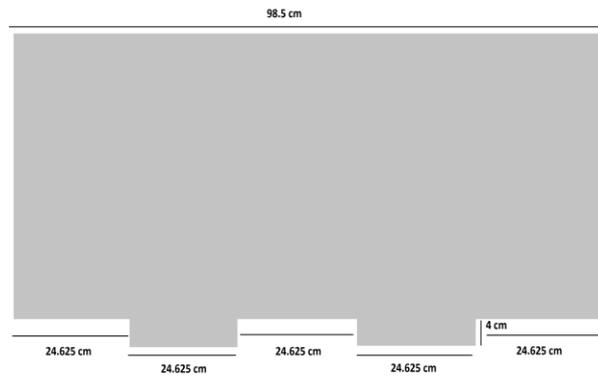


Figure 1. 10. Géométrie de la vanne dentée 3 (0.04m, 2 dents)

d. Vanne dentée '4'

Les deux figures en dessous représentent la vanne dentée n°4 (0.04m, 4 dents) :



Figure 1. 11. Photographie de la vanne dentée 4 (0.04m, 4dents)

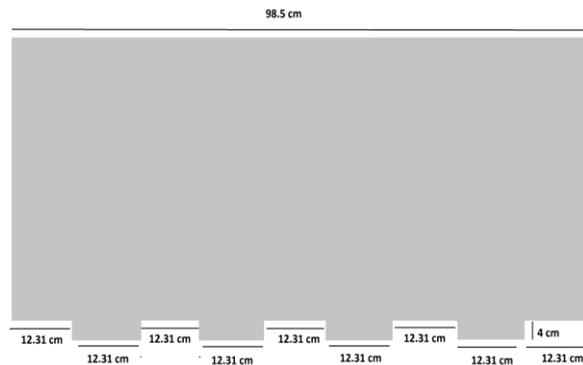


Figure 1. 12. Géométrie de la vanne dentée 4 (0.04m, 4dents)

I.2.3. Vanne levante en aval

Une vanne levante a été placée à l'extrémité aval du canal rectangulaire, cette vanne nous a permis de régler la hauteur d'eau dans le canal et ainsi de bien positionner le ressaut hydraulique, (figure 1.13).



Figure 1. 13. Photographie de la vanne levante à l'aval du canal rectangulaire

I.3. Description de l'appareillage de mesure

Plusieurs appareils ont été utilisés afin de mesurer les hauteurs de l'eau et les débits. On s'intéresse ici à décrire les principales caractéristiques de ces instruments.

I.3.1. Mesure de surfaces libres

Dans ce modèle, les hauteurs d'eau sont mesurées à l'aide des sondes de surface libre. Ce sont des sondes à ultrason de type mic+ (figure 1.14)



Figure 1. 14. Sonde à ultrason de type mic+

Ces sondes permettent de déterminer la plus courte distance entre le bas de la sonde et tous les points situés dans une zone d'acquisition. La sonde de surface libre 65-350mm est montrée par les figures 1.15 et 1.17, et celle de 65-450 mm est montrée par les figures 1.16 et 1.18.



Figure 1.15. Photographie de la sonde 30-250mm

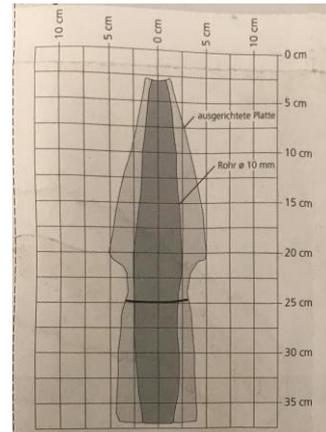


Figure 1.16. Zone d'acquisition de la sonde 30-250mm



Figure 1. 17. Photographie de la sonde 65-450mm

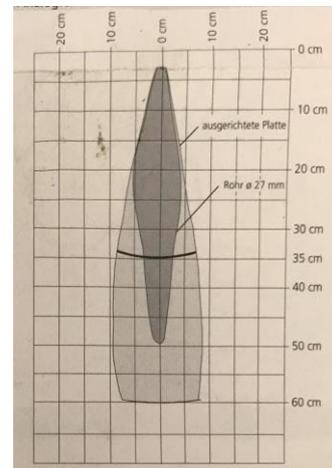


Figure 1.18. Zone d'acquisition de la sonde 65-450mm

La zone d'acquisition possède alors l'allure d'un cône de mesure. Ces sondes fournissent en pratique des données en volt, pouvant ensuite être converties en distance. Pour l'ensemble de la gamme de distance couverte par la sonde, cette dernière fournit des valeurs en volt comprises entre 0V et 10V. Le voltage et la distance entre l'objet et la sonde sont corrélés positivement. Par exemple, pour les sondes de surface libre 30-250 mm et 65-450 mm, on obtient les résultats suivants :

Tableau 1 2. Gamme de données d'entrées et de sorties pour les sondes 30-250 mm et 65-450 mm

Sondes	Distance entre la sonde et l'objet [mm]	Signal de sortie [V]
Sonde (30-250 mm)	30	0
	250	10
Sonde (65-450 mm)	65	0
	450	10

La présence de cette zone d'acquisition en forme de cône et l'utilisation d'ultrason posent également des problèmes d'interaction entre les différentes sondes présentes sur le canal. Des solutions existent qui permettent aux deux signaux de ne pas interagir entre eux. On peut par exemple choisir de déphaser les enregistrements. On définit ainsi des intervalles de temps pendant lesquelles une sonde enregistre pendant que l'autre n'enregistre pas et inversement. Cependant, on a choisi dans ce travail :

- De laisser une distance de 0.3m entre chaque sonde et l'autre, afin que leurs zones d'acquisition ne rentrent pas en interaction. Ce choix a pour conséquence de réaliser des acquisitions dans le cadre des mesures de hauteur de surface libre sur largeur du canal (profil transversal).
- De laisser une distance de 0.5m entre chaque sonde et l'autre pour les sondes placées sur la longueur du canal, et 0.2m entre les deux sondes du réservoir, afin que leurs zones d'acquisition ne rentrent pas en interaction. Ce choix a pour conséquence de réaliser des acquisitions dans le cadre des mesures de hauteur de surface libre sur longueur du canal (profil longitudinal).

Les sondes sont reliées à l'ordinateur par l'intermédiaire d'un boîtier d'acquisition de données, illustré sur la figure ci-dessous :



Figure 1.19. Photographie du boîtier

Ce boîtier a pour rôle de transformer les signaux émis en volt par les sondes, en un signal également en volt pouvant être traité de manière informatique.

Les sondes de surfaces libres sont également associées au logiciel Labview. Ce dernier sert d'interface pour l'utilisateur et permet de choisir la fréquence et le temps d'enregistrement pour chaque sonde utilisée sur le modèle.

Un cadre qui contient deux sondes (figures 1.20 et 1.21) est également relié à l'ordinateur par l'intermédiaire de ce boîtier. Ce cadre est associé au logiciel Macro qui sert à choisir l'intervalle de mesure des deux sondes de façon automatique.

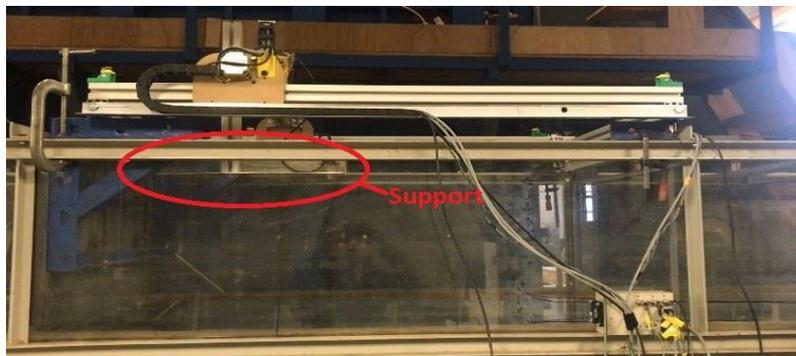


Figure 1.20. Photographie de cadre pour le profil longitudinal

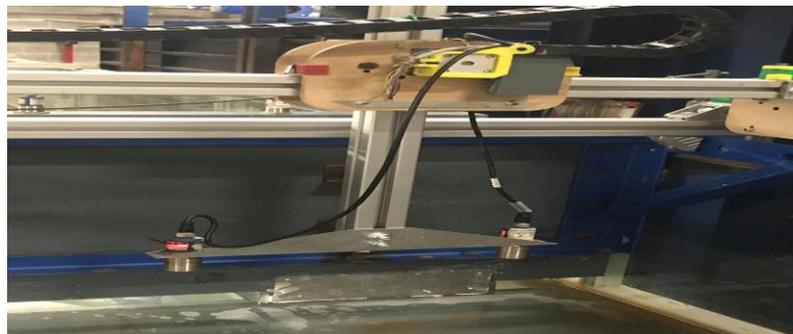


Figure 1. 21. Photographie du cadre pour le profil transversal

I.3.2. Mesure de débits

Le débit d'eau injectée dans le modèle physique est mesuré par un débitmètre situé entre la pompe et la conduite d'alimentation, (figure 1.22).



Figure 1. 22. Photographie du débitmètre

Le débit est alors obtenu par simple lecture sur un écran incorporé dans le débitmètre. Le débit est fourni en litre/seconde. Ce dernier est entre 0 l/s et 150 l/s.

I.4. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la représentation du premier modèle expérimental, qui a servi à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal, en aval d'une vanne rectangulaire et 4 vannes dentées.

Dans ce chapitre nous avons abordé la description du modèle expérimental et l'appareillage de mesure utilisés. Nous avons tout illustré avec des photographies, dans le but de prendre toutes les mesures nécessaires quant aux caractéristiques du ressaut hydraulique.

Les hauteurs d'eau sont mesurées à l'aide des sondes microsonic à ultrasons. En ce qui concerne les mesures des débits, nous avons utilisé un débitmètre numérique, où la valeur du débit est obtenue par simple lecture sur son écran.

**Chapitre II:
Etude expérimentale
(Vanne rectangulaire)**

MODELE I (Canal rectangulaire)

Chapitre II : Etude expérimentale (Vanne rectangulaire)

II. 1. Introduction

Afin d'aborder l'étude expérimentale dans un canal rectangulaire derrière une vanne rectangulaire, nous présenterons en détail la description des essais, notamment l'emplacement et le calibrage des sondes, le traitement du signal et l'exploitation des données. Ensuite, nous allons décrire d'une manière détaillée la procédure expérimentale.

Plusieurs essais sont effectués afin de déterminer la variation de la hauteur de l'eau sur le réservoir et sur le canal rectangulaire. Le nombre de configurations différentes étant important (changement de l'ouverture de la vanne rectangulaire ainsi du débit).

II.2. Méthodologie des expérimentations

II.2.1. Position du problème

Dans ce cas, la distribution de la hauteur de l'eau est homogène sur la largeur du canal. Plusieurs paramètres seront donc étudiés et vérifiés dans ces conditions, tels que : les profils transversaux et longitudinaux ; la hauteur supercritique du ressaut ; l'influence de la variation des hauteurs sur la charge ; Et enfin, la dissipation d'énergie dans le canal.

II.2.2. Description des essais

II.2.2.1. Emplacement des sondes

a. Mesure de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal

Afin de mesurer la hauteur de l'eau sur la largeur du canal, un cadre portant 2 sondes sera placé sur le canal. La gamme d'acquisition de ces deux sondes est 65-450 mm.

Le cadre est placé transversalement sur le canal derrière la vanne rectangulaire, ce cadre contient un support qui porte deux sondes, la distance entre ces sondes est 0.3 m. Les

mesures ont été prises pour chaque centimètre de $y_i=0.04\text{m}$ jusqu'à $y_f=0.97\text{m}$, pour les 3 abscisses : $x_1=0.17\text{m}$, $x_2=0.27\text{m}$ et $x_3=0.37\text{m}$.

(33 valeurs sont mesurées à la fois par les sondes 1 et 2, entre 0.3m et 0.63m).

Les sondes à ultrason sont surtout intéressantes car elles permettent de réaliser des mesures sur une durée choisie et avec une fréquence choisie, dans cette étude, on a choisi une durée de 5s et une fréquence de 100hz, (figure 2.1).

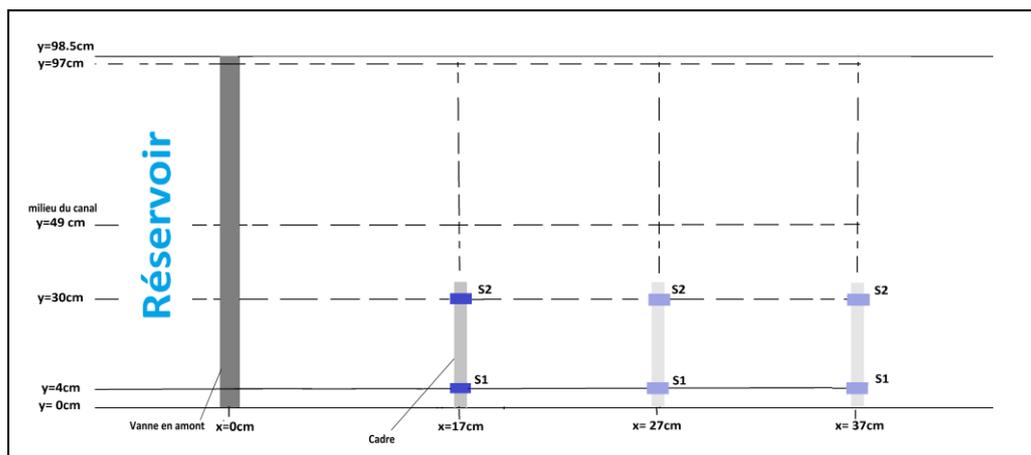


Figure 2. 1. Vue en plan de l'emplacement des sondes sur la largeur du canal

b. Mesure de la hauteur de l'eau sur la longueur du canal

Afin de mesurer la hauteur de l'eau sur la longueur du canal, 7 sondes seront placées, comme décrit ci-dessous (voir la figure 2.2):

- Deux sondes sont placées au niveau du réservoir (0.5m en amont de la vanne rectangulaire) :
 - Sonde réservoir '1' : $y=0.49\text{m}$, $x=-0.5\text{m}$; gamme d'acquisition : 30-250mm;
 - Sonde réservoir '2' : $y=0.69\text{m}$, $x=-0.5\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-450 mm.
- Un cadre est placé longitudinalement sur le canal, juste derrière la vanne rectangulaire, ce cadre contient un support qui porte deux sondes, la distance entre ces deux sondes est 0.5m. Les mesures ont été prises pour chaque centimètre de 0.1m jusqu'à 1.37m :

- Sonde '3' : $y=0.49\text{m}$, $x_i=0.1\text{m}$; $x_f=0.87\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-450 mm;
- Sonde '4' : $y=0.49\text{m}$, $x_i=0.6\text{m}$; $x_f=1.37\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-450 mm;

(27 valeurs ont été mesurés par les sondes 3 et 4, entre 0.6m et 0.87m).

- Trois sondes sont placées derrière le cadre (à la fin du canal) :
 - Sonde '5' : $y=0.49\text{m}$, $x=1.45\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-450 mm ;
 - Sonde '6' : $y=0.49\text{m}$, $x=1.75\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-450 mm ;
 - Sonde '7' : $y=0.49\text{m}$, $x=2.05\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-450 mm.

Dans cette étude, on a choisi une durée de 5s et une fréquence de 100hz.

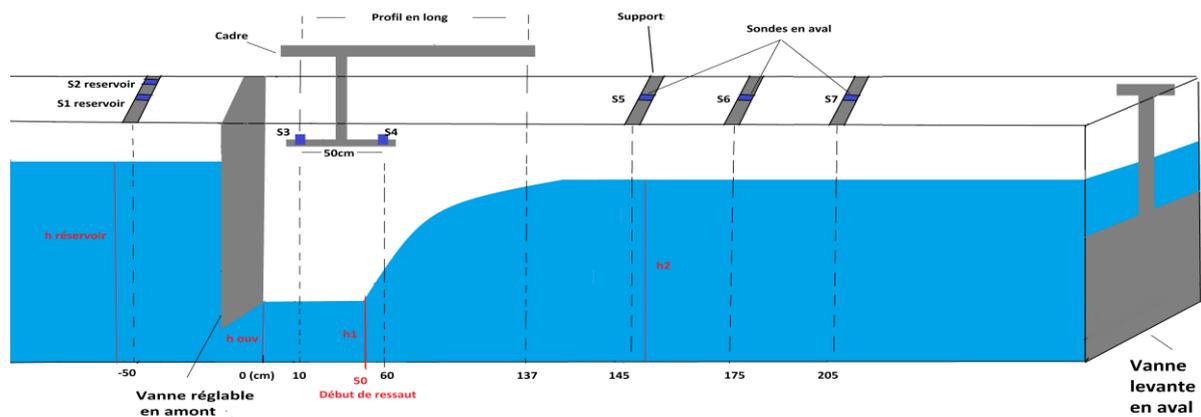


Figure 2. 2. Vue en long du canal rectangulaire et de son instrumentation

II.2.2.2. Calibrage des sondes

Afin de mesurer la hauteur de l'eau, nous allons tout d'abord calibrer nos sondes. Ces sondes donnent des résultats bruts en Volt, non exploitables directement. Cependant, le voltage fourni est relié de manière linéaire à la distance entre la sonde et la surface libre. La relation entre la valeur de sortie de la sonde, en Volt, et la distance entre la sonde et la surface libre est la suivante :

$$d = a.v + b$$

- d, la distance entre la sonde et le gabarit, en mètre ;
- V, la valeur moyenne de sortie de la sonde, en Volt ;

- a et b, les deux constantes que l'on cherche à déterminer par le tarage.

Afin de déterminer la constante a et la constante b, des gabarits possédant des hauteurs connues sont utilisés. La relation entre d et V étant linéaire.

La figure (2.3) représente le tarage des sondes et la détermination de la pente de la courbe de tarage.

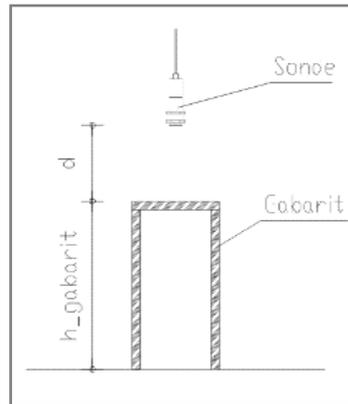


Figure 2. 3. Tarage des sondes - Détermination de la pente de la courbe de tarage

On obtient alors la courbe suivante, fournissant la valeur de 'a' et la valeur de 'b' par l'intermédiaire d'une interpolation linéaire (figure 2.4) :

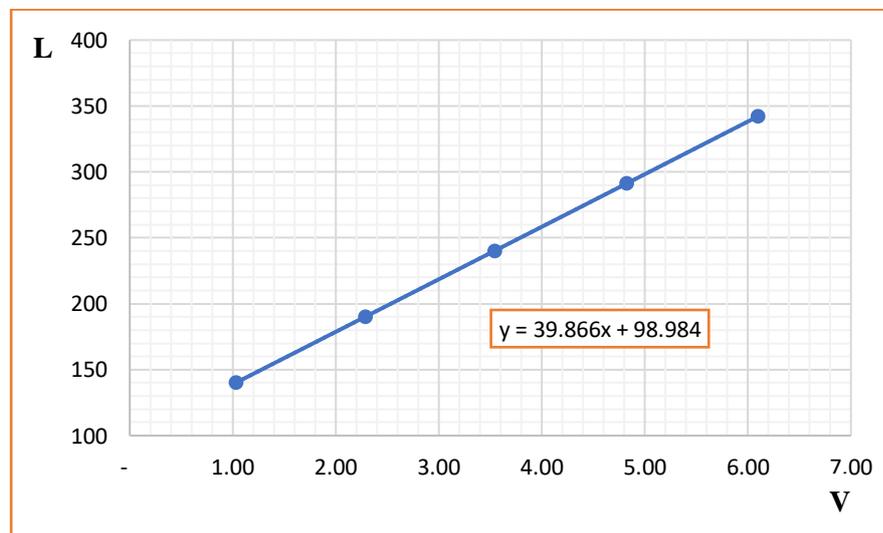


Figure 2. 4. Exemple d'une courbe de tarage de la sonde 1

Dans le cas de la sonde (1), la valeur de $a = 39.866$ et $b = 98.984$ avec un coefficient de détermination $R^2 = 1$. Le processus de tarage doit donc être répété pour l'ensemble des sondes utilisées sur le modèle. On portera également une attention particulière à la valeur du coefficient de détermination obtenu.

II.2.2.3. Mesure de la hauteur de l'eau

Afin que les mesures soient exploitables, nous devons calculer la moyenne et l'écart type du signal de sortie fourni par les sondes. La valeur moyenne et l'écart type étant les seules grandeurs pertinentes pour cette étude.

Le plan horizontal du canal rectangulaire est vérifié à l'aide d'un laser qu'on a placé dans le canal. Nous avons commencé par la mesure de la hauteur entre la sonde et le rayon du laser, celle-ci nous l'avons appelée 'h_{référence}'. Ensuite, nous avons mesuré la hauteur entre le rayon du laser et le fond du canal que nous avons appelé 'h_{fond du canal}'. (figure 2.6).

La figure (3.5) représente une photographie du laser utilisé dans ce travail.



Figure 2. 5. Photographie du laser utilisé

Pour un voltage enregistré par une sonde et après le calcul de la moyenne et l'écart type,

La hauteur de la surface libre h_{mesurée} correspondante est donnée par :

$$h_{\text{mesurée}} = (h_{\text{réf}} + h_{\text{fond du canal}}) - d$$

Où :

- h_{réf}, la distance entre le plan horizontal et la sonde, en mètre ;
- h_{fond du canal}, la distance entre le fond du canal et le plan horizontal, en mètre ;
- d, la distance entre la sonde et la surface libre, en mètre.

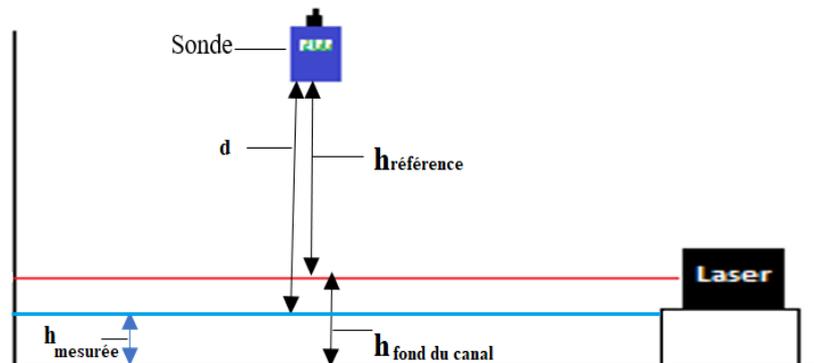


Figure 2. 6. Configuration étudiée pour mesurer de hauteurs de la surface libre

II.2.3. Procédure expérimentale

La procédure expérimentale décrit la méthode de détermination de la hauteur de l'eau, dans le réservoir ainsi que sur le canal. Le débit est déterminé par une simple lecture sur un l'écran du débitmètre.

II.2.3.1. Mesure de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal

Afin de mesurer la variation de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal, une série d'essais a été effectuée pour 2 ouvertures (0.02m et 0.05m). Pour chaque ouverture, nous avons changé le débit 2 fois. Ces essais ont été faits pour les débits suivants :

Tableau 2. 1. Gamme des débits utilisés pour le profil transversal

h_v (m)	Q (m ³ /s)
0.02	0.0385
	0.0485
0.05	0.09
	0.11

II.2.3.2. Mesure de la hauteur de l'eau sur la longueur du canal

Afin de mesurer la variation de la hauteur sur la longueur du canal, une série d'essais a été effectuée pour 4 ouvertures (0.02 m, 0.03 m, 0.04 m et 0.05 m). Pour chaque ouverture, le débit a été changé 4 fois.

Tableau 2. 2. Gamme de débits utilisés pour le profil longitudinal

h_v (m)	Q (m ³ /s)
0.02	0.0385
	0.042
	0.045
	0.0485
0.03	0.053
	0.058
	0.063
	0.068
0.04	0.07
	0.08
	0.085
	0.09
0.05	0.09
	0.1
	0.106
	0.11

Une fois la géométrie du modèle prête, et les sondes sont bien placées sur leurs supports. Nous devons calibrer nos sondes, en suivant la procédure décrite précédemment.

Nous fixons l'ouverture de la vanne en amont, on injecte ensuite le débit voulu dans le modèle. Nous devons ensuite attendre que le ressaut hydraulique se forme et se stabilise entièrement.

Le début du ressaut hydraulique est toujours fixé à 0.5 m en aval de la vanne rectangulaire (figure 2.7). Une fois le ressaut bien positionné, on lance l'acquisition des données sur le Labview et sur le Macro au même temps.

On choisit dans ce travail d'enregistrer le signal des sondes de surface libre pendant 5s à une fréquence de 100Hz.

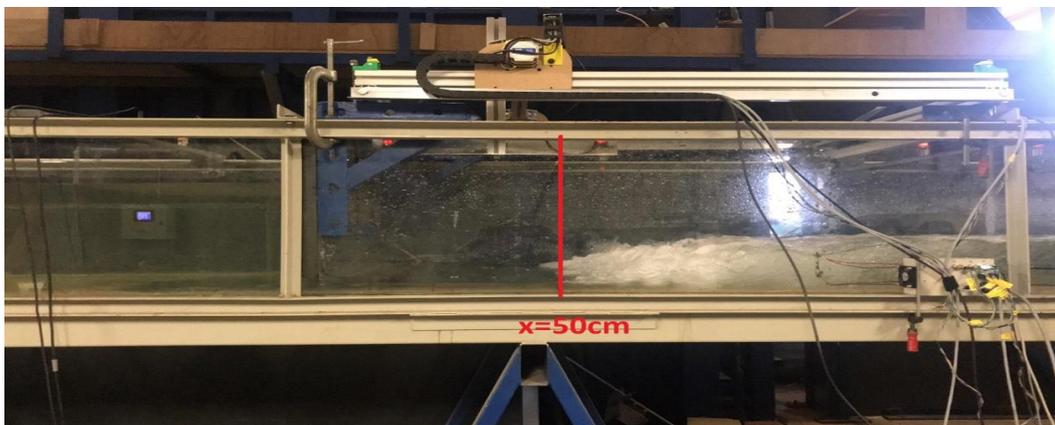


Figure 2. 7. Exemple du début du Ressaut hydraulique formé le canal rectangulaire, (ouverture 0.03m ; $Q = 0.058 \text{ m}^3/\text{s}$)- vanne rectangulaire

Par la suite, nous effectuons pour chaque cas étudié les étapes suivantes :

1. Lecture du débit volume Q sur l'écran digital du débitmètre ;
2. Calcul de la hauteur de l'eau et l'écart type sur la largeur ou/et la longueur du canal ;
3. Calcul de nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par l'application de la relation : $F_1 = \frac{V}{\sqrt{gh_1}}$; Le nombre de Froude a été donné pour une section rectangulaire.

Le tableau (2.3) représente la gamme des débits et du nombre de Froude incident, pour tous les cas étudiés.

Tableau 2.3 : Gamme des débits et du nombre de Froude (canal rectangulaire-vanne rectangulaire)

Q (m ³ /s)	F ₁
0.0385	4,885
0.042	5,345
0.045	5,537
0.0485	5,918
0.053	3,923
0.058	4,278
0.063	4,649
0.068	5,082
0.07	3,534
0.08	4,175
0.085	4,199
0.09	4,470
0.09	3,346
0.1	3,714
0.106	3,788
0.11	3,940

II.3. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description de la méthodologie des expérimentations et de la représentation du processus expérimental dans un canal rectangulaire derrière une vanne rectangulaire.

Dans ce chapitre nous avons abordé la méthodologie des expérimentations utiles au calcul du débit et de la hauteur de l'eau. Nous avons aussi présenté la gamme d'étude mesurées pour les deux profils 'transversal et longitudinal'.

**Chapitre III:
Etude expérimentale
(Vannes dentées)**

MODELE I (Canal rectangulaire)

Chapitre III : Etude expérimentale (Vannes dentées)

III.1. Introduction

Afin d'exposer l'étude expérimentale d'un ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire en aval de 4 vannes dentées, nous devons présenter la méthodologie des expérimentation utiles au calcul de la hauteur de l'eau sur le canal, et également le processus expérimental suivi.

III.2. Méthodologie des expérimentations

III.2.1. Position du problème

Le but de cette étude est d'étudier le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire derrière 4 vannes dentées. La distribution de la hauteur de l'eau dans ce cas est non homogène sur la largeur du canal. On pose alors, les questions suivantes :

- Est-ce que la relation des hauteurs conjuguées est bien vérifiée lorsque la distribution de la hauteur de l'eau est non homogène ?
- La géométrie de la vanne dentée affecte-t-elle la dissipation d'énergie du ressaut hydraulique ?

III.2.2. Description des essais

Emplacement des sondes

Afin de mesurer la hauteur de l'eau sur la longueur du canal, 4 sondes seront placées, comme décrit ci-dessous (voir la figure 3.1) :

- Une sonde est placée au niveau du réservoir (0.5m en amont de la vanne dentée) :
 - Sonde réservoir '1' : $y=0.69\text{m}$, $x=-0.5\text{m}$; gamme d'acquisition : 30-250 mm.
- Trois sondes est placées derrière la vanne dentée :
 - Sonde '2' : $y=0.49\text{m}$, $x=1.45\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-450mm ;
 - Sonde '3' : $y=0.49\text{m}$, $x=1.75\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-450mm ;
 - Sonde '4' : $y=0.49\text{m}$, $x=2.05\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-450mm.

Dans cette étude, nous avons choisi une durée de 10s et une fréquence de 100hz.

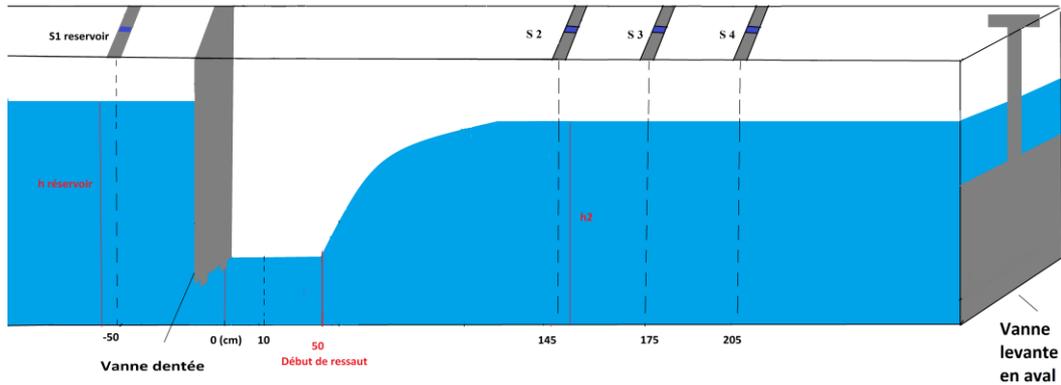


Figure 3. 1. Vue en long du canal rectangulaire et de son instrumentation (vanne dentée)

III.2.3. Procédure expérimentale

La procédure expérimentale suivie nous permet de déterminer les hauteurs de l'eau sur le réservoir ainsi que sur la longueur du canal.

La vanne en amont a été changée 4 fois. Les 4 vannes dentées utilisées sont : Vanne dentée n°1 (2cm,2dents) ; Vanne dentée n° 2 (2cm,4dents) ; Vanne dentée n°3 (4cm,2dents) ; et Vanne dentée n° 4 (4cm,4dents).

a. Vanne dentée '1'

Afin de mesurer la variation de la hauteur de l'eau sur la longueur du canal, en aval de la vanne dentée n°1, une série d'essais a été effectuée, où l'ouverture de la vanne a été changée 4 fois (0.01m, 0.02m, 0.03m et 0.04m). Pour chaque ouverture, le débit a été changé 4 fois.

Tableau 3. 1. Gamme de débits utilisés, vanne dentée n°1

h_v (m)	Q (m ³ /s)	F_1
0.01	0.0385	3,98
	0.042	4,12
	0.045	3,93
	0.0485	4,66
0.02	0.053	2,76
	0.058	3,89
	0.063	4,26
	0.068	4,44
0.03	0.07	2,72
	0.08	3,91
	0.085	3,94
	0.09	4,21
0.04	0.09	3,20
	0.1	3,24
	0.106	3,57
	0.11	3,87

b. Vanne dentée '2'

Pour but de mesurer la variation de la hauteur de l'eau sur la longueur du canal derrière la vanne dentée n°2, une série d'essais a été effectuée, où nous avons changé l'ouverture de la vanne 4 fois (0.01m, 0.02m, 0.03m et 0.04m). Pour chaque ouverture, nous avons changé le débit 4 fois.

Tableau 3. 2. Gamme de débits utilisés, vanne dentée n°2

h_v (m)	Q (m ³ /s)	F_1
0.01	0.0385	3,92
	0.042	4,21
	0.045	3,64
	0.0485	4,56
0.02	0.053	2,13
	0.058	2,66
	0.063	4,02
	0.068	4,51
0.03	0.07	3,44
	0.08	3,88
	0.085	4,15
	0.09	4,21
0.04	0.09	3,33
	0.1	3,27
	0.106	3,63
	0.11	3,78

c. Vanne dentée '3'

Pour mesurer la variation de la hauteur de l'eau sur la longueur du canal en aval de la vanne dentée n°3, une série d'essais a été effectuée, où l'ouverture de la vanne a été changée 3 fois (0.01m, 0.02m, et 0.03m). Pour chaque ouverture, nous avons changé le débit 4 fois.

Tableau 3. 3. Gamme de débits utilisés, vanne dentée n°3

h_v (m)	Q (m ³ /s)	F_1
0.01	0.053	3,59
	0.058	4,08
	0.063	4,33
	0.068	4,73
0.02	0.07	3,58
	0.08	3,91
	0.085	4,18
	0.09	4,37
0.03	0.09	3,15
	0.1	3,18
	0.106	3,48
	0.11	3,73

d. Vanne dentée '4'

Pour mesurer la variation de la hauteur de l'eau sur la longueur du canal en aval la vanne dentée n°4, une série d'essais a été effectuée, où nous avons changé l'ouverture de la vanne 3 fois (0.01m, 0.02m, et 0.03m). Pour chaque ouverture, le débit a été changé 4 fois.

Tableau 3. 4. Gamme de débits utilisés, vanne dentée n°4

h_v (m)	Q (m ³ /s)	F_1
0.01	0.053	3,43
	0.058	3,62
	0.063	3,90
	0.068	4,33
0.02	0.07	3,22
	0.08	3,90
	0.085	4,25
	0.09	4,30
0.03	0.09	3,32
	0.1	3,37
	0.106	3,71
	0.11	3,79

Une fois que la géométrie du modèle prête, et les sondes sont bien placées sur leurs supports, nous passerons au calibrage des sondes, en suivant la procédure décrite dans le chapitre précédent, nous fixons l'ouverture de la vanne en amont, et nous injectons le débit

voulu dans le modèle. Ensuite, Nous devons attendre que le ressaut hydraulique se forme et se stabilise entièrement.

Le début du ressaut hydraulique est toujours fixé à 0.5 m en aval de la vanne rectangulaire. Une fois le ressaut bien positionné, nous lançons l'acquisition des données sur le Labview (figure 3.2).

Nous avons choisi dans ce travail d'enregistrer le signal des sondes de surface libre pendant 10 s à une fréquence de 100Hz.

Enfin, nous effectuons pour chaque cas étudié les étapes suivantes :

1. Lecture du débit volume Q sur le débitmètre ;
2. Calcul de la hauteur de l'eau et l'écart type sur la longueur du canal ;
3. Calcul de nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par l'application de la relation : $F_1 = \frac{v}{\sqrt{gh_1}}$; Le nombre de Froude a été donné pour une section rectangulaire.

III.3. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la description de la méthodologie des expérimentations, du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, derrière 4 vannes dentées.

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'emplacement des sondes sur le canal, le processus expérimental et la gamme de mesure pour chaque vanne dentée.

MODELE II
(Canal trapézoidal
asymétrique)

Chapitre IV:
Description du deuxième
modèle expérimental

MODELE II (Canal trapézoïdal asymétrique)

Chapitre IV: Description du deuxième modèle expérimental

IV.1. Introduction

Ce chapitre présente, dans un premier temps, le modèle expérimental utilisé pour l'étude du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique équipé de deux vannes parallélogrammes et d'une vanne triangulaire. Dans un second temps, il décrit l'instrumentation de mesure mise en œuvre.

IV.2. Description du modèle expérimental

Ce modèle physique se situe au niveau du laboratoire de recherche d'hydraulique (LARGHYDE) à l'université de Biskra. Il est composé principalement d'un canal trapézoïdal asymétrique. Le fond de ce canal est incliné transversalement à un angle $1/3$ par rapport à l'horizon. Un bassin d'alimentation est relié au canal par le moyen d'une conduite circulaire.

Le canal est alimenté en circuit fermé par une pompe axiale. Celle-ci aspire de l'eau d'un réservoir ouvert de récupération et la refoule dans le canal qui déverse l'eau dans le même bassin d'alimentation qui joue le rôle du bassin de récupération.

Le système bassin de récupération- pompe- bassin d'alimentation est relié par une conduite circulaire en PVC d'un diamètre de 350 mm, dans sa partie amont est insérée un débitmètre à ultrasons permettant de mesurer le débit. Le bassin de récupération est doté d'un tranquillisateur d'eau, qui est spécialement aménagé afin d'éviter les perturbations de la surface libre qui peuvent affecter le fonctionnement de 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.

La pompe axiale est dotée d'une vanne de régulation des débits. Le canal trapézoïdal asymétrique est relié, dans sa partie amont, à une boîte en charge relié en premier temps à une vanne de forme triangulaire, en deuxième temps à deux vannes de forme rectangulaire.



Figure 4. 1. Photographie du modèle expérimentale du canal trapézoïdal asymétrique

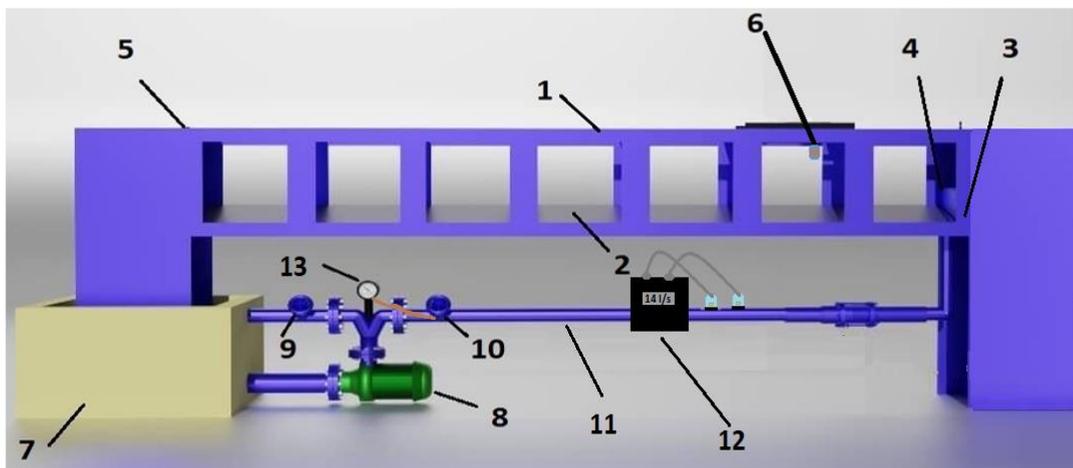


Figure 4. 2. Schéma simplifié du modèle de section trapézoïdal asymétrique, ayant servi à l'expérimentation

Légende :

- | | |
|---|---|
| 1- Canal trapézoïdal asymétrique
$l=7m$, $L=0.304m$; | 9- Vanne de refoulement ; |
| 2- Fond incliné en plexiglas ($m=1/3$) ; | 10- Vanne de de régulation des débits ; |
| 3- Panneaux en acier ; | 11- Conduite en PVC ; |
| 4- Vanne en amont (parallélogramme et triangulaire); | 12- Débitmètre ; |
| 5- Vanne levante en aval ; | 13- Baromètre. |
| 6- Sondes ; | |
| 7- Bassin d'accumulation avec un tranquillisateur ; | |
| 8- Pompe centrifuge axiale ; | |



Figure 4.3. Photographie du bassin



Figure 4.4. Photographie de la vanne de réglage du débit ; vanne de refoulement

IV.2.1. Caractéristiques du canal trapézoïdal asymétrique

Le canal est de forme trapézoïdale asymétrique de 7m de long et 0.304 m de largeur. Ce canal est constitué de deux parois latérales parallèles en verre transparent permettant la visualisation du ressaut hydraulique et de l'écoulement, et d'un fond incliné transversalement avec un angle de $1/3$ par rapport à l'horizon.

Afin de créer l'inclinaison du fond de notre canal, 7 panneaux transparents en plexiglas ont été placés transversalement avec un angle d'inclinaison de la base du canal de $1/3$. Ces panneaux sont reliés entre eux par collage à la silicone (figure 4.5).



Figure 4.5. Photographie du canal trapézoïdal asymétrique

Les principales caractéristiques générales du canal sont reprises dans le tableau suivant :

Tableau 4. 1. Caractéristiques générales du canal trapézoïdal asymétrique

/	Longueur (m)	Largeur (m)	Inclinaison transversale
Canal	7	0.304	1/3

IV.2.2. Caractéristiques des vannes en amont

Trois différentes vannes ont été placées en amont du canal trapézoïdal asymétrique, deux vannes de forme parallélogramme (figures 4.6 et 4.7) et la troisième est de forme triangulaire (figures 4.8 et 4.9) .

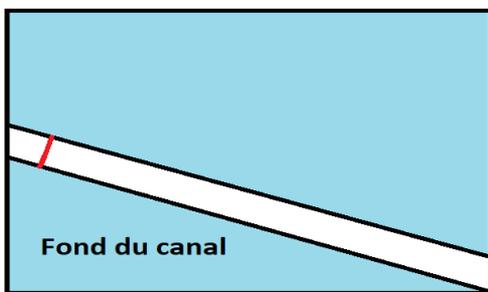


Figure 4. 6. Hauteur de l'ouverture des deux vannes parallélogrammes :
 $h_v=0.04m$; $h_v=0.06m$

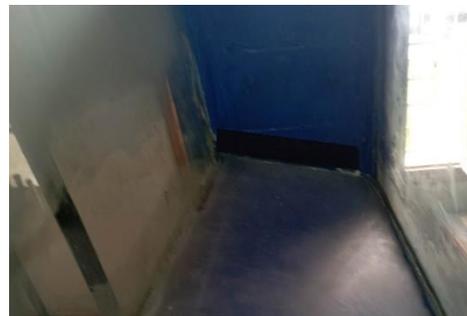


Figure 4.7. Photographie de la vanne parallélogramme $h_v=0.06m$

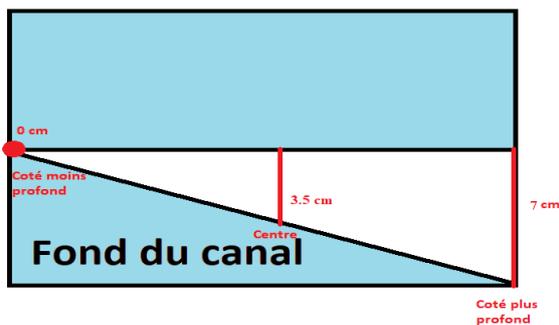


Figure 4. 8. Hauteur de l'ouverture de la vanne triangulaire: côté plus profond, $h_v= 0.07m$; centre, $h_v= 0.035m$; côté peu profond; $h_v=0m$



Figure 4. 9. Photographie de la vanne triangulaire $h_{v,max}=0.07m$

IV.2.3. Vanne levante en aval

Une vanne levante a été placée à l'extrémité aval du canal trapézoïdal asymétrique, cette vanne nous a permis de régler la hauteur d'eau dans le canal et ainsi de bien fixer le début du ressaut hydraulique (figure 4.10).



Figure 4.10 . Vanne levante en aval du canal trapézoïdal asymétrique

IV.3. Description de l'appareillage de mesure

IV.3.1. Mesure de débits

Les mesures de débit sont effectuées à deux étapes parallèles :

- Détermination du débit volumétrique à l'aide de la méthode volumétrique (recours à un récipient et un chronomètre).
- Mesure simultanée de la différence « Δh » entre les niveaux des deux ménisques dans les tubes manométriques. Le débit est ensuite ajusté à l'aide de la vanne de régulation, et la procédure est répétée. Les résultats obtenus sont présentés et détaillés dans le tableau ci-dessous.

Tableau 4.2. Valeurs des mesures du débit par l'étalonnage

Essais	Δh (cm)	Δh (m)	t_{moy} (s)	V (l)	V(m ³)	Q (l/s)	Q (m ³ /s)
1	0.6	0.006	20.52	33	0.033	1.608	0.001608
2	0.7	0.007	17.66	33	0.033	1.869	0.001869
3	1.4	0.014	13.41	33	0.033	2.461	0.002461
4	2.2	0.022	9.39	33	0.033	3.514	0.003514
5	4.1	0.041	8.56	33	0.033	3.855	0.003855
6	7.7	0.077	12.49	85	0.085	6.805	0.006805
7	11.4	0.114	11.99	85	0.085	7.089	0.007089
8	14.5	0.145	10.02	85	0.085	8.483	0.008483
9	19	0.19	10.48	100	0.1	9.542	0.009542
10	23.1	0.231	9.23	100	0.1	10.834	0.010834
11	31.1	0.311	8.41	100	0.1	11.981	0.011891
12	42.5	0.425	6.22	100	0.1	16.077	0.016077

L'étalonnage du débitmètre a été effectué pour des débits volumes tel que : $1.608 \leq Q \leq 16.077$.

Ces considérations montrent que pour un diaphragme donné, le débit volume Q peut s'écrire $Q = a * \Delta h^b$, où a et b sont des constantes, en notant que cette dernière est théoriquement égale à 0.6 à chaque débit volume passant par le diaphragme correspond une différence de cotes Δh . Les débits volumes Q ont été mesurés par la méthode volumétrique.

Les couples des valeurs (Q, Δh) obtenus ont fait l'objet d'un ajustement puissance par la méthode des moindres carrés non linéaire Figure (4.11).

La courbe d'étalonnage issue des mesures expérimentales répond à la formule :

$$Q = 0.02218 * \Delta h^{0.5082} \quad (4.1)$$

avec : * Q: Le débit en (m³/s).

* Δh :La différence de niveau en (m).

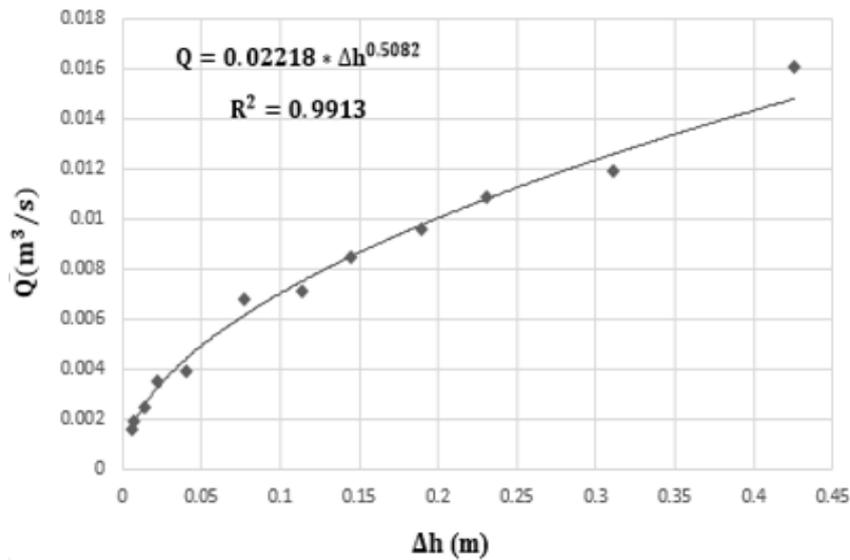


Figure 4.11. Courbe expérimentale de la relation en Q (m^3/s) fonction de Δh (m)

Expérimentalement et dans le laboratoire : Nous ouvrons les deux vannes : la vanne de régulation de débit et la vanne de refoulement, sachant que la vanne de débit reste ouverte et celle de refoulement change d'instant (ouverture approximative). A l'aide du manomètre, on lit les hauteurs h_1 et h_2 , la différence entre elles présente Δh .

Le débit donc sera calculée à partir de l'équation (4.1), en remplaçant la valeur de Δh dans cette équation.

IV.3.2. Mesure des surfaces libres

La hauteur de l'eau est mesurée à l'aide de 3 sondes à ultrasons microsonic, ces sondes sont liées par des câbles à un boîtier. Les données données par le boîtier sont des valeurs sur une échelle arbitraire qui varie linéairement avec la distance entre la sonde et la première surface rencontrée par les ultrasons. Les résultats sont stockés sur la carte micro SD.

Le matériel de mesure de la hauteur de l'eau est illustré dans la (figure 4.12).



Figure 4.12. Matériel de mesure de la hauteur de l'eau : 1: sondes à ultrasons microsonic ; 2 : boîtier; 3: câbles ; 4: chargeur 12V

Afin de prendre des mesures, il faut mettre le boîtier sous tension. Le boîtier est alimenté par 3 batteries. Ces batteries sont rechargées en connectant le chargeur 12 V .

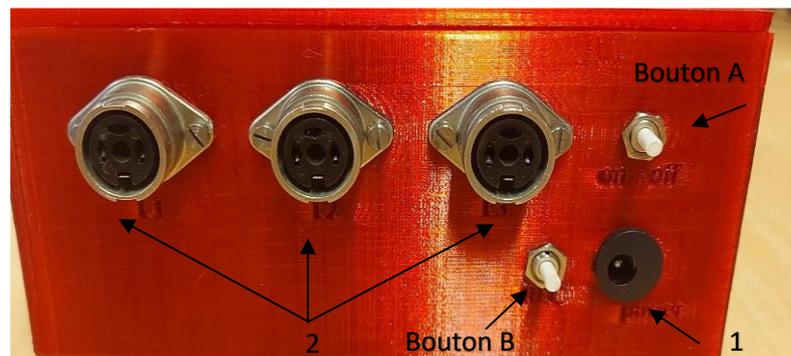


Figure 4.13. Connectique du boîtier ; 1 : Connecteur chargeur 12V ; 2 : Connecteurs câbles.

Après avoir mis le boîtier sous tension, il faut suivre les étapes suivantes :

- 1) Connecter les capteurs au boîtier rouge via les 3 câbles ;
- 2) Appuyer sur le bouton A jusqu'à ce que l'écran affiche le message « Tension batterie » (Figure 4.14- gauche) ;
- 3) Après quelques secondes, le boîtier affiche le signal envoyé par chaque capteur et il sera prêt à enregistrer les données (Figure 4.14 - droite) ;
- 4) Appuyer sur le bouton B (Figure 4.13) pour enregistrer les données (Fréquence de 1 Hz);
- 5) Appuyer à nouveau sur le bouton B pour arrêter l'enregistrement et éteindre le boîtier.

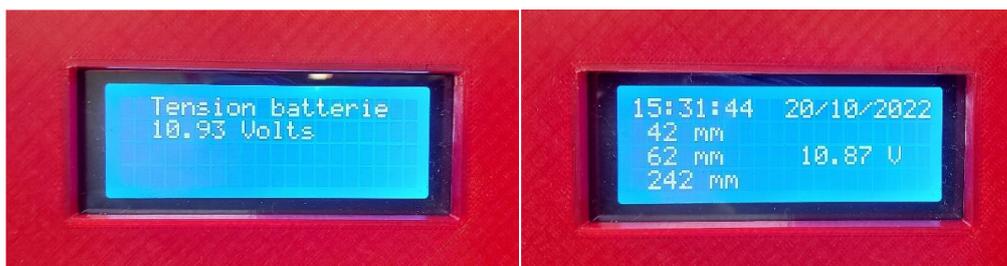


Figure 4.14. Ecran du boitier

IV.4. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présenté le deuxième modèle expérimental, qui a servi de base dans notre étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique. Dans ce chapitre nous avons bien décrit le modèle expérimental et l'appareillage de mesure utilisés, afin de prendre les mesures nécessaires concernant les caractéristiques du ressaut hydraulique.

Lors de la procédure expérimentale, nous avons utilisés des sondes à ultrasons microsonic afin de mesurer les hauteurs de la surface libre. En ce qui concerne les mesures des débits, nous avons utilisé un débitmètre à ultrasons en raison de son efficacité.

**Chapitre V:
Etude expérimentale
(Canal trapézoïdal
asymétrique)**

MODELE II (Canal trapézoïdal asymétrique)

Chapitre V : Etude expérimentale (Canal trapézoïdal asymétrique)

V.1. Introduction

Ce chapitre s'intéresse à étudier expérimentalement un ressaut hydraulique dans un canal rectiligne à deux vannes parallélogrammes et une vanne triangulaire, pour une distribution de la hauteur de l'eau non homogène transversalement, dans lequel le canal est de forme trapézoïdale asymétrique (fond incliné transversalement).

Sur la base de la littérature, l'efficacité du ressaut hydraulique est liée à la géométrie du canal, dans lequel un ressaut hydraulique formé dans un canal non rectangulaire dissipe plus d'énergie par rapport à celui formé dans un canal rectangulaire (Hager et Wanoschek, 1989).

V.2. Méthodologie expérimentale

V.2.1. Position du problème

Nous allons étudier les propriétés du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique, il s'agit du rapport des hauteurs conjuguées $(h_2/h_1)_{\text{moy}}$ et les longueurs caractéristiques : $L_{r \text{ (peu profond) }} / h_2 - h_1 \text{ (peu profond)}$; $L_{r \text{ peu profond}} / h_2 \text{ moy}$ et $L_{r \text{ plus profond}} / h_2 \text{ moy}$. Ces caractéristiques seront étudiées en fonction du nombre de Froude incident F_1 .

- Y_{moy} : représente le rapport de la moyenne des hauteurs conjuguées mesurées sur les trois côtés de la largeur du canal (peu profond, centre et plus profond) ;
- $\left(\frac{L_r}{h_2 - h_1}\right)_{\text{peu profond}}$: représente le rapport de la longueur relative du rouleau sur le coté peu profond à la différence entre la hauteur finale et initiale sur le coté peu profond. Ce rapport a été choisi sur la base de l'étude de (Diaz, 1954) ;
- $L_{r \text{ peu profond}} / h_2 \text{ moy}$ et $L_{r \text{ plus profond}} / h_2 \text{ moy}$: représentent respectivement le rapport de la longueur relative du rouleau sur les deux cotés peu profond et plus profond à la moyenne de la hauteur finale h_2 .

Ces paramètres seront comparés avec ceux des canaux rectangulaire, triangulaire et trapézoïdal symétrique.

Enfin, une relation sera développée pour calculer le rendement du ressaut (η) dans un canal trapézoïdal asymétrique afin de nous permettre de comparer l'efficacité de ce type de ressaut hydraulique avec d'autres types de ressauts.

V.2.2. Description des essais

V.2.2.1. Emplacement des sondes

Afin de mesurer la hauteur initiale h_1 , les 3 sondes seront placées au pied du ressaut à l'abscisse ($x_i = 2.50$ m) par rapport à la vanne en amont, nous avons choisi cette abscisse pour but de laisser une distance suffisante entre la vanne en amont et le début de ressaut. Tandis que, pour mesurer la hauteur finale h_2 , ces 3 sondes seront placées à l'abscisse ($x_f = 5.50$ m) afin d'assurer la mesure à la fin du ressaut hydraulique pour toute gamme d'essais (figure 5.1).

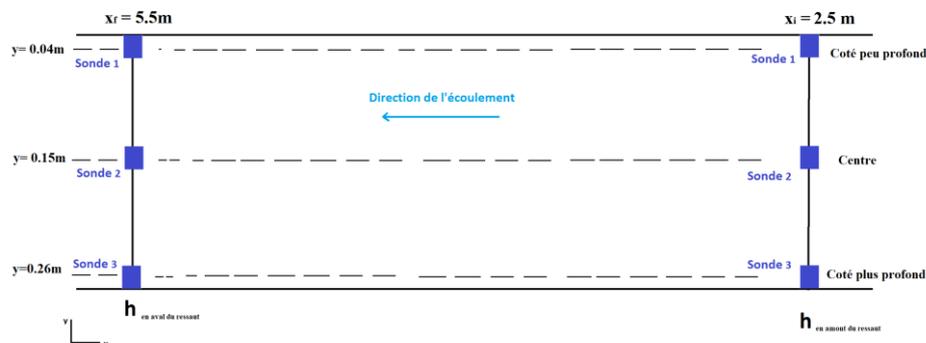


Figure 5.1. Vue transversale de l'emplacement des sondes dans un canal trapézoïdal asymétrique

Les trois sondes sont placées comme suit :

- Au pied du ressaut $x_i = 2.50$ m :
 - Sonde '1' : côté peu profond ; $y = 0.04$ m ; gamme d'acquisition : 65-450 mm ;
 - Sonde '2' : centre ; $y = 0.15$ m ; gamme d'acquisition : 65-350 mm ;
 - Sonde '3' : côté plus profond ; $y = 0.26$ m ; gamme d'acquisition : 65-500 mm.

- A la fin du ressaut $x_f = 5.5\text{m}$:
 - Sonde '1' : coté peu profond ; $y=0.04\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-450mm;
 - Sonde '2' : centre ; $y=0.15\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-350mm;
 - Sonde '3' : coté plus profond ; $y=0.26\text{m}$; gamme d'acquisition : 65-500mm.

Dans cette étude, on a choisi une durée de 3min et une fréquence de 1 Hz.

V.2.2.2. Calibrage des sondes

Afin de mesurer la hauteur de l'eau, nous allons tout d'abord calibrer nos sondes. Ces sondes donnent des résultats bruts en Volt, non exploitables directement. Cependant, le voltage fourni est relié de manière linéaire à la distance entre la sonde et le gabarit. La relation entre la valeur de sortie de la sonde, en Volt, et la distance entre la sonde et le gabarit est la suivante :

$$d = a.V + b$$

- d , la distance entre le gabarit et la surface de sonde, donnée par le boîtier, en mm ;
- V , la valeur moyenne de sortie de la sonde, en mm ;
- a et b , les deux constantes que l'on cherche à déterminer par le tarage.

Afin de déterminer la constante a et la constante b , des gabarits possédant des hauteurs connues sont utilisés. La relation entre d et V étant linéaire.

La figure (5.2) représente le tarage des sondes et la détermination de la pente de la courbe de tarage.

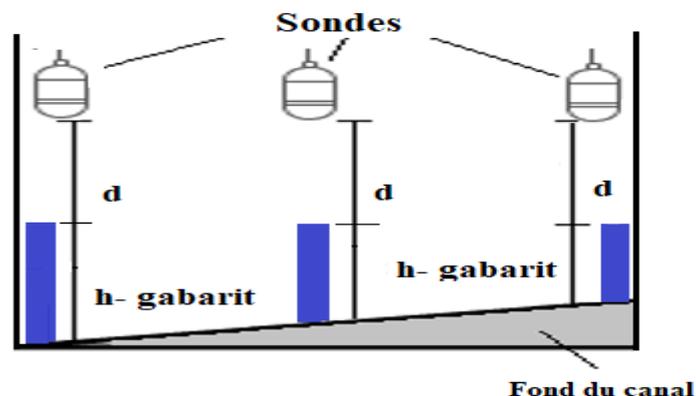


Figure 5.2. Tarage des sondes - Détermination de la pente de la courbe de tarage (vue transversale)

On obtient alors la courbe suivante, fournissant la valeur de 'a' et la valeur de 'b' par l'intermédiaire d'une interpolation linéaire (figure 5.3) :

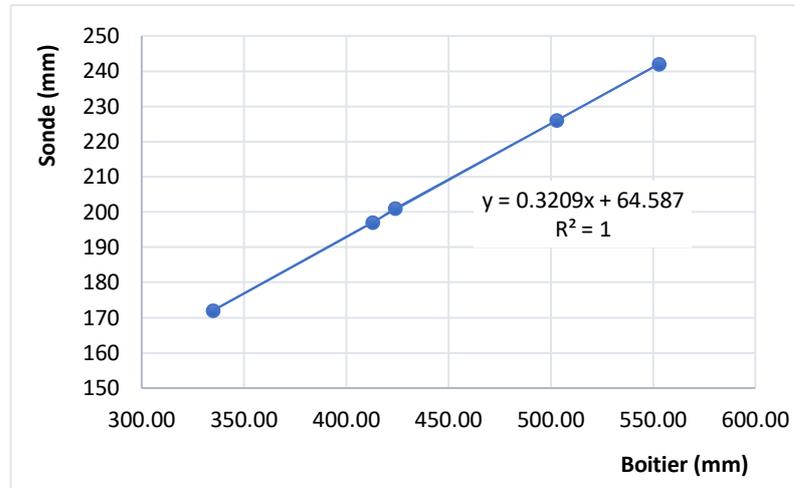


Figure 5.3. Exemple d'une courbe de calibration de la sonde (1)- coté peu profond du canal ; $x=2.5m$; $y=0.04m$

Dans le cas de la sonde (1), la valeur de $a=0.3209$ et $b=64.587$, avec un coefficient de détermination $R^2=1$.

Le processus de calibration doit donc être répété pour les 3 sondes utilisées, sur les trois cotés de largeur du canal aux abscisses $x_i=2.5m$ et $x_f=5.5m$. Afin de mesurer les hauteurs avec une bonne précision, nous déterminerons la différence absolue entre les hauteurs mesurées manuellement par un régle et celles calculées par les relations obtenues lors du calibration (tableau 5.1) .

Tableau 5.1. Hauteurs totales mesurées par le mètre et hauteurs calculées par les relations du calibration

Emplacement des sondes- Erreur	Sonde 1-Coté peu profond		Sonde 2- Centre		Sonde 3- Coté plus profond	
	$h_{relation}$ [m]	$h_{règlet}$ [m]	$h_{relation}$ [m]	$h_{règlet}$ [m]	$h_{relation}$ [m]	$h_{règlet}$ [m]
$x_i = 2.5m$	242.04	242	205.08	205	325.04	325
$ h_{relation}-h_{règlet} $	0.04		0.08		0.04	
$x_f = 5.5m$	249.02	249	249.08	249	239.97	240
$ h_{relation}-h_{règlet} $	0.02		0.08		0.03	

D'après le tableau (5.1), nous trouvons que la différence absolue de la hauteur totale entre la valeur mesurée manuellement par un mètre et celle donnée par le boîtier, sur les trois

côté de la largeur du canal, $|h_{\text{relation}} - h_{\text{règlet}}|_{\text{moy}} = 0.048$. Ce qui nous confirme la fiabilité des relations obtenues lors du calibrage.

V.2.2.3. Mesure de la hauteur de l'eau

La hauteur de la surface libre sera donc calculée par la relation suivante :

$$h_{\text{mesurée}} = h_{\text{total}} - d$$

Où :

- $h_{\text{mesurée}}$, la hauteur de la surface libre, en mm ;
- h_{total} , la distance entre le fond du canal et la sonde, donnée par le boîtier, en mm;
- d , la distance entre la sonde et la surface libre, donnée par le boîtier, en mm.

La figure (5.4) représente la configuration pour la mesure de hauteurs de la surface libre.

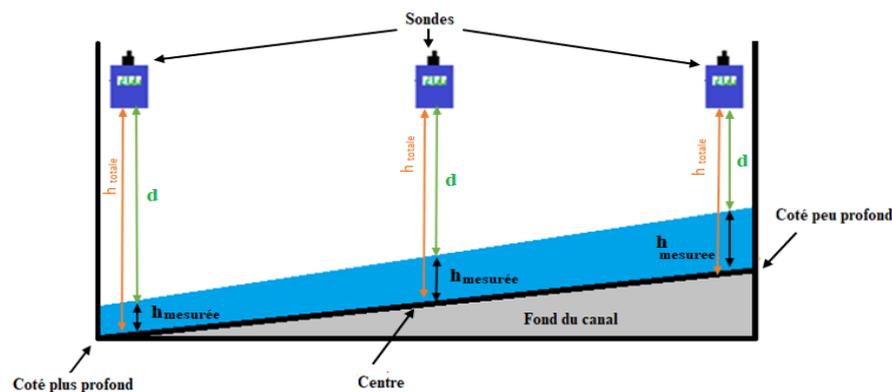


Figure 5.4. Configuration étudiée pour mesurer de hauteurs de la surface libre

V.2.3. Procédure expérimentale

La procédure expérimentale décrit la méthode de détermination de débit, et des longueurs du ressaut sur les deux côtés de la largeur du canal (peu profond et plus profond), ainsi que la méthode de détermination des hauteurs initiales et finales de l'eau sur les trois côtés de la largeur du canal (peu profond, centre et plus profond).

La longueur du rouleau sera déterminée à l'aide d'un colorant afin de connaître le point de stagnation (Atashi et al. 2020). Le colorant sera versé sur le rouleau, la couleur versée doit aller dans le sens d'écoulement pour indiquer le fin rouleau. Cette longueur de

ressaut diffère transversalement d'un côté à l'autre, elle est plus longue sur le côté peu profond que sur le côté plus profond.

Les hauteurs conjuguées $h_{1\text{moy}}$ et $h_{2\text{moy}}$ représentent la moyenne des hauteurs mesurées sur les trois côtés de la largeur du canal (peu profond, centre et plus profond). Le début du ressaut hydraulique sera fixé à l'abscisse ($x_i = 2.5\text{m}$) par rapport à la vanne en amont pour tous les essais, pour but de laisser une distance suffisante entre la vanne en amont et le début de ressaut (figure 5.5). Le ressaut hydraulique commence sur le côté peu profond avant le côté plus profond pour les faibles débits. Et il commence au même point dans le cas des ressauts formés pour les forts débits.



Figure 5. 5. Vue en long du canal trapézoïdal asymétrique et de son instrumentation (vue de profil)

Une gamme de Froude est choisie, dont $1.40 < F_1 < 6.11$. Une fois la géométrie du modèle prête, et les sondes sont bien placées et calibrées. On injecte le débit voulu dans le modèle, on attend la formation du ressaut hydraulique. Une fois que le ressaut soit stable, on lance l'enregistrement des données sur le boîtier (3min pour chaque mesure). Par la suite, on effectue pour chaque cas étudié les étapes suivantes :

1. Mesure du débit volume Q par le débitmètre à ultrasons ;
2. Calcul des hauteurs h_1 sur les trois côtés de la largeur du canal ;
3. Calcul des hauteurs h_2 sur les trois côtés de la largeur du canal ;
4. Mesure de la longueur du rouleau L_r du ressaut sur les deux côtés de la largeur du canal ; La fin rouleau sera déterminée à l'aide d'un colorant afin de connaître le point de stagnation (Atashi et al. 2020) ;
5. Calcul de nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, comme suit :

$$\text{Si: } h_{1\text{plus prof}} < D : A = \frac{1}{2} \times \frac{b}{D} \times h^2 \quad ; \quad F_1 = \sqrt{\frac{8Q^2 D^3}{gb^2 h_{1\text{plus profond}}^6}} \quad (5.1)$$

$$\text{Si: } h_1 \text{ plus prof } > D : A = b \times \left(h - \frac{D}{2}\right) \quad ; \quad F_1 = \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2 \left(h_{1\text{moy}} - \frac{D}{2}\right)^3}} \quad (5.2)$$

Le tableau (5.2) représente la gamme des débits et du nombre de Froude, dans tous les cas étudiés.

Tableau 5.2: Gamme de mesures: vannes 'rectangulaire et triangulaire'

Forme de la vanne en amont	Numéro d'essai	Q (m ³ /s)	Froude
Parallélogramme h _v =0.04m	P4-1	0.0243	5.73
	P4-2	0.0261	4.86
	P4-3	0.0274	4.32
	P4-4	0.0285	3.92
	P4-5	0.0288	3.82
Parallélogramme h _v =0.06m	P6-1	0.0310	6.11
	P6-2	0.0312	6.00
	P6-3	0.0316	5.80
	P6-4	0.0320	5.60
	P6-5	0.0327	5.28
	P6-6	0.0329	5.19
	P6-7	0.0333	5.03
Triangulaire h _{vmax} = 0.07m	T7-1	0.0145	2.10
	T7-2	0.0151	2.01
	T7-3	0.0155	1.95
	T7-4	0.0158	1.90
	T7-5	0.0169	1.76
	T7-6	0.0178	1.65
	T7-7	0.0187	1.55
	T7-8	0.0197	1.45
	T7-9	0.0207	2.25
	T7-10	0.0231	1.54
	T7-11	0.0239	1.40

V.4. Conclusion

Nous avons consacré ce chapitre à la description de la méthodologie des expérimentations et de la représentation du processus expérimental d'un ressaut hydraulique formé dans un canal trapézoïdal asymétrique à deux vannes rectangulaires et une vanne triangulaire différents.

Dans ce chapitre, nous avons abordé la méthodologie utile pour la mesure du débit, le calcul des hauteurs de l'eau et des longueurs des rouleaux. En présentant également la gamme de mesures.

Conclusion de l'étude expérimentale

Dans la deuxième partie de cette thèse, nous avons abordé l'étude expérimentale du ressaut hydraulique, sur deux modèles différents au niveau de deux laboratoires de recherche.

Le premier modèle consiste en un canal rectangulaire de 10 m de long et 0.985 m de largeur. Le premier but de ce travail était d'étudier les caractéristiques d'un ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire horizontal en aval d'une vanne rectangulaire où la distribution de la hauteur de l'eau est homogène sur la largeur du canal. Le second but était d'étudier le ressaut en aval de 4 vannes dentées, dans ce cas, la distribution n'est pas homogène sur la largeur du canal.

Le deuxième modèle se compose d'un canal trapézoïdal asymétrique de 7 m de long 0.305 m de largeur. Le but de cette étude a été d'étudier les propriétés du ressaut hydraulique évoluant en canal trapézoïdal asymétrique à deux vannes rectangulaire et triangulaire.

- Au premier modèle (canal rectangulaire), trois chapitres ont été nécessaires :
 - ✓ Le premier chapitre a été consacré à la description du modèle expérimental et de l'appareillage de mesure utilisés pour entamer l'étude du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire ;
 - ✓ Le deuxième chapitre a été consacré à l'étude expérimentale afin de donner une description détaillée des essais, dans le cas de la vanne rectangulaire ;
 - ✓ Le troisième chapitre a été dédié à l'étude expérimentale pour donner une description détaillée des essais, en aval de 4 vannes dentées.

- Au deuxième modèle (canal trapézoïdal asymétrique), deux chapitres ont été nécessaires:
 - ✓ Le quatrième chapitre a décrit le modèle expérimental d'étude (canal trapézoïdal asymétrique). Nous avons ensuite présenté une description de l'appareillage de mesure ;
 - ✓ Le cinquième chapitre a abordé la méthodologie des expérimentations et le processus expérimental.

Partie III :

Résultats et discussions

Introduction à la troisième partie

La troisième partie de notre thèse sera consacrée à la représentation et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus lors des essais réalisés sur les modèles d'étude.

Cette partie sera divisée également en deux parties. Dans la première partie, nous représenterons les résultats obtenus dans le modèle I (canal rectangulaire). Dans la deuxième partie, nous exposerons les résultats obtenus dans le modèle II (canal trapézoïdal asymétrique).

Modèle I : (Canal rectangulaire)

Cette partie sera divisée en deux chapitres :

- Le premier chapitre aura pour but d'analyser les essais expérimentaux du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, en aval d'une vanne rectangulaire ;
- Le deuxième chapitre sera dédié à la discussion des essais expérimentaux du ressaut hydraulique formé dans canal rectangulaire, derrière 4 vannes dentées.

Modèle II : (Canal trapézoïdal asymétrique)

Cette partie contient un seul chapitre :

- Le troisième chapitre sera consacré à l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique, à deux vannes parallélogrammes et une vanne triangulaire.

MODELE I
(Canal rectangulaire)

Chapitre I :
Exploitation des résultats
(vanne rectangulaire)

MODELE I (Canal rectangulaire)

Chapitre I : Exploitation des résultats (vanne rectangulaire)

I.1. Introduction

Ce présent chapitre sera consacré à la représentation et à l'exploitation des résultats récoltés au cours des différents processus expérimentaux, dans le but de valider la méthode de travail et de définir la valeur de certains paramètres nécessaires dans les conditions non homogènes de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal.

Une gamme du nombre de Froude incident a été ainsi obtenue, correspondant à $3,28 < F_1 < 5,92$.

Les objectifs de ce chapitre seront donc d'étudier :

- Profils transversaux et longitudinaux ;
- Hauteur supercritique du ressaut ;
- Influence de la variation des hauteurs sur la charge ;
- Perte de charge dans le canal.

Enfin, nous allons développer une relation générale de la perte d'énergie en amont du ressaut, pour but de déterminer la hauteur initiale du ressaut hydraulique dans les conditions non homogènes de la distribution de la hauteur de l'eau.

I.2. Longueur du rouleau

La longueur du rouleau a été calculée théoriquement selon la définition de (Hager,1989), par :

$$L_r = 5 \text{ à } 7 h_{cr} ; \text{ avec } h_{cr} = \left(\frac{Q}{L}\right)^{2/3} \times \left(\frac{L}{g}\right)^{1/3} ; \text{ Alors : } L_r = 6 \left(\frac{Q}{L}\right)^{2/3} \times \left(\frac{L}{g}\right)^{1/3} \quad (1.1)$$

I.3. Variation de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal

Afin d'étudier la variation de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal, 2 sondes sont placées sur la largeur du canal, dont : $y_{s1}=0.04\text{m}$ et $y_{s2}=0.30\text{m}$. Les deux sondes prennent des mesures tous les centimètres, dans un intervalle de 0.04m à 0.97m . Les mesures sont effectuées sur les abscisses : $x_1=0.17\text{m}$, $x_2=0.27\text{m}$ et $x_3=0.37\text{m}$. La gamme des essais choisie pour les profils transversaux est présentée dans le tableau en dessous :

Tableau 1.1 . Gamme étudiée pour le profil transversal

h_v (m)	$Q(\text{m}^3/\text{s})$
0.02	0.0385
	0.0485
0.05	0.09
	0.11

a. Variation des hauteurs mesurées sur la largeur du canal pour $Q= 0.0385 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02 \text{ m}$

La variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal $h_{\text{mes}}/h_r=f(y/b)$ pour $Q= 0.0385 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02 \text{ m}$ est donnée par la (figure1.1).

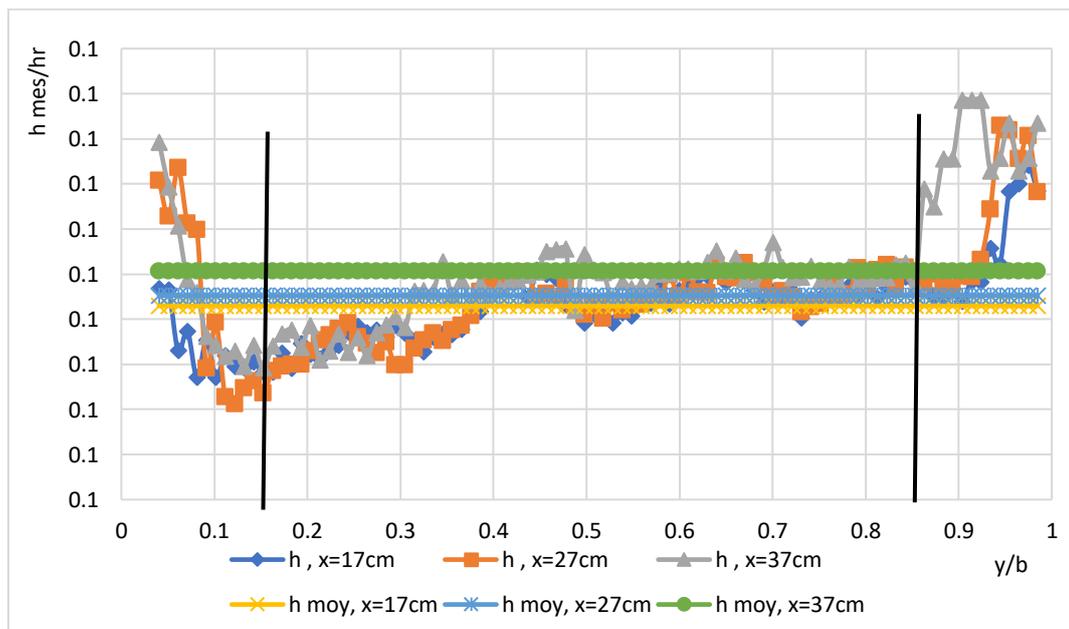


Figure 1.1. Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.0385 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$; $F_1=4.69$)

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la (figure 1.1) est présenté dans tableau (a.1).

Dans le (tableau 1.2), nous avons présenté l'interprétation de la (figure 1.1) pour le $Q=0.0385 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$.

Tableau 1.2. Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.0385 \text{ m}^3/\text{s}$; 0.02m)

x (m)	h_{moy}/h_r y=0.04 à 0.97	$h_{(y=0.49)}/h_r$	$h_{\text{max}}-h_{\text{min}}/h_r$	$ h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}} /h_{\text{centre}}$ (%)	h_{moy}/h_r	$h_{\text{max}}-h_{\text{min}}/h_r$	$ h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}} /h_{\text{centre}}$ (%)
			y=0.04 à 0.97		y=0.15 à 0.85	y=0.15 à 0.85	
0.17	0,0604	0,0583	0,0144	3,61	0,0590	0,0042	1,21
0.27	0,0594	0,0586	0,0235	1.2	0,0590	0,0060	0,69
0.37	0,0590	0,0615	0,0256	4	0,0597	0,0081	2,55

b. Variation des hauteurs mesurées sur la largeur du canal pour $Q= 48.5 \text{ l/s}$; $h_v=0.02\text{m}$

La variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal $h_{\text{mes}}/h_r=f(y/b)$ pour $Q= 0.0485 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02 \text{ m}$ est donnée par la (figure1.2).

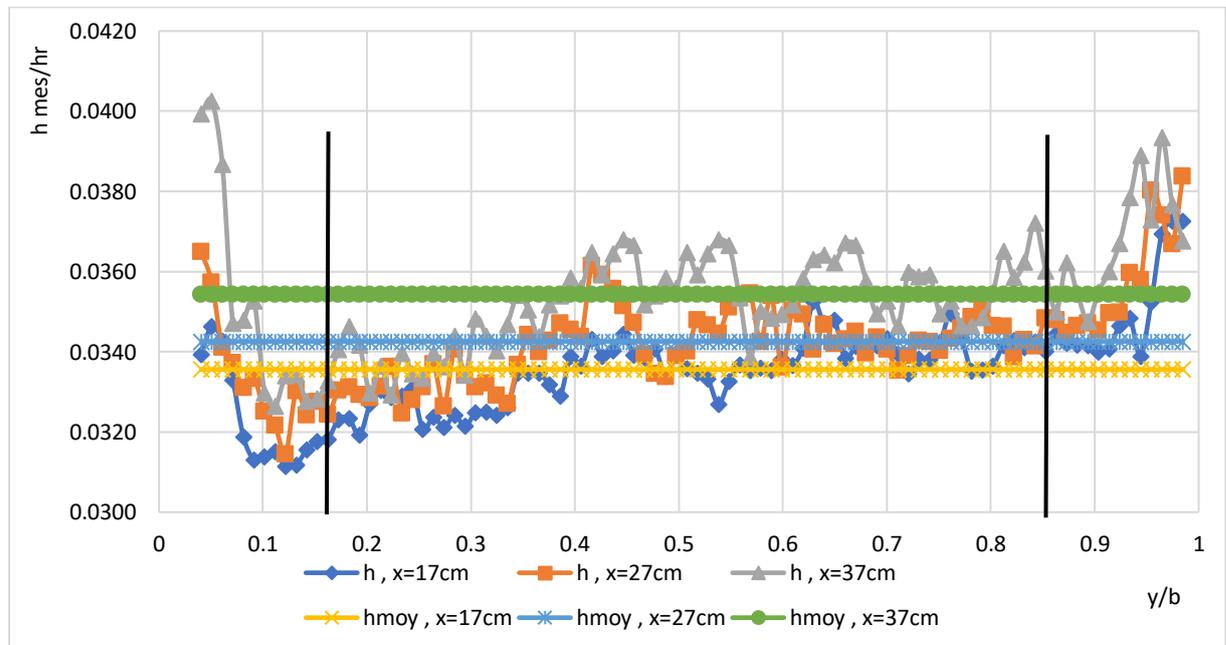


Figure 1.2. Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.0485 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$; $F_1=5.92$)

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la (figure 1.2.) est présenté dans les annexes (tableau a.2).

Le (tableau 1.3) présente l'interprétation de la (figure 1.2) pour le $Q=0.0485 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$.

Tableau 1.3. Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.0485 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$)

x (m)	h_{moy}/h_r y=0.04 à 0.97	$h_{(y=0.49)}/h_r$	$h_{\text{max}}-h_{\text{min}}/h_r$ y=0.04 à 0.97	$ h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}} /h_{\text{centre}}$ (%)	h_{moy}/h_r y=0.15 à 0.85	$h_{\text{max}}-h_{\text{min}}/h_r$ y=0.15 à 0.85	$ h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}} /h_{\text{centre}}$ (%)
0.17	0,0335	0,0340	0,0061	1,32	0,0335	0,0034	1,46
0.27	0,0342	0,0340	0,0070	0,66	0,0342	0,0036	0,35
0.37	0,0353	0,0356	0,0074	0,63	0,0351	0,0045	1,05

c. Variation des hauteurs mesurées sur la largeur du canal pour $Q=0.09 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05 \text{ m}$

La variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal $h_{\text{mes}}/h_r=f(y/b)$ pour $Q=0.09 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05 \text{ m}$ est donnée par la (figure 1.3).

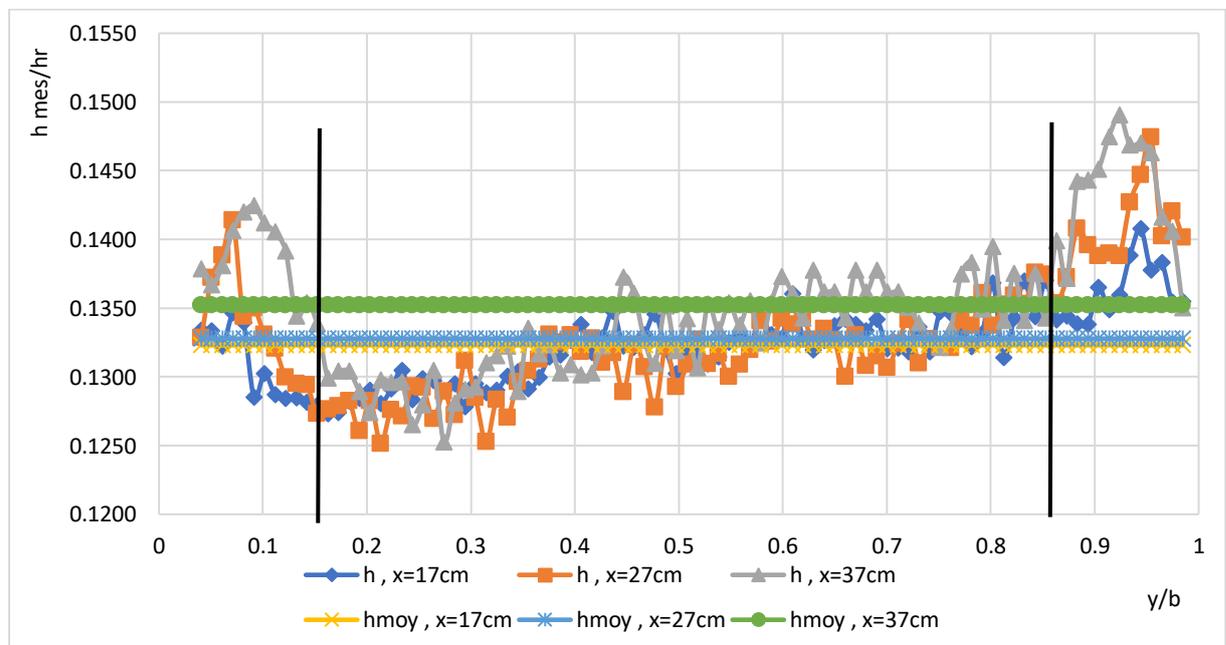


Figure 1.3. Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.09 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$; $F_1=3.28$)

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la (figure 1.3) est présenté dans les annexes (tableau a.3).

Le (tableau 1.4) illustre l'interprétation de la (figure 1.3) pour $Q=0.09 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$

Tableau 1.4. Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.09 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$)

x (m)	h_{moy}/h_r y=0.04 à 0.97	$h_{(y=0.49)}/h_r$	$h_{\text{max}}-h_{\text{min}}/h_r$ y=0.04 à 0.97	$ h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}} /h_{\text{centre}}$ (%)	h_{moy}/h_r y=0.15 à 0.85	$h_{\text{max}}-h_{\text{min}}/h_r$ y=0.15 à 0.85	$ h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}} /h_{\text{centre}}$ (%)
0.17	0,1320	0,1301	0,0134	1,51	0,1317	0,0098	1,35
0.27	0,1327	0,1291	0,0219	2,78	0,1311	0,0124	1,64
0.37	0,1350	0,1320	0,0239	2,23	0,1330	0,0147	0,86

d. Variation des hauteurs mesurées sur la largeur du canal pour $Q=0.11 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$

La variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal $h_{\text{mes}}/h_r=f(y/b)$ pour $Q= 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05 \text{ m}$ est donnée par la (figure 1.4).

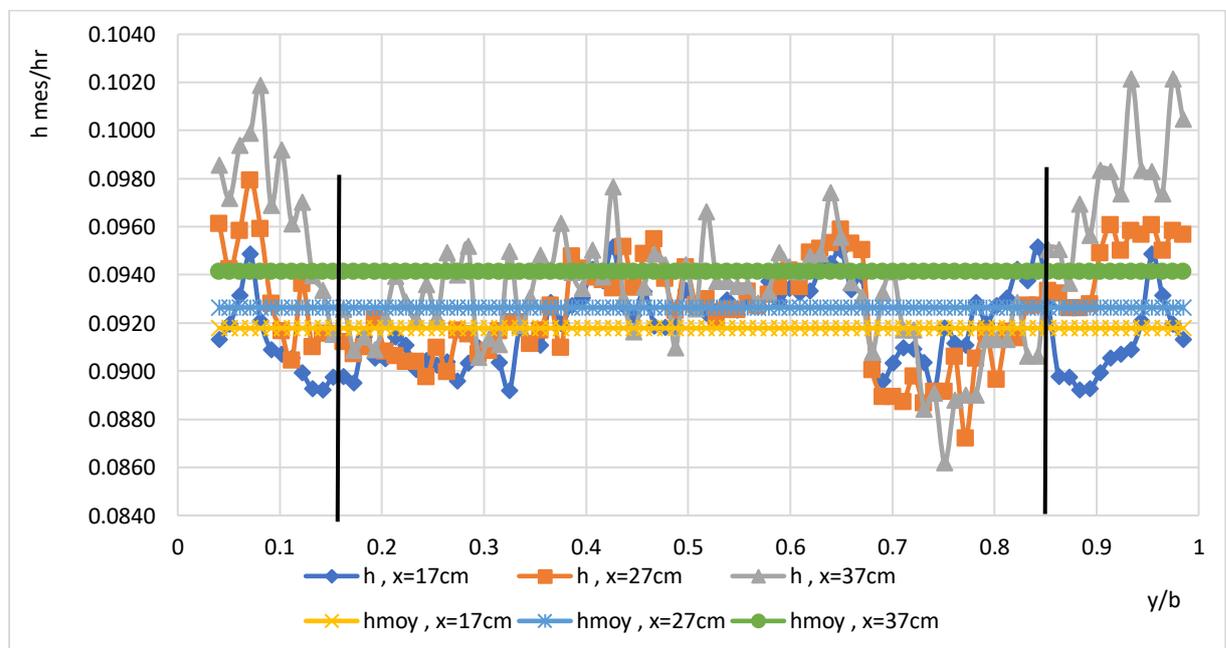


Figure 1.4. Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.11 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$; $F_1= 3.78$)

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la (figure 1.4) est présenté dans les annexes (tableau a.4).

Nous interprétons la (figure 1.4) pour $Q=0.11 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$ dans le (tableau 1.5).

Tableau 1.5. Variation de la hauteur mesurée sur la largeur du canal ($Q=0.11 \text{ m}^3/\text{s}$;
 $h_v=0.05\text{m}$)

x (m)	h_{moy}/h_r y=0.04 à 0.97	$h_{(y=0.49)}/h_r$	$h_{\text{max}}-h_{\text{min}}/h_r$ y=0.04 à 0.97	$ h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}} /h_{\text{centre}}$ (%)	h_{moy}/h_r y=0.15 à 0.85	$h_{\text{max}}-h_{\text{min}}/h_r$ y=0.15 à 0.85	$ h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}} /h_{\text{centre}}$ (%)
0.17	0,0917	0,0933	0,0059	1,76	0,0919	0,0059	1,46
0.27	0,0926	0,0943	0,0108	1,74	0,0922	0,0087	2,3
0.37	0,0940	0,0945	0,0159	0,5	0,0929	0,0115	1,69

Afin de vérifier l'homogénéité de la répartition du débit sur la largeur du canal, nous allons tout d'abord calculer $h_{\text{max}}-h_{\text{min}}$ sur toute la largeur du canal. Ensuite, l'écart entre h_{moy} et $h_{(0.49)}$, et enfin la différence entre h_{max} et h_{moy} .

Pour les 2 débits de l'ouverture 0.02 m : $h_{\text{max}}-h_{\text{min}(0.04 ; 0.97\text{m})} = 0.00454$

Pour les 2 débits de l'ouverture 0.05 m : $h_{\text{max}}-h_{\text{min}(0.04 ; 0.97\text{m})} = 0.00535$

Pour les 4 débits : $\frac{|h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}}|}{h_{\text{centre}}} (0.04 ; 0.97\text{m}) = 1.83 \%$

Pour l'ensemble des 4 débits, nous observons que la hauteur maximale de l'eau a été enregistrée au niveau des parois du canal, cela peut s'expliquer ça par les fuites de l'eau entre la vanne et les parois du canal.

Afin de s'assurer que la turbulence de l'eau ne va pas être induite par les fuites de l'eau à travers les parois, nous avons laissé 0.15m entre les parois du canal et le nouvel intervalle de mesure, cet intervalle est compris entre $x=0.15 \text{ m}$ et $x= 0.85\text{m}$. Nous avons ensuite calculé la différence entre la hauteur maximale et la hauteur minimale dans cet intervalle. Puis, l'écart entre h_{moy} et $h_{(0.49)}$.

Pour les 2 débits de l'ouverture 2cm : $h_{\max}-h_{\min(0.15 ; 0.85m)}= 0.00172$

Pour les 2 débits de l'ouverture 5cm : $h_{\max}-h_{\min(0.15 ; 0.85m)}=0.00375$

Pour les 4 débits : $\frac{|h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}}|}{h_{\text{centre}}}_{(0.15 ; 0.85m)}=1.38 \%$

Si on compare $h_{\max}-h_{\min}$ sur toute la largeur du canal (0.04m ; 0.97m) avec $h_{\max}-h_{\min}$ dans l'intervalle (0.15m ; 0.85m), et $\frac{|h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}}|}{h_{\text{centre}}}$ sur toute la largeur avec $\frac{|h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}}|}{h_{\text{centre}}}$ dans l'intervalle (0.15m ; 0.85m) on trouve que :

Pour les 2 débits de l'ouverture 0.02m : $h_{\max}-h_{\min (0.04 ; 0.97m)} > h_{\max}-h_{\min (0.15 ; 0.85m)}$
0.00454 > 0.00172

Pour les 2 débits de l'ouverture 0.05m : $h_{\max}-h_{\min (0.04 ; 0.97m)} > h_{\max}-h_{\min (0.15 ; 0.85m)}$
0.00535 > 0.00375

Pour tous les débits : $\frac{|h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}}|}{h_{\text{centre}}}_{(0.04 ; 0.97m)} > \frac{|h_{\text{centre}} - h_{\text{moy}}|}{h_{\text{centre}}}_{(0.15 ; 0.85m)}$
1.83 % > 1.38%

Suite à cette comparaison, nous trouvons que la valeur la plus adéquate (juste) de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal est celle mesurée au centre transversal du canal, aussi dans un intervalle éloigné des parois du canal, afin d'éviter la turbulence de d'eau liée aux fuites à travers les parois.

I.3. Variation de la hauteur de l'eau sur la longueur du canal

Les hauteurs mesurées sont déterminées à partir des sondes microsonic à ultrasons, tandis que celles calculées sont déterminées par la méthode de discrétisation.

Afin de déterminer les hauteurs calculées, nous avons suivi les étapes suivantes :

- 1- Détermination de la ligne d'eau amont (h_1) : il s'agit de la ligne de hauteur d'eau calculée d'amont en aval sur le canal horizontal. Nous avons choisi de prendre la hauteur mesurée à l'abscisse 0.1m comme hauteur initiale ($h_{1(\text{initial})}= h_{0.1}$). La ligne d'eau en amont a été calculée à l'aide de cette approche de discrétisation :

$$h_{(n+1)} = h_n - \frac{dh}{dx} (x_n - x_{n+1}) \quad (1.3)$$

2- Détermination de la hauteur conjuguée (h_2) : il s'agit de la ligne de la hauteur de la surface libre correspondant à la ligne d'eau amont (h_1), dont :

$$h_2 = \frac{-h_1 + h_1(\sqrt{1 + 8F_1^2})}{2} \quad (1.4)$$

3- Détermination de la ligne d'eau (h_3) : il s'agit de la ligne de la hauteur de la surface libre calculée d'aval en amont sur le canal horizontal. La hauteur initiale $h_{3(\text{initial})}$ est donc celle qui correspond à l'extrémité aval du canal en $x=2,05\text{m}$, ($h_{3(\text{initial})} = h_{2,05}$). Afin de calculer la ligne d'eau aval sur le canal, une approche de discrétisation doit être appliquée :

$$h_{(n-1)} = h_n - \frac{dh}{dx} (x_n - x_{n-1}) \quad (1.5)$$

Avec,

h_n (m) représente la hauteur d'eau mesurée ; x_n (m) représente l'abscisse de la mesure d'eau , dont : i représente l'angle que fait le fond avec l'horizontale, dans ce cas l'angle est nul, alors :

$i = 0$; $\frac{dh}{dx} = \frac{i-J}{(1-Fr^2)} = \frac{-J}{(1-Fr^2)}$; $F_1 = V/\sqrt{gh}$ nombre de Froude calculé pour une section

rectangulaire ; $J = V^2 / (K^2 \cdot R_h^{4/3})$; dont : $R_h = \frac{\Omega}{P(\text{mouillé})} = \frac{h \times 1}{2h+1}$ et $K = 70 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$.

Théoriquement, le ressaut hydraulique se forme au point de croisement entre la hauteur conjuguée (h_2) et la ligne d'eau aval (h_3). Les hauteurs d'eau calculées (h_{calc}) ont été déterminées par la méthode de discrétisation (Huichao & Lingling, 2004).

a. Variation des hauteurs mesurées et calculées du ressaut pour $h_v=0.02m$

Les quatre graphes ci-dessous représentent la variation de (h_{mes}/h_r) et (h_{calc}/h_r) en fonction de (x/L_r) , dans le cas de $h_v=0.02m$, pour quatre débits différents et un nombre de Froude qui varie entre 4.69 et 5.92.

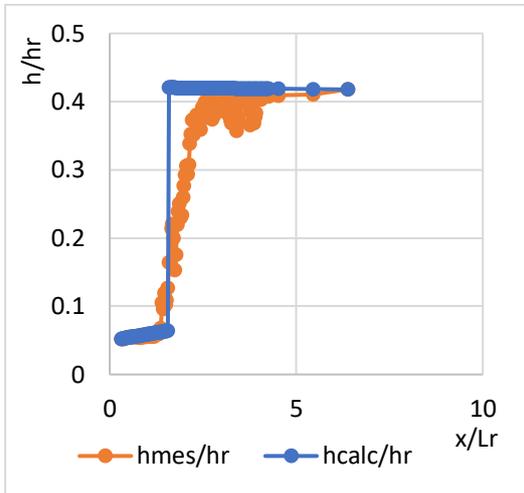


Figure 1.5. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.0385 m^3/s ; h_v = 0.02m$$

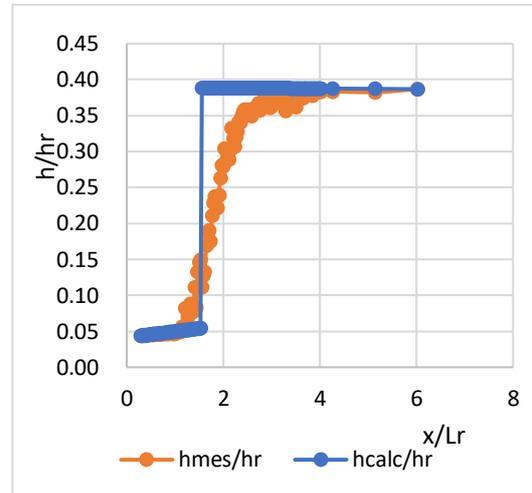


Figure 1.6. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.042 m^3/s ; h_v = 0.02m$$

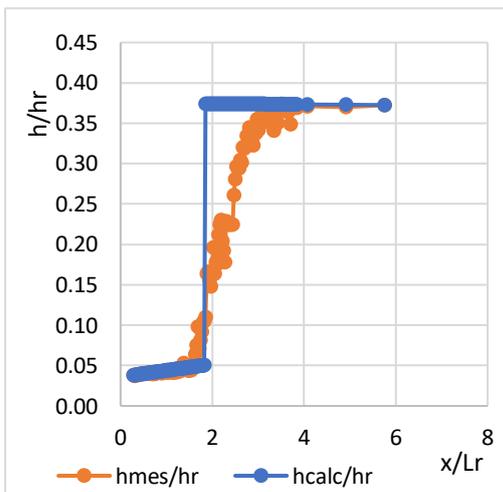


Figure 1.7. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.045 m^3/s ; h_v = 0.02m$$

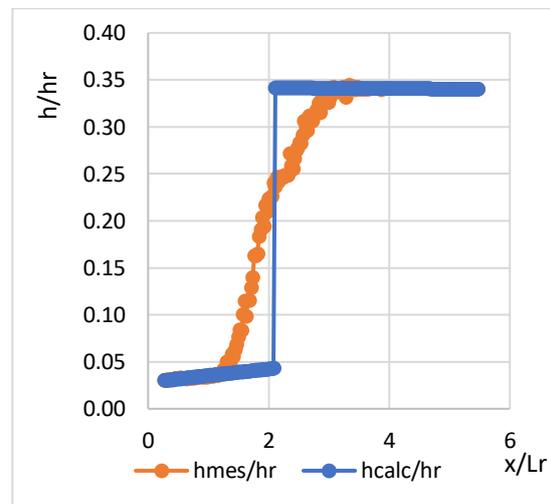


Figure 1.8. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.0485 m^3/s ; h_v = 0.02m$$

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage des graphes (1.5) ; (1.6) ; (1.7) et (1.8) sont présentés dans les annexes, par les tableaux (a.5) ; (a.6) ; (a.7) et (a.8), respectivement.

b. Variation des hauteurs mesurées et calculées du ressaut pour $h_v=0.03m$

Les quatre graphes ci-dessous représentent la variation (h_{mes}/h_r) et (h_{calc}/h_r) en fonction de (x/L_r), dans le cas de $h_v=0.03m$, pour quatre débits différents et $3.84 < F_1 < 5.03$.

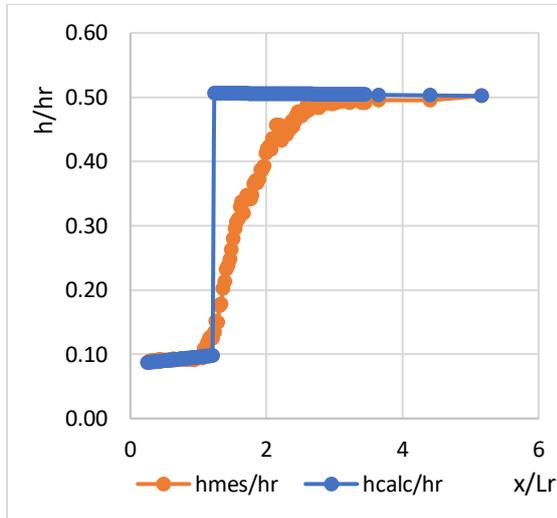


Figure 1.9. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.053 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.03m$$

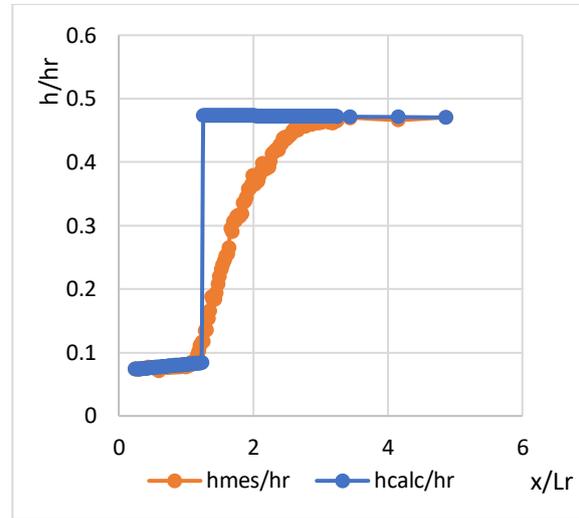


Figure 1.10. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.058 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.03m$$

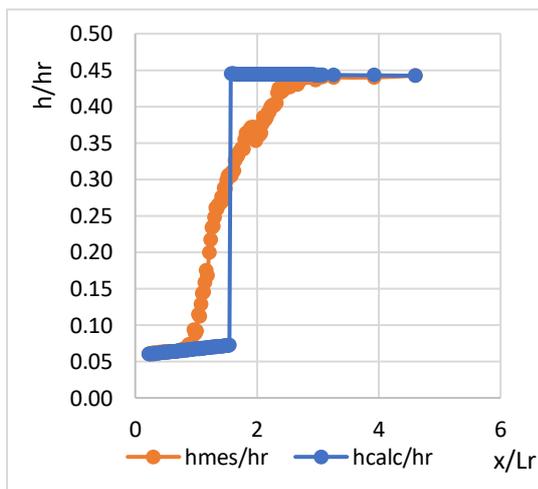


Figure 1.11. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.063 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.03m$$

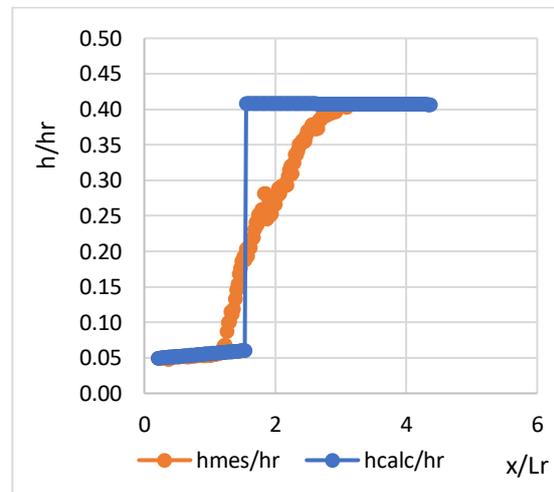


Figure 1.12. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.068 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.03m$$

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage des graphes (1.9) ; (1.10) ; (1.11) et (1.12) sont présentés dans les annexes, par les tableaux (a.9) ; (a.10) ; (a.11) et (a.12), respectivement.

c. Variation des hauteurs mesurées et calculées du ressaut pour $h_v=0.04\text{ m}$

Les quatre graphes ci-dessous représentent la variation de (h_{mes}/h_r) et (h_{calc}/h_r) en fonction de (x/L_r) , dans le cas de $h_v=0.04\text{ m}$, pour quatre débits différents et $3.50 < F_1 < 4.47$.

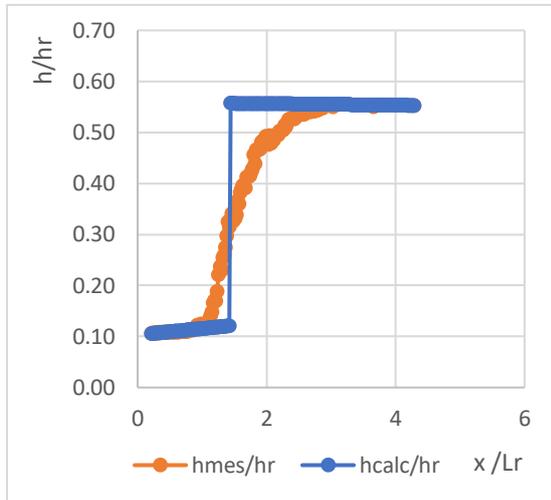


Figure 1.13. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.07 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.04\text{ m}$$

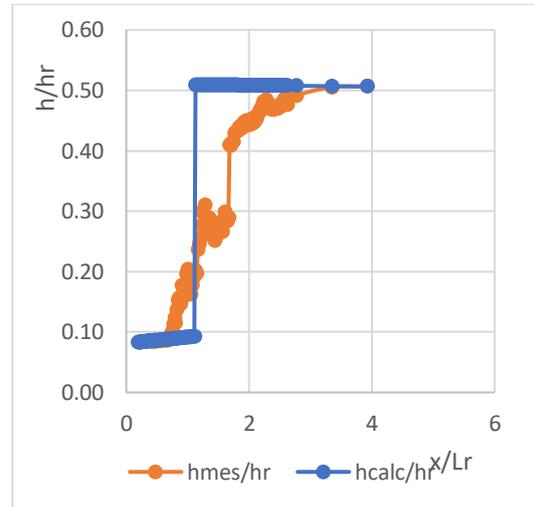


Figure 1.14. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.08 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.04\text{ m}$$

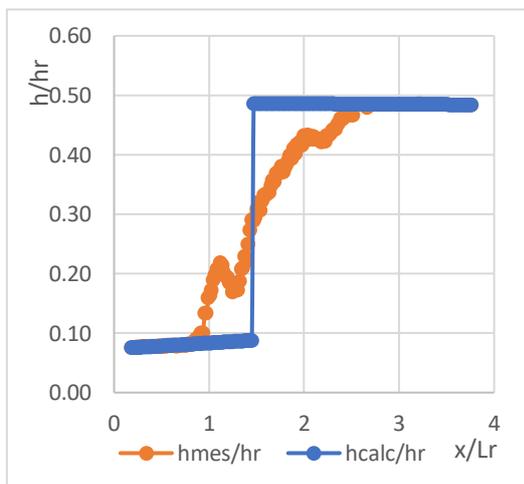


Figure 1.15. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.085 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.04\text{ m}$$

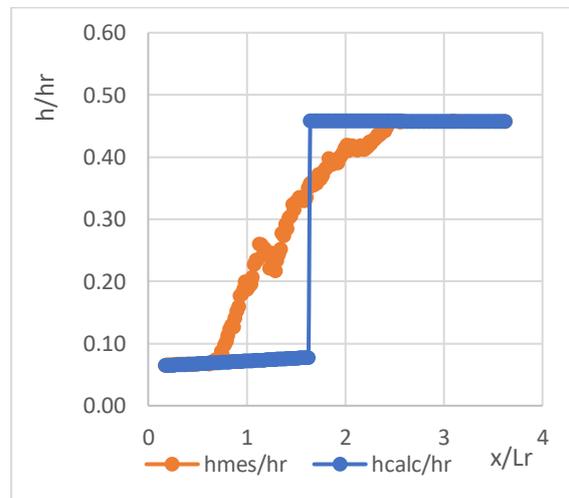


Figure 1.16. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$$Q = 0.09 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.04\text{ m}$$

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage des graphes (1.13) ; (1.14) ; (1.15) et (1.16) sont présentés dans les annexes, par les tableaux (a.13) ; (a.14) ; (a.15) et (a.16), respectivement.

d. Variation des hauteurs mesurées et calculées du ressaut pour $h_v=0.05$ m

Les quatre graphes ci-dessous représentent la variation de (h_{mes}/h_r) et (h_{calc}/h_r) en fonction de (x/L_r) , dans le cas de $h_v=0.05$ m, pour quatre débits différents et $3.28 < F_1 < 3.78$.

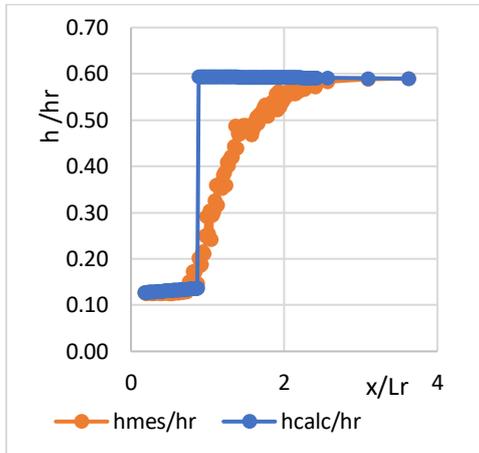


Figure 1.17. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$Q = 0.09 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.05 \text{ m}$

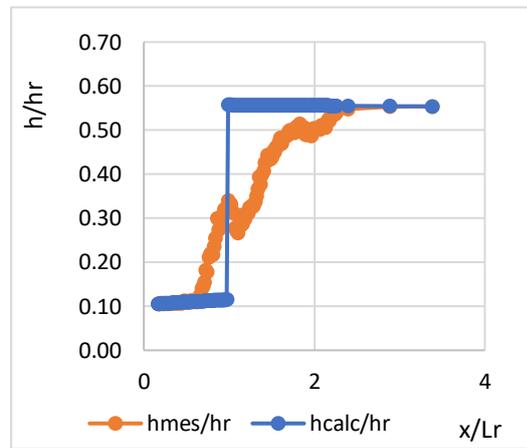


Figure 1.18. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.05 \text{ m}$

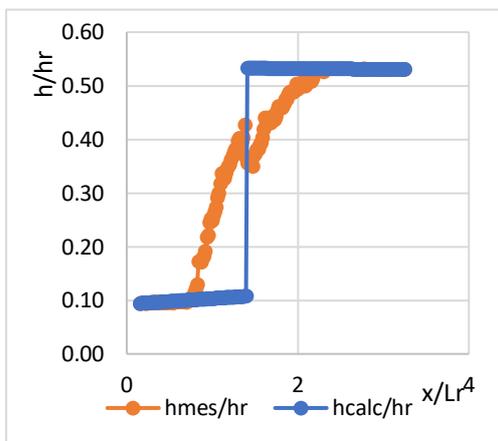


Figure 1.19. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$Q = 0.106 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.05 \text{ m}$

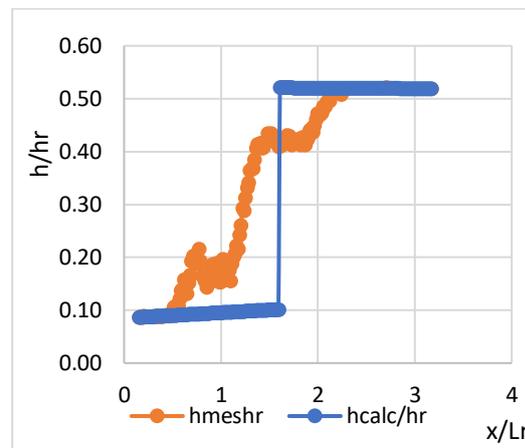


Figure 1.20. Hauteurs mesurées et calculées de l'eau sur la longueur du canal

$Q = 0.11 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v = 0.05 \text{ m}$

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage des graphes (1.17); (1.18); (1.19) et (1.20) sont présentés dans les annexes, par les tableaux (a.17); (a.18); (a.19) et (a.20), respectivement.

Sur la base des 16 derniers graphes, on remarque que le début théorique du ressaut est toujours postérieur à son début réel. La cause peut être due à la négligence des forces de frottement pour les valeurs calculées.

Le tableau en dessous représente les points calculés et expérimentaux du début du ressaut hydraulique.

Tableau 1.7. Début du ressaut hydraulique, pour les valeurs calculées et mesurées

h_v (m)	Q (m ³ /s)	Début du ressaut ($h_{1mesurée}$)		Début du ressaut ($h_{1calculée}$)	
		x/Lr	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r
0.02	0.038	1,37	0,066	1,53	0,0639
	0.042	1,18	0,054	1,53	0,0543
	0.045	1,60	0,050	1,80	0,0502
	0.0485	1,25	0,043	2,06	0,0428
0.03	0.053	1,06	0,098	1,06	0,0938
	0.058	0,11	0,086	1,07	0,0814
	0.063	0,94	0,073	1,52	0,0718
	0.068	1,19	0,061	1,51	0,0602
0.04	0.07	1,09	0,121	1,40	0,1240
	0.08	0,73	0,096	1,11	0,0926
	0.085	0,88	0,089	1,45	0,0881
	0.09	0,69	0,078	1,63	0,0779
0.05	0.09	0,74	0,139	0,85	0,1365
	0.1	0,64	0,116	0,96	0,1144
	0.106	0,78	0,109	1,39	0,1081
	0.11	0,53	0,105	1,58	0,1012

I.4. Comparaison entre $h_{2\text{ finale}}$ et $h_{2\text{ moy}}$

Les valeurs de $h_{2(s5)}$ représentent les hauteurs d'eau mesurées par la sonde '5' à l'abscisse $x_{(s5)}=0.145$ m (l'abscisse la plus proche de la fin du ressaut, sachant que le ressaut se termine entre 0,8 m et 1,04m.). Tandis que les valeurs de ($h_{2\text{ moy}}$) représentent la moyenne des hauteurs mesurées par les trois dernières sondes aux abscisses ($x_{(s5)}=0.145$ m, $x_{(s6)}=0.175$ m et $x_{(s7)}=0.205$ m). La représentation graphique des résultats expérimentaux est donnée par la (figure 1.21). Cette figure évoque la comparaison entre $h_{2(s5)}$ et $h_{2(moy)}$ pour toute la gamme étudiée.

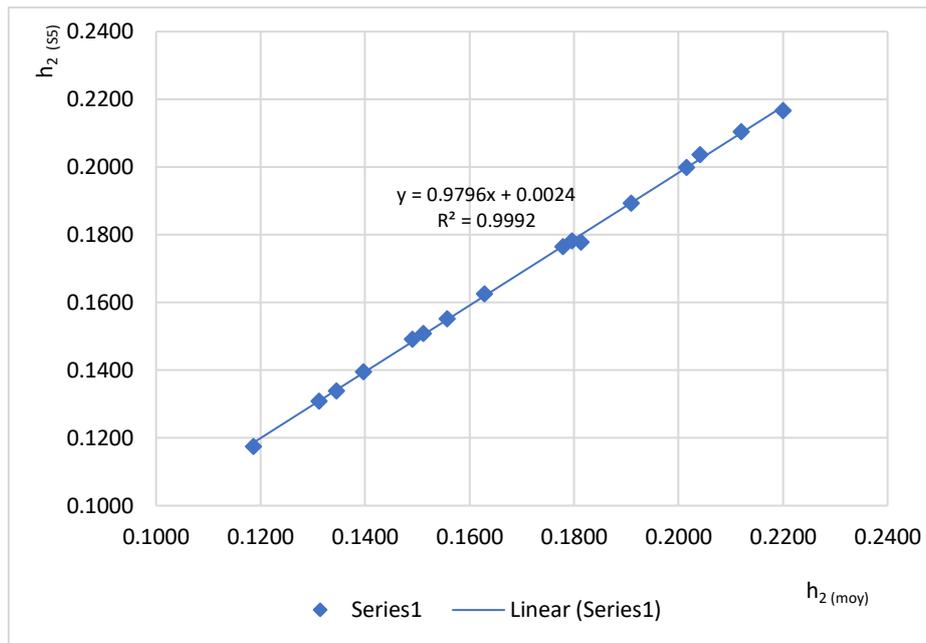


Figure 1.21. Comparaison entre $h_2 \text{ (s5)}$ et $h_2 \text{ moy}$ pour tous débits étudiés

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de la (figure 1.21) est donné par le tableau en dessous.

Sur la base du (tableau 1.8), nous trouvons que l'erreur moyenne entre la hauteur $h_2 \text{ (s5)}$ et $h_2 \text{ (moy)}$ est 0.61%.

Tableau 1.8. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de la comparaison entre $h_2 \text{ (s5)}$ et $h_2 \text{ moy}$

$h_v \text{ (m)}$	$Q \text{ (m}^3\text{/s)}$	$h_2 \text{ (s5)}$	$h_2 \text{ moy}$	$h_2 \text{ (s5)} - h_2 \text{ moy} / h_2 \text{ finale} \text{ (%)}$
0.02	0,0385	0,1176	0,1186	0,8599
	0,042	0,1308	0,1311	0,1922
	0,045	0,1395	0,1396	0,0754
	0,0485	0,1509	0,1512	0,1537
0.03	0,053	0,1338	0,1345	0,5104
	0,058	0,1492	0,1490	0,1751
	0,063	0,1626	0,1628	0,1664
	0,068	0,1766	0,1779	0,7288
0.04	0,07	0,1553	0,1556	0,2363
	0,08	0,1778	0,1813	1,9773
	0,085	0,1894	0,1909	0,8036
	0,09	0,2036	0,2041	0,2407
0.05	0,09	0,1782	0,1795	0,7132
	0,1	0,1999	0,2015	0,7625
	0,106	0,2105	0,2119	0,6676
	0,11	0,2167	0,2200	1,4988

I.5. Hauteur supercritique du ressaut

La hauteur supercritique du ressaut a été déterminée en plusieurs points en amont du ressaut hydraulique, tels que : h_v , $h_{0.32}$, h_{1mes} , ainsi que la hauteur théorique initiale $h_{1théo}$.

La (figure 1.21) représente la variation des rapports des hauteurs initiales de l'eau (en amont du ressaut) sur la hauteur mesurée au niveau du réservoir h_r en fonction de $Q/(L.h_r^{3/2}.g^{1/2})$, dont :

- h_v/h_r , le rapport entre la hauteur de l'ouverture de la vanne et la hauteur de l'eau au niveau du réservoir h_r ;
- $h_{0.32}/h_r$, le rapport entre la hauteur de l'eau mesurée à l'abscisse $x=0.32m$ et la hauteur h_r . Nous avons choisi l'abscisse $x=0.32m$, car tous les ressauts hydrauliques étudiés se sont formés entre $x=0.34m$ et $x=0.57m$;
- h_{1mes}/h_r , le rapport entre la hauteur de l'eau mesurée au pied du ressaut et la hauteur h_r . h_{1mes} représente la hauteur initiale de l'eau correspondant à la moyenne des 3 hauteurs mesurées au début du ressaut hydraulique. Afin de déterminer la valeur de cette hauteur, la différence entre la moyenne des 3 hauteurs mesurées au début du ressaut hydraulique et la moyenne des hauteurs qui les suivent doit être supérieure à 0,0031 m (3,1 mm). Le début du ressaut hydraulique varie d'un cas à l'autre, de 0,34m à 0,59m en abscisse. Et pour "y" au centre transversal du canal ($y=0,49m$).
- $h_{1théo}/h_r$, le rapport entre la hauteur initiale théorique et h_r . $h_{1théo}$ est donnée par:

$$h_{1(théo)} = \frac{2h_2}{\sqrt{1+8F_1^2}-1} \quad (1.6)$$

Dont ; h_2 représente la hauteur finale de l'eau, cette hauteur a été mesurée à $x_{(s)}=0,145 m$ et $y=0,49m$.

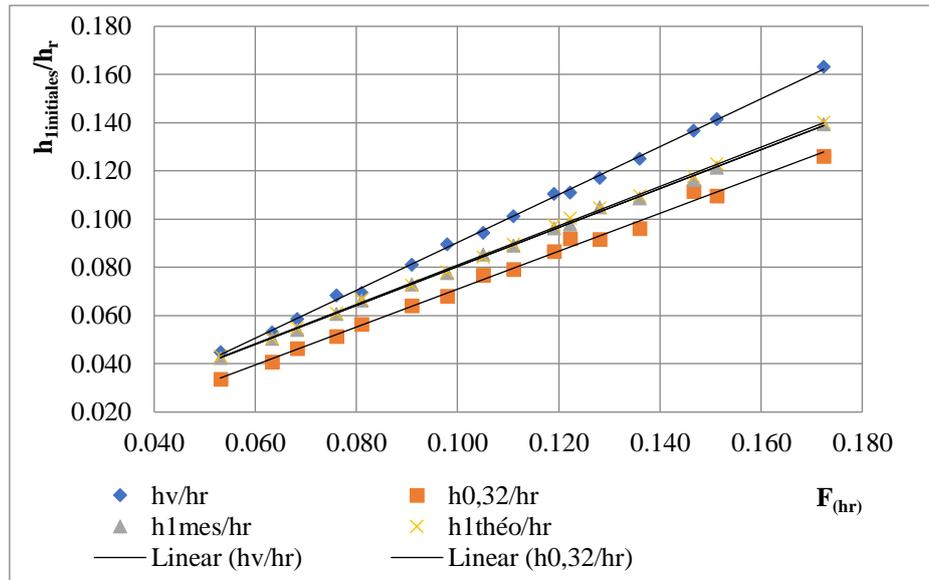


Figure 1.22. Variation des rapports des hauteurs initiales/ h_r en fonction de $Fr(h_r)$

D'après la (figure 1.22), nous remarquons que :

1. Pour toute la gamme étudiée, les rapports des $\frac{h_{1initiales}}{h_r}$ y compris $\frac{h_v}{h_r}$, $\frac{h_{0,32}}{h_r}$, $\frac{h_{1mes}}{h_r}$ et $\frac{h_{1théo}}{h_r}$ augmentent avec l'augmentation du rapport $Fr(h_r)$;
2. $\frac{h_v}{h_r} (moy) > \frac{h_{1mes}}{h_r} (moy) > \frac{h_{0,32}}{h_r} (moy)$
 $0.096 > 0.087 > 0.077$;
3. Le rapport $\frac{h_v}{h_r}$ représente le rapport le plus grand par rapport $\frac{h_{0,1}}{h_r}$, $\frac{h_{0,32}}{h_r}$, $\frac{h_{1mes}}{h_r}$ et $\frac{h_{1théo}}{h_r}$;
4. La hauteur d'eau en aval d'une vanne est toujours une fraction constante de la hauteur de l'ouverture de la vanne, par conséquent la variation de $\frac{h_{0,32}}{h_r}$, $\frac{h_{1mes}}{h_r}$ et $\frac{h_{1théo}}{h_r}$ est approximativement linéaire ;
5. Le rapport des hauteurs initiales suit une solution analytique qui est la solution de l'équation de Bernoulli. De ce fait, la gamme des hauteurs initiales d'eau suit une loi approximativement linéaire ;

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage de (la figure 1.22) est donné par le tableau en dessous.

Tableau 1.9. Rapports des hauteurs initiales/ h_r ; $F(h_r)$

h_v (m)	Q (m ³ /s)	$F_r(h_r)$	h_v/h_r	$h_{0,32}/h_r$	h_{1mes}/h_r	$h_{1théo}/h_r$
0,02	0,0385	0,081	0,070	0,056	0,066	0,065
	0,042	0,068	0,059	0,046	0,054	0,055
	0,045	0,063	0,053	0,041	0,050	0,051
	0,0485	0,053	0,045	0,034	0,043	0,043
0,03	0,053	0,122	0,111	0,092	0,098	0,099
	0,058	0,105	0,094	0,077	0,086	0,084
	0,063	0,091	0,081	0,064	0,073	0,073
	0,068	0,076	0,068	0,052	0,061	0,061
0,04	0,07	0,151	0,142	0,110	0,121	0,122
	0,08	0,119	0,111	0,087	0,096	0,093
	0,085	0,111	0,101	0,079	0,089	0,089
	0,09	0,098	0,090	0,068	0,078	0,078
0,05	0,09	0,172	0,163	0,126	0,139	0,138
	0,1	0,147	0,137	0,112	0,116	0,116
	0,106	0,136	0,125	0,096	0,109	0,109
	0,11	0,128	0,117	0,092	0,105	0,102

Le tableau (1.10) représente les écarts relatifs entre les hauteurs initiales théoriques $h_{1théo}$ et les autres hauteurs : h_v , h_{1mes} et $h_{0,32}$.

Tableau 1.10. Comparaison entre $h_{1théo}$ et les hauteurs h_v , h_{1mes} et $h_{0,32}$

Fr(hr)	$h_{1théo}-h_v/h_{1théo}$	$h_{1théo}-h_{1mes}/h_{1théo}$	$h_{1théo}-h_{0,32}/h_{1théo}$
0,081	7,03	0,87	13,10
0,068	7,23	1,67	15,05
0,063	4,85	0,48	19,51
0,053	4,27	1,37	21,84
0,122	12,08	2,52	6,96
0,105	11,81	1,29	9,04
0,091	11,85	0,50	11,62
0,076	12,80	0,74	15,07
0,151	15,79	1,32	10,27
0,119	18,39	1,23	7,21
0,111	14,13	0,71	10,76
0,098	14,54	0,60	12,74
0,172	18,04	0,55	8,82
0,147	17,94	1,11	3,79
0,136	14,96	0,95	11,49
0,128	15,15	0,44	9,81
Moy	12.55	1.02	11.69

D'après le tableau (1.10) , nous observons que :

1. L'écart relatif entre la moyenne des hauteurs initiales théoriques et la moyenne des ouvertures de la vanne est : $(h_{1théo}-h_v/h_{1théo})_{moy}= 12.55 \%$;
2. L'écart relatif entre la moyenne des hauteurs initiales théoriques et la moyenne des hauteurs mesurées au pied de ressaut est : $(h_{1théo}-h_{1mes}/h_{1théo})_{moy} = 1.02 \%$;
3. L'écart relatif entre la moyenne des hauteurs initiales théoriques et la moyenne des hauteurs mesurées à l'abscisse $x=0.32m$ est $(h_{1théo}-h_{0.32}/h_{1théo})_{moy}= 11.69\%$;

Sur la base de ces observations, nous constatons que :

- h_v est supérieure aux autres hauteurs initiales ($h_{1théo}$, h_{1mes} et $h_{0.32}$). Les écarts relatifs entre l'ouverture de la vanne et les autres hauteurs initiales ($h_{1théo}$, h_{1mes} et $h_{0.32}$) sont supérieurs à 11%. Cela signifie que la hauteur de l'eau au niveau de l'ouverture de la vanne ne représente pas la valeur juste de la hauteur de l'eau au début de ressaut ;
- $h_{0.32}$ représente la hauteur de l'eau la plus petite par rapport (h_v , h_{1mes} et $h_{1théo}$). Nous pouvons expliquer ça par l'effet de contraction de la vanne et les forces de frottement ;
- h_{1mes} représente la hauteur la plus proche à la hauteur théorique $h_{1théo}$, avec $(\frac{h_{1théo}-h_{1mes}}{h_{1théo}})_{moy} \times 100 = 1,02\%$. Donc la hauteur initiale la plus appropriée est celle mesurée au pied du ressaut.

I.6. Comparaison entre h_{1mes} et h_{1theo}

La figure (1.23) représente une comparaison entre h_{1mes} et h_{1theo} .

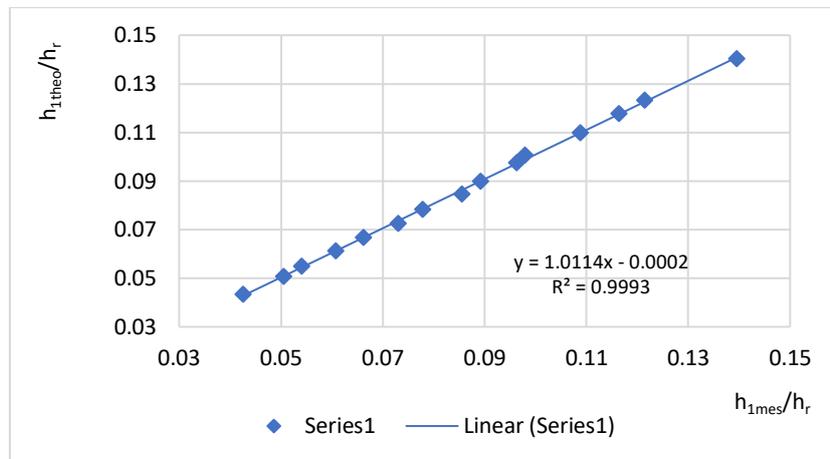


Figure 1.23. Comparaison entre h_{1mes} et h_{1theo} - canal rectangulaire en avant d'une vanne rectangulaire

Cette figure montre que la hauteur initiale théorique est liée à la hauteur initiale mesurée, par la relation suivante :

$$h_{1theo}/h_r = 1,0114 h_{1mes}/h_r - 0,0002 \quad (1.7)$$

Ceci indique que h_{1mes} et h_{1theo} sont très proches. Par conséquent, le critère de choix de h_{1mes} est valable.

Tous les points de mesure qui ont été utilisés pour tracer la (figure 1.22) sont présentés dans le tableau (1.11).

Tableau 1.11. *Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de la comparaison entre h_{1mes} et h_{1theo}*

F_1	h_{1mes}/h_r	h_{1theo}/h_r
4,69	0,066	0,067
5,30	0,054	0,055
5,54	0,050	0,051
5,92	0,043	0,043
3,84	0,098	0,100
4,28	0,086	0,084
4,65	0,073	0,073
5,03	0,061	0,061
3,50	0,121	0,123
3,91	0,096	0,097
4,13	0,089	0,090
4,47	0,078	0,078
3,28	0,139	0,140
3,64	0,116	0,118
3,74	0,109	0,110

I.7. Influence de la variation de la hauteur de l'eau sur la charge

Afin d'étudier l'influence de la variation de la hauteur de l'eau sur la charge, nous devons comparer la moyenne des écarts types des hauteurs mesurées avec celle des charges (tableau 1.12). Les charges dans ce cas ont été calculées à partir des hauteurs mesurées.

Tableau 1.12. Écarts types des hauteurs et des charges en amont du ressaut

h_v (m)	Q (m ³ /s)	F ₁	Écart-type	
			h_{mes} (m)	H(m)
0,02	0,0385	4,69	0,0009	0,0279
	0,042	5,30	0,0010	0,0380
	0,045	5,54	0,0013	0,0606
	0,0485	5,92	0,0010	0,0691
0,03	0,053	3,84	0,0005	0,0093
	0,058	4,28	0,0007	0,0173
	0,063	4,65	0,0014	0,0384
	0,068	5,03	0,0010	0,0378
0,04	0,07	3,50	0,0015	0,0220
	0,08	3,91	0,0010	0,0201
	0,085	4,13	0,0012	0,0251
	0,09	4,47	0,0008	0,0232
0,05	0,09	3,28	0,0008	0,0101
	0,1	3,64	0,0011	0,0164
	0,106	3,74	0,0010	0,0179
	0,11	3,78	0,0020	0,0363
Moyenne			0,0011	0,0293

D'après l'étude de la variation des hauteurs et des charges d'eau en amont du ressaut, nous constatons qu'une petite variation de la hauteur mesurée en amont du ressaut peut entraîner une grande variation sur la charge. Afin de mettre en évidence cette sensibilité, nous avons calculé les écarts types des hauteurs mesurées en amont du ressaut (entre 0,1 et le début du ressaut), puis les écarts types des charges dans le même intervalle (de 0,1 au début du ressaut).

$$\text{Ecart type (h)} = 0.0011 \text{ m}$$

$$\text{Ecart type (H)} = 0.0291 \text{ m}$$

Sur la base de ces résultats, nous pouvons déduire que la variation de la charge est très sensible à la hauteur d'eau.

I.8. Perte de charge dans le canal rectangulaire

La perte de charge dans le canal sera divisée en deux parties, la première est en amont du ressaut et la deuxième dans le ressaut.

I.8.1. Pertes de charge en amont du ressaut

La perte de charge en amont du ressaut est calculée entre le réservoir et le début du ressaut est montré par la (figure 1.24) :

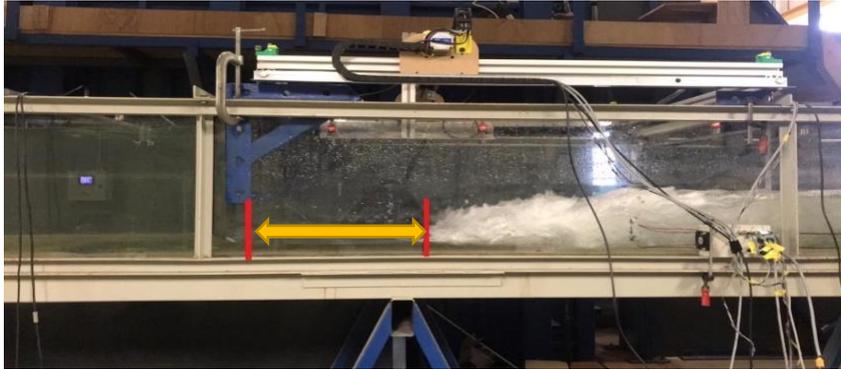


Figure 1.24. Perte de charge entre l'abscisse 0.1 et le début du ressaut hydraulique

$$(Q=0.106 \text{ m}^3/\text{s} ; h_v=0.05 \text{ m}; F_1=3.79)$$

Cette perte de charge est donnée par la relation suivante :

$$\Delta H_{1(\text{amont du ressaut})} = H_r - H_{i \text{ mes}} \quad (1.8)$$

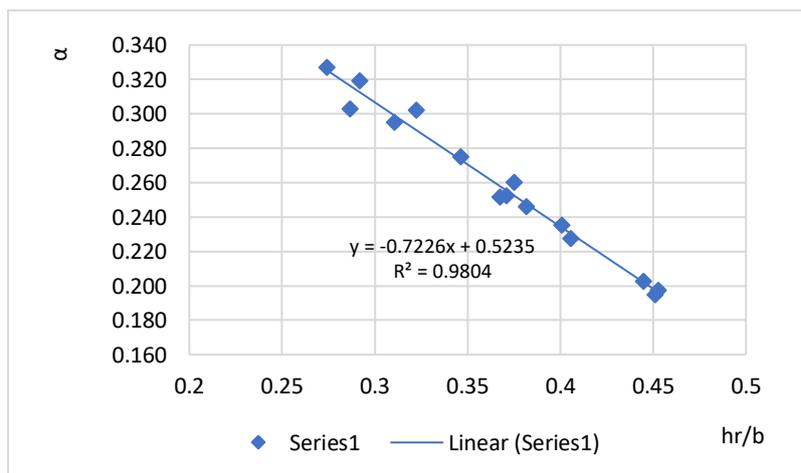
$H_{i \text{ mes}}$ représente la charge en aval de la vanne, en dehors de la zone contractée et en amont du ressaut, dont $H_{i \text{ mes}}$ varie du cas à l'autre, dont : la première valeur de $\Delta H_{1(\text{ressaut en amont})} \geq 0,05$ et $H_i - H_{i+1} > 0,01$. Les critères de sélection de $H_{i \text{ mes}}$ sont présentés dans le tableau suivant :

Tableau 1.13. Critères de sélection des $H_{i\text{ mes}}$

Débit (m ³ /s)	Abscisse (m)	$H_{i\text{ mes}}$ (m)	$\Delta H_{(\text{amont du ressaut})}$ (m)	$H_i - H_{i+1}$ (m)
0.0385	0.44	0.23	0.062	0.048
0.042	0.39	0.28	0.064	0.068
0.045	0.56	0.31	0.065	0.082
0.0485	0.47	0.38	0.06	0.097
0.053	0.41	0.22	0.054	0.034
0.058	0.47	0.26	0.059	0.016
0.063	0.39	0.31	0.06	0.027
0.068	0.56	0.38	0.055	0.018
0.07	0.47	0.24	0.05	0.0135
0.08	0.38	0.31	0.053	0.036
0.085	0.48	0.34	0.056	0.01
0.09	0.4	0.4	0.053	0.03
0.09	0.42	0.26	0.05	0.05
0.1	0.39	0.32	0.053	0.03
0.106	0.48	0.35	0.054	0.034

$$\text{Alors: } \alpha = 2g (H_r - H_{i\text{ mes}}) / (Q/Ae)^2 \quad (1.9)$$

La figure (1.25) illustre la relation entre α et h_r/b :

**Figure 1.25.** Coefficient de contraction (α) en fonction de (h_r/b)

D'après la figure (1.25), nous trouvons :

$$\alpha_{\text{calc}} = -0.7226 (h_r/b)^2 + 0.5235 \quad (1.10)$$

Ainsi, la perte d'énergie calculée en amont du saut hydraulique a été calculée à partir de l'équation (1.10), par la relation suivante :

$$\Delta H_{(\text{amont du ressaut}) \text{ calc}} = \alpha_{\text{calc}} (Q/Ae)^2/2g \quad (1.11)$$

Afin de valider l'équation 11, nous devons comparer :

- $\Delta H_{(\text{amont du ressaut}) \text{ calc}}$ avec $\Delta H_{(\text{amont au ressaut}) \text{ mes}}$
- $h_{1\text{calc}}$ avec $h_{1\text{mes}}$; dont:

$$h_{1\text{calc}} = H_{r \text{ mes}} + \Delta H_{(\text{amont du ressaut}) \text{ calc}} - \frac{Q^2}{b h_{1\text{calc}}^2 2g} \quad (1.12)$$

- $h_{r \text{ calc}}$ avec $h_{r \text{ mes}}$; dont :

$$h_{r \text{ calc}} = H_{1 \text{ theo}} + \Delta H_{(\text{amont du ressaut}) \text{ calc}} - \frac{Q^2}{b h_{r \text{ calc}}^2 2g} \quad (1.13)$$

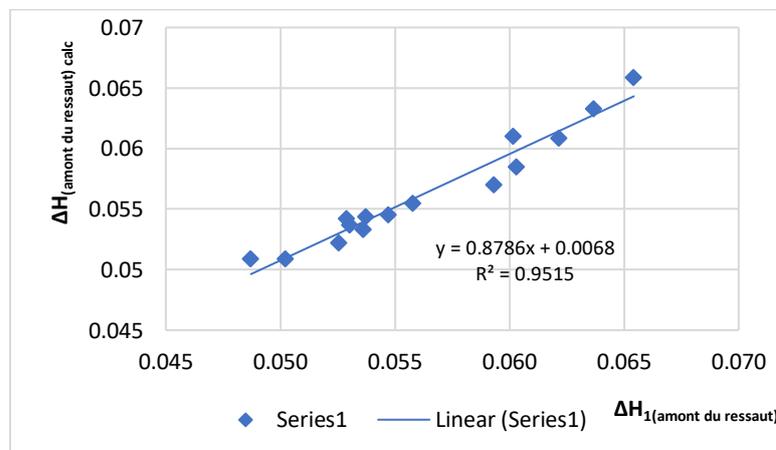


Figure 1.26. Comparaison de la perte d'énergie en amont $\Delta H_{1(\text{amont du ressaut})}$ (1.8) avec $\Delta H_{(\text{en amont du ressaut}) \text{ calc}}$ (1.11)

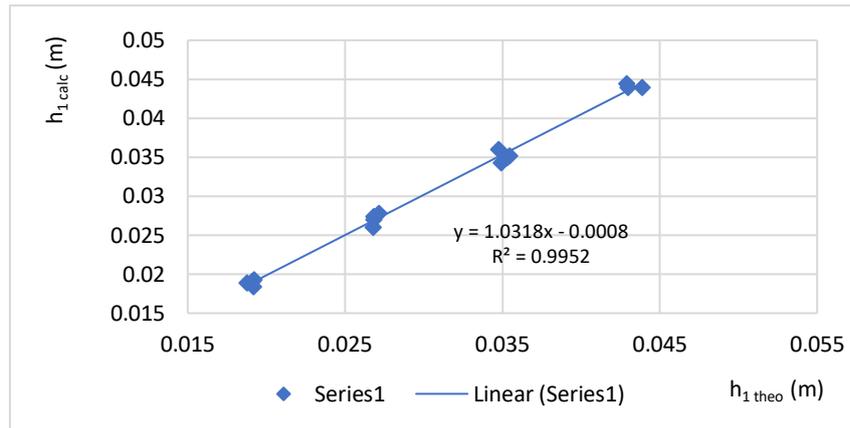


Figure 1.27. Comparaison de $h_{1\text{theo}}$ (1.6); avec $h_{1\text{calc}}$ (1.12)

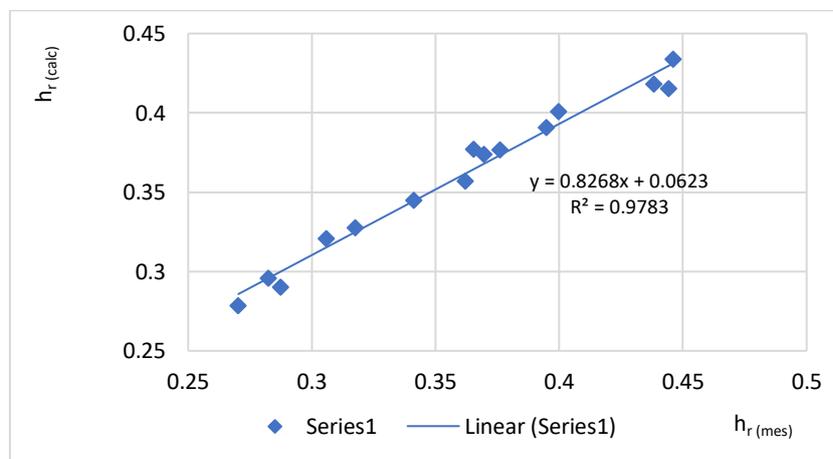


Figure 1.28. Comparaison de $h_{r\text{mes}}$ avec $h_{r\text{calc}}$ (1.13)

Les erreurs moyennes sont les suivantes :

$$\text{Erreur } (\Delta H_{\text{(amont du ressaut) mes}} \text{ et } \Delta H_{\text{(amont du ressaut) calc}}) = 1.63 \%$$

$$\text{Erreur } (h_{1\text{theo}} \text{ et } h_{1\text{calc}}) = 1.79\%$$

$$\text{Erreur } (h_{r\text{mes}} \text{ et } h_{r\text{calc}}) = 2.59\%$$

Ces résultats confirment la validité de l'équation (1.11).

Tous les points de mesure expérimentaux qui ont été utilisés pour tracer les graphiques des figures 1.25, 1.26, 1.27 et 1.28 sont présentés dans les tableaux (1.14 ; 1.15 ; 1.16 et 1.17).

Tableau 1.14. Coefficient de contraction α_{mes} en fonction de (h_r/b)

α_{mes}	h_r/b
0,319	0,292
0,275	0,346
0,246	0,382
0,195	0,451
0,327	0,274
0,302	0,323
0,260	0,375
0,203	0,445
0,303	0,287
0,252	0,367
0,235	0,401
0,198	0,453
0,295	0,311
0,252	0,371
0,228	0,406

Tableau 1.15. Comparaison de la perte d'énergie en amont $\Delta H_{1(amont\ du\ ressaut)}$ (1.8) avec $\Delta H_{(en\ amont\ du\ ressaut)\ calc}$ (1.11)

$\Delta H_{1(amont\ du\ ressaut)}$	$\Delta H_{(amont\ du\ ressaut)\ calc}$
0,062	0,061
0,064	0,063
0,065	0,066
0,060	0,061
0,054	0,053
0,059	0,057
0,060	0,058
0,055	0,055
0,049	0,051
0,053	0,054
0,056	0,055
0,053	0,052
0,050	0,051
0,053	0,054
0,054	0,054

Tableau 1.16. Comparaison de h_{1theo} (Equation 7); avec h_{1calc} (Equation 12)

$h_{1\text{ théo}}$	$h_{1\text{ calc}}$
0,0192	0,0193
0,0188	0,0189
0,0191	0,0191
0,0192	0,0184
0,0272	0,0278
0,0268	0,0274
0,0268	0,0270
0,0268	0,0260
0,0347	0,0360
0,0353	0,0349
0,0354	0,0352
0,0349	0,0343
0,0429	0,0445
0,0430	0,0440
0,0439	0,0440

Tableau 1.17. Comparaison de $h_{r\text{ mes}}$ avec $h_{r\text{ calc}}$ (Equation 13)

$h_{r\text{ mes}}$	$h_{r\text{ calc}}$
0,287	0,290
0,341	0,345
0,376	0,377
0,444	0,415
0,270	0,279
0,318	0,328
0,369	0,374
0,438	0,418
0,282	0,296
0,362	0,357
0,395	0,391
0,446	0,434
0,306	0,321
0,365	0,377
0,400	0,401

I.8.2. Perte de charge dans le ressaut hydraulique

La perte de charge dans le ressaut hydraulique sera calculée comme suit :

$$\Delta H_r = H_{1mes} - H_2 \quad (1.14)$$

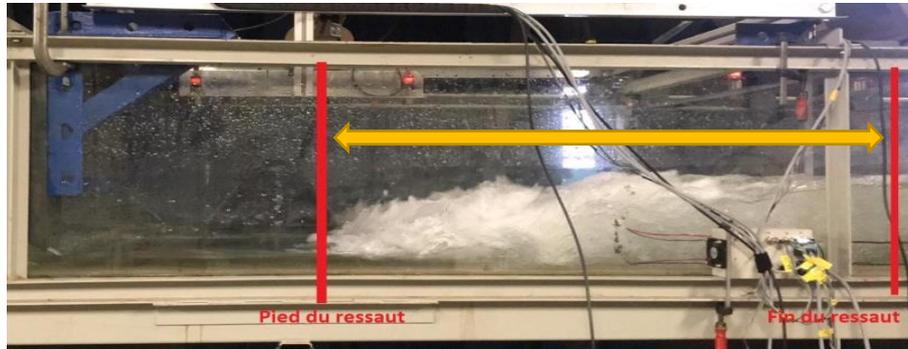


Figure 1.29. Perte de charge dans le ressaut hydraulique- canal rectangulaire en aval d'une vanne rectangulaire

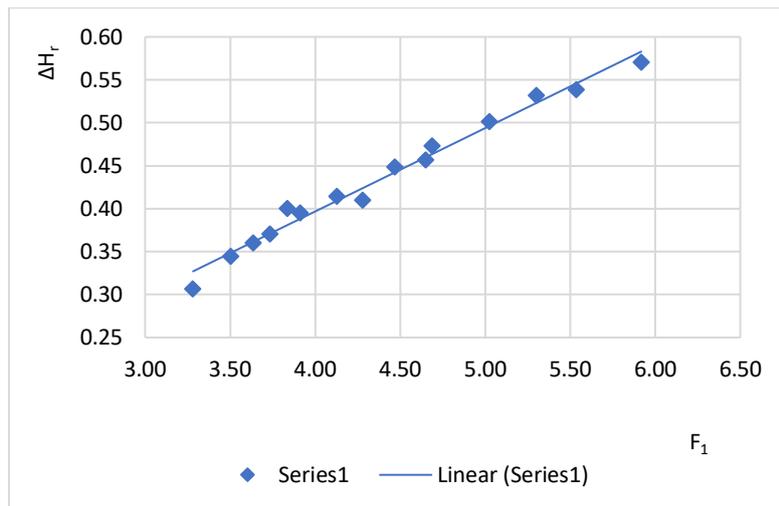


Figure 1.30. Perte de charge dans le ressaut hydraulique en fonction d'un nombre de Froude ; $\Delta H = H_{1mes} - H_2$

Selon le graphe (1.30), nous observons que la perte de charge dans le ressaut hydraulique augmente avec l'augmentation du nombre de Froude.

Tous les points de mesure expérimentaux qui ont été utilisés pour tracer la figure (1.30) sont présentés dans le tableau (1.17).

Tableau 1.18. Perte de charge dans le ressaut $\Delta H = H_{1mes} - H_2$

h_v (m)	Q (m ³ /s)	F_1	$\Delta H_{(ressaut)}$
0,02	0,0385	4,69	0,473
	0,042	5,30	0,532
	0,045	5,54	0,539
	0,0485	5,92	0,571
0,03	0,053	3,84	0,400
	0,058	4,28	0,410
	0,063	4,65	0,457
	0,068	5,03	0,502
0,04	0,07	3,50	0,345
	0,08	3,91	0,395
	0,085	4,13	0,415
	0,09	4,47	0,449
0,05	0,09	3,28	0,307
	0,1	3,64	0,360
	0,106	3,74	0,371
	0,11	3,78	0,473

I.9. Conclusion

Ce chapitre a présenté les travaux expérimentaux du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire en aval d'une vanne rectangulaire, pour but de valider la méthode de travail pour les conditions non homogènes de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal.

L'homogénéité de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal a été vérifiée en mesurant les hauteurs d'eau sur la largeur du canal. Dans laquelle, la hauteur d'eau au niveau des parois était légèrement supérieure à la hauteur moyenne et à la hauteur mesurée au centre transversal, cela a été expliqué par les fuites de l'eau à travers les parois. Aussi, l'étude de l'influence de la variation de la hauteur de l'eau sur la charge a montré qu'une petite variation de la hauteur mesurée en amont du ressaut peut entraîner une grande variation de charge.

La perte d'énergie en amont du ressaut hydraulique a été déterminée, cette perte d'énergie est très faible car elle n'est due qu'aux forces de frottement. Une relation générale pour la perte d'énergie en amont du ressaut a été développée, cette relation sera utilisée dans le calcul de la hauteur initiale du ressaut hydraulique dans les conditions non homogènes de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal.

Chapitre II :
Exploitation des résultats
(vannes dentées)

MODELE I (Canal rectangulaire)

Chapitre II : Exploitation des résultats (vannes dentées)

II.1. Introduction

Ce chapitre se focalise sur l'analyse d'un ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, en aval de quatre vannes dentées différentes. Il faut bien noter ici, que la distribution de la hauteur de l'eau est non homogène sur la largeur du canal.

Dans ce chapitre, nous cherchons à modifier la relation des hauteurs conjuguées (l'équation de Bélanger), pour qu'elle soit applicable dans ces conditions non homogènes.

II.2. Vérification de la hauteur finale h_2

Afin de vérifier que la hauteur finale h_2 est stable, nous devons faire une comparaison entre $h_{2\text{finale}}$ et $h_{2\text{moy}}$.

Les valeurs $h_{2\text{ finale}}$ représentent les hauteurs d'eau mesurées par la dernière sonde '4' à l'abscisse $x_{(s4)} = 0.205$ m (à la fin du ressaut). Les valeurs de $h_{2\text{ moy}}$ représentent la moyenne des hauteurs mesurées par les trois dernières sondes (à la fin du ressaut) aux abscisses $x_{(s2)}=0.145$ m, $x_{(s3)} =0.175$ m et $x_{(s4)} =0.205$ m.

Les figures (2.1), (2.2), (2.3) et (2.4) correspondent à la comparaison entre ($h_{2\text{ finale}}$) et ($h_{2\text{ moy}}$) pour les 4 vannes dentées (vanne dentée n°1, vanne dentée n°2, vanne dentée n°3 et vanne dentée n°4), respectivement.

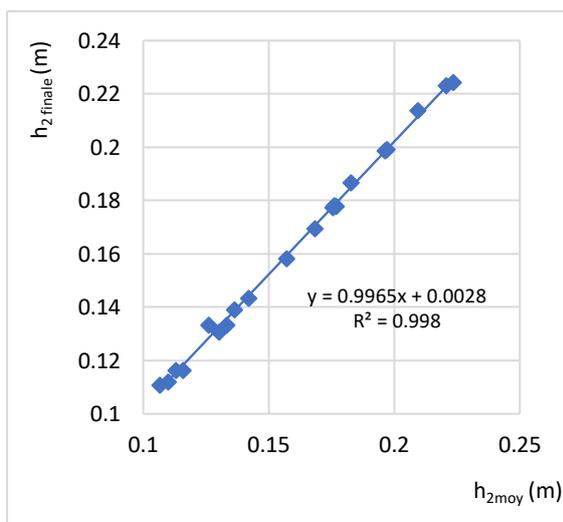


Figure 2.1. Comparaison entre $h_{2\text{ moy}}$ et $h_{2\text{ finale}}$; cas de la vanne dentée n°1 (0.02m, 2 dents)

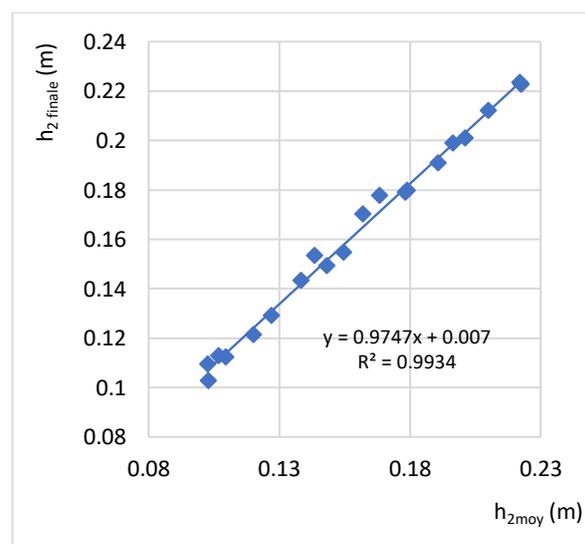


Figure 2.2. Comparaison entre $h_{2\text{ moy}}$ et $h_{2\text{ finale}}$; cas de la vanne dentée n°2 (0.02m, 4 dents)

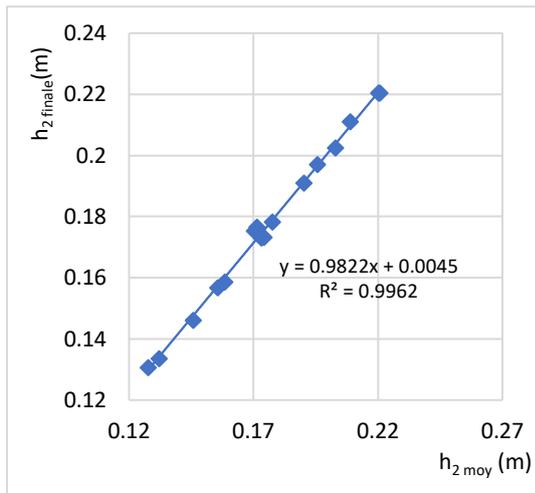


Figure 2.3. Comparaison entre $h_{2\text{ moy}}$ et $h_{2\text{ finale}}$; cas de la vanne dentée n°3 (0.04m, 2 dents)

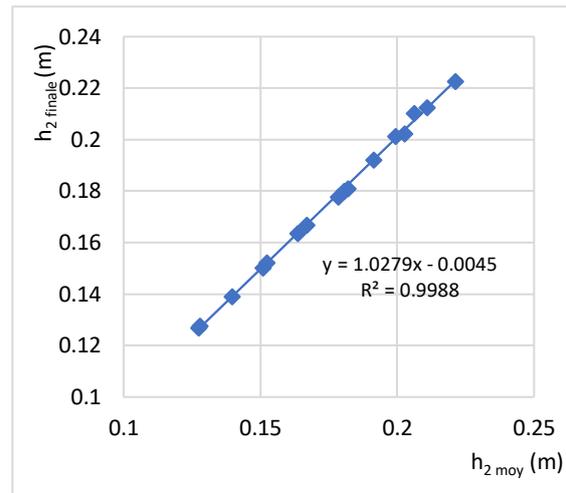


Figure 2.4. Comparaison entre $h_{2\text{ moy}}$ et $h_{2\text{ finale}}$; cas de la vanne dentée n°4 (0.04m, 4 dents)

Sur la base des quatre figures ci-dessus, nous remarquons que les nuages de points représentant la variation de la hauteur ($h_{2\text{ finale}}$) en fonction de ($h_{2\text{ moy}}$), pour toutes les vannes dentées, tournent autour de la première bissectrice, ce qui nous prouve que la hauteur finale h_2 est bien stable.

Les courbes linéaires représentant la variation de la hauteur ($h_{2\text{ finale}}$) en fonction de ($h_{2\text{ moy}}$) sont :

Vanne n°1 : $h_{2\text{ finale}} = 0.9965 h_{2\text{ moy}} + 0.0028$; $R^2 = 0.998$;

Vanne n°2 : $h_{2\text{ finale}} = 0.9747 h_{2\text{ moy}} + 0.007$; $R^2 = 0.9934$;

Vanne n°3 : $h_{2\text{ finale}} = 0.9822 h_{2\text{ moy}} + 0.0045$; $R^2 = 0.9962$;

Vanne n°4 : $h_{2\text{ finale}} = 1.0279 h_{2\text{ moy}} - 0.0045$; $R^2 = 0.9988$.

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage des graphes (2.1) et (2.2) sont présentés dans le tableau (2.1).

Tableau 2.1. $h_{2\text{moy}}$ et $h_{2\text{finale}}$ pour les vannes dentées 1 et 2

h_v (hauteur entre la dent et le fond du canal) (m)	Q (m ³ /s)	Vanne dentée n° 1		Vanne dentée n° 2	
		$h_{2\text{finale}}$ (m)	$h_{2\text{moy}}$ (m)	$h_{2\text{finale}}$ (m)	$h_{2\text{moy}}$ (m)
0,01	0,0385	0,111	0,106	0,110	0,103
	0,0385	0,112	0,110	0,113	0,107
	0,042	0,116	0,116	0,112	0,110
	0,045	0,131	0,130	0,129	0,127
	0,0485	0,133	0,133	0,143	0,138
	0,0485	0,133	0,126	0,149	0,148
0,02	0,053	0,116	0,113	0,103	0,103
	0,058	0,143	0,142	0,121	0,120
	0,063	0,158	0,157	0,154	0,144
	0,068	0,169	0,168	0,170	0,162
0,03	0,07	0,139	0,136	0,155	0,155
	0,08	0,178	0,176	0,178	0,168
	0,085	0,187	0,183	0,191	0,191
	0,09	0,199	0,197	0,199	0,196
0,04	0,09	0,177	0,175	0,180	0,179
	0,09	0,178	0,177	0,179	0,178
	0,1	0,199	0,196	0,201	0,201
	0,106	0,214	0,209	0,212	0,210
	0,11	0,223	0,221	0,223	0,223
	0,11	0,224	0,224	0,224	0,222

L'ensemble des points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage des graphes (2.3) et (2.4) sont présentés dans le tableau (2.2) .

Tableau 2.2. $h_{2\text{ moy}}$ et $h_{2\text{ finale}}$ pour les vannes dentées 3 et 4

h_v (hauteur entre la dent et le fond du canal) (m)	Q (m^3/s)	Vanne dentée n°3		Vanne dentée n°4	
		$h_{2\text{ finale}}$ (m)	$h_{2\text{ moy}}$ (m)	$h_{2\text{ finale}}$ (m)	$h_{2\text{ moy}}$ (m)
0,01	0,053	0,1336	0,1321	0,1269	0,1274
	0,053	0,1308	0,1276	0,1276	0,1279
	0,058	0,1461	0,1457	0,1390	0,1395
	0,063	0,1588	0,1583	0,1523	0,1523
	0,068	0,1734	0,1741	0,1669	0,1669
	0,068	0,1732	0,1732	0,1635	0,1635
0,02	0,07	0,1569	0,1556	0,1503	0,1508
	0,08	0,1782	0,1776	0,1777	0,1784
	0,085	0,1910	0,1902	0,1921	0,1914
	0,09	0,2026	0,2028	0,2013	0,1993
0,03	0,09	0,1755	0,1704	0,1800	0,1805
	0,09	0,1766	0,1713	0,1809	0,1819
	0,1	0,1971	0,1957	0,2024	0,2025
	0,106	0,2110	0,2088	0,2126	0,2109
	0,11	0,2204	0,2203	0,2226	0,2211
	0,11	0,2204	0,2206	0,2103	0,2062

II.3. Détermination de la hauteur initiale h_1

A cause de la distribution non homogène de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal, causée par les vannes dentées (figure 2.5), la mesure de la hauteur au début du ressaut h_1 sera impossible. Pour cela, les hauteurs initiales du ressaut (h_{1calc}) seront calculées en fonction de $\Delta H_{(amont\ du\ ressaut)\ calc}$, comme suit :

$$h_{1calc} = H_{r\ mes} + \Delta H_{(amont\ du\ ressaut)\ calc} - \frac{Q^2}{b h_{1calc}^2 2g} \quad (Equation\ 2.1)$$

Avec: $\Delta H_{(amont\ du\ ressaut)\ calc}$ calculée par l' (Equation 2.1)



Figure 2.5. Vue transversale d'un ressaut hydraulique formé à l'aval d'une vanne dentée n°2 (0,02m, 4 dents) ; ($Q = 0.045\text{m}^3/\text{s}$; $F_1 = 4.66$)

II.3.1. Modification de la relation Bélanger

Afin de modifier l'équation de Bélanger pour qu'elle soit applicable dans les conditions d'écoulement non homogènes, nous avons tracé un graphique de h_{1calc} (Equation 2.1) en fonction de h_{1theo} (équation de Bélanger).

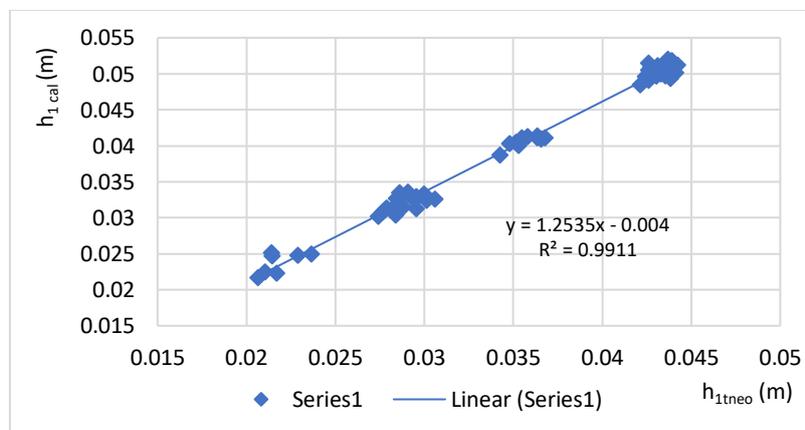


Figure 2.6. Modification de l'équation de Bélanger ; $h_{1calc} = f\left(\frac{2h_2}{\sqrt{1+8F_{1theo}^2} - 1}\right)$

Sur la base de la figure (2.6), nous trouvons :

$$h_{1 \text{ corrigé}} = 1.2535 \frac{2h_2}{\sqrt{1+8F_{1 \text{ corrigé}}^2} - 1} - 0,004 \quad (\text{Equation 2.3})$$

$$\text{Avec: } F_{1 \text{ corrigé}} = \frac{V_{1 \text{ corrigé}}}{\sqrt{gh_{1 \text{ corrigé}}}}$$

Ce qui nous donne :

$$Y_{\text{corrigé}} = 0,4 \left(\sqrt{1 + 8F_{1 \text{ corrigé}}^2} - 1 \right) \left(1 + \frac{0,004}{h_{1 \text{ corrigé}}} \right) \quad (\text{Equation 2.4})$$

Pour but de vérifier la validité de la correction de l'équation de Bélanger dans les conditions non homogènes de la distribution du débit sur la largeur du canal, nous devons comparer les hauteurs mesurées du réservoir $h_{r \text{ mes}}$ avec $h_{r \text{ calc}}$ calculées à partir de l'équation de Bélanger corrigée, comme suit :

$$h_{r \text{ calc}} = H_{1 \text{ corrigé}} + \Delta H_{(\text{amont du ressaut}) \text{ calc}} - \frac{Q^2}{b h_{r \text{ calc}}^2 2g} \quad (\text{Equation 2.5})$$

$$\text{Avec : } H_{1 \text{ corrigé}} = h_{1 \text{ corrigé}} + \frac{Q^2}{b^2 h_{1 \text{ corrigé}}^2 2g}$$

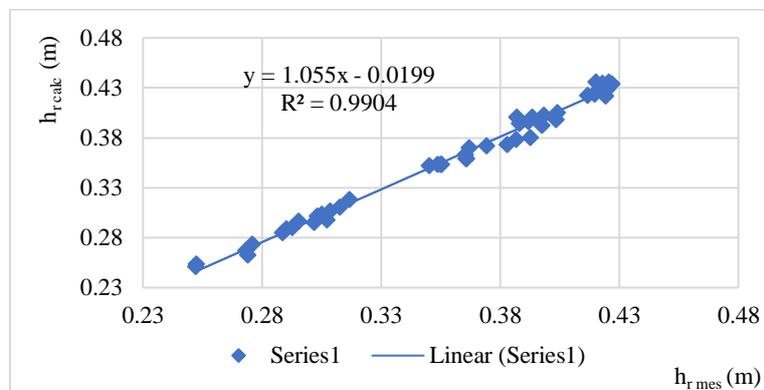


Figure 2.7. Comparaison entre $h_{r \text{ mes}}$ et $h_{r \text{ calc}}$ – toutes les vannes dentées

D'après le graphique (2.7), nous constatons que $h_{r \text{ calc}} = 1.055 h_{r \text{ mes}} - 0.02$; $R^2 = 0.99$. L'erreur entre $h_{r \text{ calc}}$ et $h_{r \text{ mes}}$ est de 1,44 %. Ceci confirme la validité de la relation de Bélanger corrigée.

Les données de la (figure 2.6) sont présentées dans le tableau (2.3) et les données (figure 2.7) sont présentées dans le tableau (2.4).

Tableau 2.3. Modification de l'équation de Bélanger ; h_{1calc} ; h_{1theo} ; toutes les vannes dentées

Vannes dentées	h_{1theo}	h_{1calc}	Vannes dentées	h_{1theo}	h_{1calc}
Vanne dentée 1	0,0214	0,0247	Vanne dentée 2	0,0206	0,0216
	0,0229	0,0248		0,0217	0,0222
	0,0214	0,0251		0,0210	0,0224
	0,0236	0,0249		0,0288	0,0315
	0,0286	0,0334		0,0353	0,0403
	0,0284	0,0326		0,0364	0,0411
	0,0291	0,0335		0,0430	0,0497
	0,0365	0,0409		0,0435	0,0505
	0,0364	0,0413		0,0431	0,0511
	0,0435	0,0497		0,0426	0,0514
	0,0429	0,0498		-	-
	0,0427	0,0508		-	-
	0,0426	0,0505		-	-
	Vanne dentée 3	0,0274		0,0301	Vanne dentée 4
0,0284		0,0303	0,0293	0,0328	
0,0277		0,0308	0,0300	0,0333	
0,0281		0,0310	0,0301	0,0323	
0,0279		0,0313	0,0296	0,0327	
0,0278		0,0311	0,0306	0,0325	
0,0343		0,0387	0,0368	0,0411	
0,0353		0,0400	0,0354	0,0406	
0,0351		0,0404	0,0348	0,0403	
0,0355		0,0411	0,0358	0,0412	
0,0441		0,0501	0,0426	0,0491	
0,0438		0,0493	0,0421	0,0484	
0,0442		0,0512	0,0424	0,0495	
0,0439		0,0518	0,0435	0,0499	
0,0436		0,0512	0,0432	0,0509	
0,0437		0,0520	-	-	

Tableau 2.4. $h_{r\text{ mes}}$ et $h_{r\text{ calc}}$ – toutes les vannes dentées

Vannes dentées	$h_{r\text{ mes}}$ (m)	$h_{r\text{ calc}}$ (m)	Erreur (%)	Vannes dentées	$h_{r\text{ mes}}$ (m)	$h_{r\text{ calc}}$ (m)	Erreur (%)
Vanne dentée 1	0,295	0,296	0,286	Vanne dentée 2	0,288	0,285	1,310
	0,383	0,373	2,648		0,374	0,372	0,655
	0,354	0,353	0,178		0,392	0,380	3,158
	0,387	0,378	2,284		0,305	0,303	0,643
	0,424	0,421	0,639		0,366	0,359	1,800
	0,303	0,301	0,564		0,398	0,402	1,005
	0,366	0,359	1,835		0,420	0,436	3,698
	0,404	0,405	0,251		-	-	-
	0,423	0,435	2,792		-	-	-
	0,426	0,436	2,370		-	-	-
Vanne dentée 3	0,276	0,274	0,807	Vanne dentée 4	0,252	0,251	0,447
	0,274	0,262	4,301		0,252	0,253	0,351
	0,317	0,318	0,439		0,293	0,290	0,938
	0,365	0,362	0,779		0,397	0,392	1,266
	0,417	0,422	1,313		0,273	0,267	2,348
	0,420	0,424	0,959		0,350	0,352	0,530
	0,290	0,289	0,594		0,393	0,401	1,862
	0,355	0,353	0,601		0,425	0,429	0,876
	0,392	0,396	0,999		0,309	0,307	0,649
	0,427	0,434	1,643		0,313	0,310	0,759
	0,302	0,295	2,206		0,367	0,370	0,779
	0,307	0,297	3,252		0,403	0,398	1,326
	0,355	0,353	0,551		0,422	0,429	1,751
	0,388	0,394	1,562		-	-	-
0,420	0,424	1,098	-	-	-		

II.4. Conclusion

Dans ce chapitre, le ressaut hydraulique a été formé en aval de quatre vannes dentées différentes. La mesure de la hauteur initiale du ressaut était impossible à cause la non homogénéité de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal. Une hypothèse ont été donc proposée afin de calculer la hauteur initiale du ressaut hydraulique.

Dans ce cas, l'application de la relation de Bélanger est impossible. Pour cela, nous avons modifié la relation de Bélanger, afin qu'elle puisse être appliquée dans les conditions non homogènes de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal, et par conséquent, nous pouvons calculer la hauteur initiale du ressaut. La relation de Bélanger modifiée a été bien vérifiée, en comparant la hauteur de réservoir mesurée avec celle calculée à partir de la nouvelle relation.

MODELE II
(Canal trapézoidal
asymétrique)

Chapitre III :
Exploitation des résultats
(Canal trapézoïdal
asymétrique)

MODELE II (Canal trapézoïdal asymétrique)**Chapitre III : Exploitation des résultats (Canal trapézoïdal asymétrique)****III.1. Introduction**

Dans ce chapitre, les résultats récoltés au cours du processus expérimental seront présentés, où nous allons étudier le phénomène du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique à trois vanes différentes : deux vanes parallélogrammes et une vanne triangulaire. Une gamme du nombre de Froude incident a été ainsi obtenue, correspondant à : $1.40 < F_1 < 6.11$

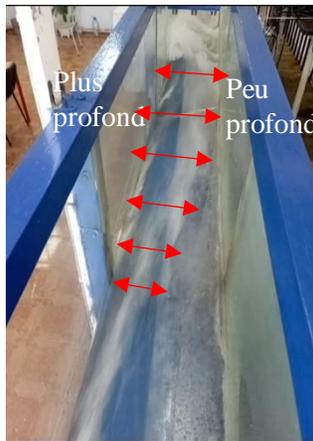
Nous allons étudier donc les propriétés du ressaut hydraulique, ils s'agissent du rapport des hauteurs conjuguées Y_{moy} , ce rapport sera calculé à partir de la moyenne de h_1 et h_2 mesurées sur les trois côtés de la largeur du canal (peu profond, centre et plus profond), et les longueurs caractéristiques $\left(\frac{L_r}{h_2 - h_1}\right)_{\text{peu profond}}$; $\frac{L_r \text{ peu profond}}{h_2 \text{ moy}}$ et $\frac{L_r \text{ plus profond}}{h_2 \text{ moy}}$ en fonction du nombre de Froude incident F_1 .

Les propriétés du ressaut dans le canal trapézoïdal asymétrique seront comparées avec celles dans d'autres canaux (rectangulaire, triangulaire et trapézoïdal symétrique).

Une relation sera développée afin de calculer le rendement (η) du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique.

III.2. Description du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique

L'écoulement de l'eau dans un ressaut hydraulique formé en canal trapézoïdal asymétrique varie sur les trois axes, il est considéré donc comme un phénomène 3D. Ce type de ressaut est considérablement différent de celui formé dans un canal trapézoïdal symétrique qui est caractérisé selon (Hager. 1989), par l'existence du rouleau de fond. Les caractéristiques d'écoulement dans un ressaut trapézoïdal asymétrique sont montrées par le schéma ci-dessous (figure 3.1).



(a)



(b)

Figure 3.1. Vue transversale d'un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique a) écoulement à proximité de la vanne triangulaire ; b) ressaut hydraulique ; vanne triangulaire ; $F_1=1,90$; c) ressaut hydraulique ; vanne à parallélogramme ; $F_1=3,82$

Comme montré dans la figure (3.1.a), la variation de largeur de l'écoulement supercritique, qui se trouve en amont, près de l'injection, n'utilise pas toute la largeur du canal, contrairement à la zone d'approche du ressaut hydraulique. Cependant, pour chaque essai, le début du ressaut hydraulique était normal à l'axe du canal et occupait toute la largeur du canal (Figure 3.1.b).

Le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique est caractérisé par deux rouleaux, l'un sur le côté peu profond et l'autre sur le côté plus profond. Les longueurs des rouleaux ne sont pas similaires, où l'on constate que la longueur du rouleau du côté peu profond est plus longue que celle du côté plus profond.

III.3. Analyses des résultats expérimentaux

III.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Kiri et al (2020) ont suggéré que le plan d'eau est horizontal sur la section transversale, en amont et en aval du ressaut. Le rapport des hauteurs conjuguées Y représente le rapport des valeurs moyennes h_2 et h_1 mesurées sur le côté peu profond, le centre du canal et le côté profond.

(Figure 3.2) illustre la variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 pour les valeurs dérivées de l'équation de Bélanger (canal rectangulaire -

Eq. (3.1)), de l'Eq. (3.2) (canal triangulaire symétrique avec un angle de 90°), l'étude expérimentale dans un canal rectangulaire réalisée par (Chachereau et Chanson, 2011), l'étude expérimentale dans un canal rectangulaire avec pente réalisée par (Sultana, 2011) et de la présente étude (canal trapézoïdal asymétrique avec vannes en amont triangulaires et parallélogrammes).

$$Y = h_2/h_1 = 0.5 \left[\sqrt{1+8F_1^2} - 1 \right] \quad (3.1)$$

$$Y = \left(\frac{3}{2} F_1^2 - 1 \right)^{1/3}; 2 < F_1 < 13.5 \quad (3.2)$$

D'après la (figure 3.2), pour le même nombre de Froude, l'augmentation de Y pour les valeurs mesurées dans le canal trapézoïdal asymétrique avec une vanne triangulaire est plus importante que dans le canal rectangulaire. Cependant, l'inverse est vrai pour Y dans un canal trapézoïdal asymétrique avec une vanne à parallélogramme. En outre, les valeurs de Y pour le canal triangulaire se situent entre celles des deux vannes à parallélogramme dans le canal trapézoïdal asymétrique.

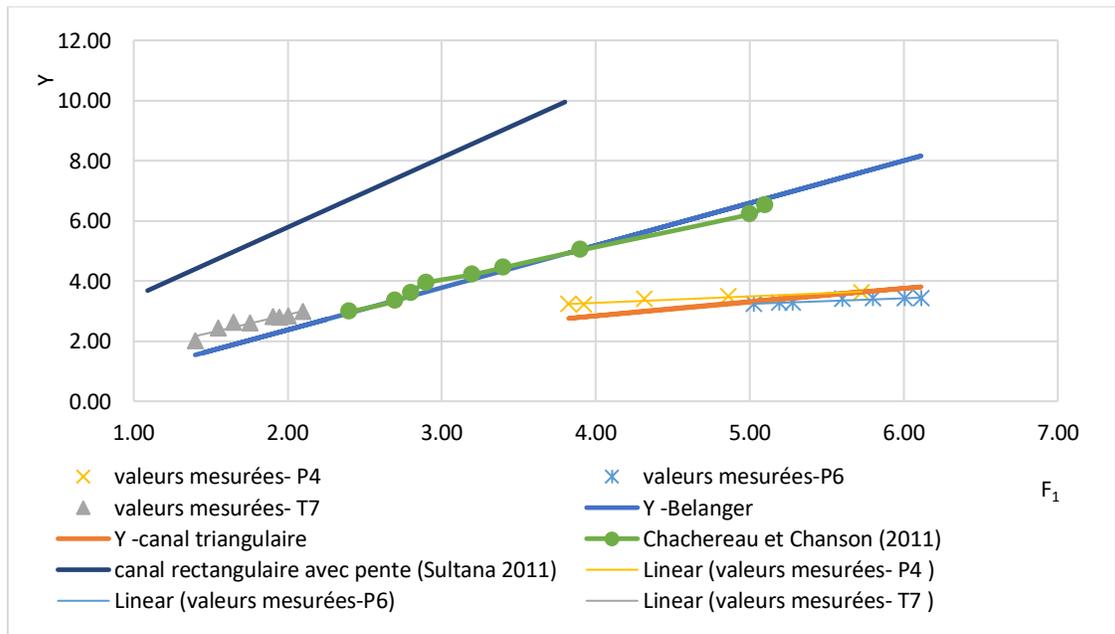


Figure 3.2. Rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour les cas étudiés ; canal rectangulaire ; et canal triangulaire. ($\alpha=90^\circ$)

III.3.2. Etude des longueurs caractéristiques dans un canal trapézoïdal asymétrique

(Figure 3.3) représente la variation de longueur caractéristique $\frac{L_r}{h_2 - h_1}$ en fonction du nombre de Froude incident F_1 pour les différents cas d'étude, y compris un canal rectangulaire et les variations de $(\frac{L_r}{h_2 - h_1})_{\text{peu profond}}$, $(\frac{L_r}{h_2 - h_1})_{\text{plus profond}}$ mesurée dans un canal trapézoïdal asymétrique en aval des vannes parallélogrammes et triangulaire.

(Mavis et Luksch, 1936) a constaté que la longueur caractéristique $\frac{L_r}{h_2 - h_1}$ dans un canal rectangulaire horizontal est égal à 5, (Eq.3.3) :

$$\frac{L_r}{h_2 - h_1} = 5 \tag{3.3}$$

(M. Bakhmeteff et M. Matzke, 1936) ont obtenu les valeurs maximales de $(\frac{L_r}{h_2 - h_1})$ dans un canal rectangulaire d'environ 8, (Eq. 3.4) :

$$(\frac{L_r}{h_2 - h_1})_{\text{max}} \approx 8; 1.94 < F_1 < 8.7 \tag{3.4}$$

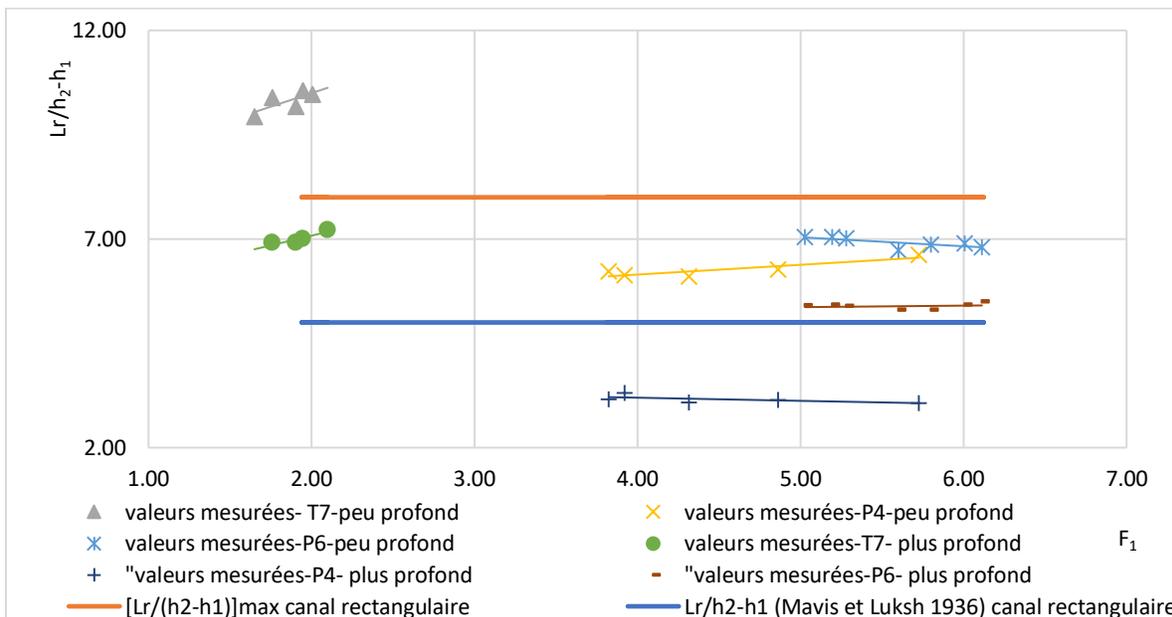


Figure 3.3. Longueurs relatives $\frac{L_r}{h_2 - h_1}$, $(\frac{L_r}{h_2 - h_1})_{\text{peu prof}}$ du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour tous les cas étudiés

(Figure 3.4) illustre la variation de la longueur caractéristique $\frac{L_r}{h_2}$ en fonction du nombre incident de F_1 pour les différents cas d'étude, y compris le canal rectangulaire et les valeurs mesurées de $\frac{L_r \text{ peu profond}}{h_2 \text{ moy}}$ et $\frac{L_r \text{ plus profond}}{h_2 \text{ moy}}$ dans le canal trapézoïdal asymétrique en aval des vannes parallélogrammes et triangulaire.

Selon (Afzal et Bushra, 2002), la longueur du rouleau $\frac{L_r}{h_2}$ est en fonction de $\frac{h_1}{h_2}$ dans un canal rectangulaire (Eq. 3.5) :

$$\frac{L_r}{h_2} = 5.2 \left(1 - \frac{h_1}{h_2}\right); \quad F_1 \geq 4 \tag{3.5}$$

Selon (Hager, 1992), dans un canal rectangulaire horizontal est égal à 5, Eq.(3.6)

$$\frac{L_r}{h_2} = 5 \tag{3.6}$$

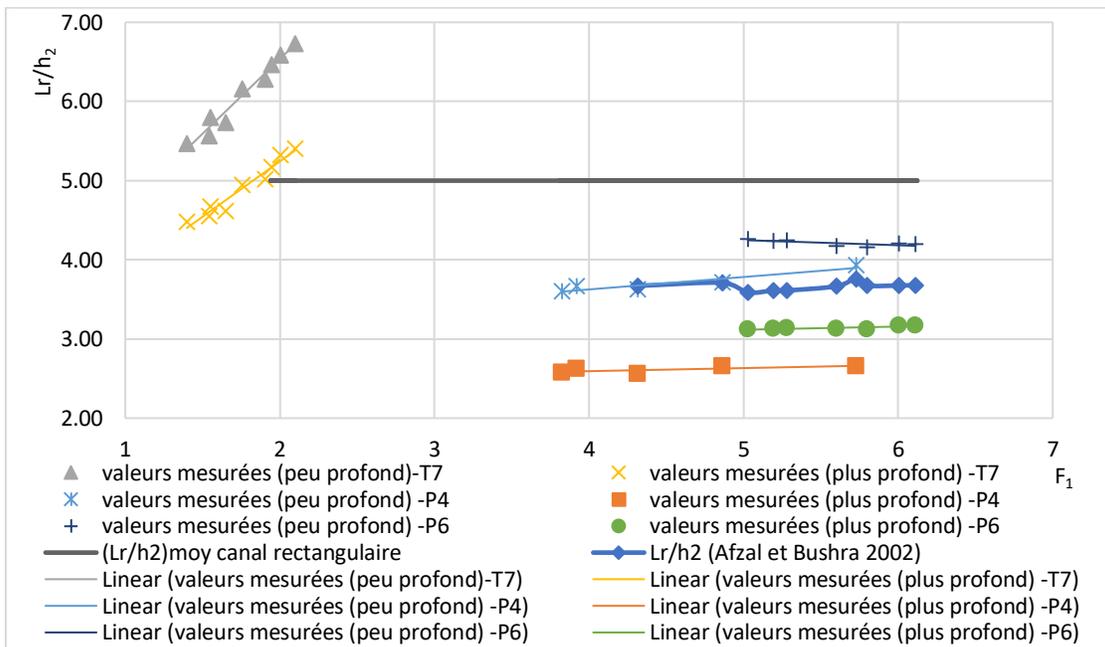


Figure 3.4. Longueurs relatives $\frac{L_r}{h_2}$, $\frac{L_r \text{ peu prof}}{h_2 \text{ moy}}$ et $\frac{L_r \text{ plus prof}}{h_2 \text{ moy}}$ du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour tous les cas étudiés

Sur la base de (figure 3.3) et (figure 3.4), les rapports $[(\frac{L_r}{h_2-h_1})_{\text{peu profond}}]_{\text{mes}} < 8$ et $L_r/h_2_{\text{peu profond}} < 5$, dans le cas des vannes parallélogrammes dans un canal trapézoïdal asymétrique. Elle se situe donc dans la fourchette proposée par (Diaz, 1954). En revanche, dans le cas de la vanne triangulaire dans un canal trapézoïdal asymétrique, les valeurs mesurées sont les suivantes :

$[(\frac{L_r}{h_2-h_1})_{\text{peu profond}}]_{\text{mes}} > 8$ and L_r/h_2 peu profond > 5 , qui sont plus élevés que ceux proposés par (Diaz, 1954).

De plus, selon l'étude du ressaut hydraulique donnée par (Diaz, 1954), le ressaut hydraulique est complètement formé lorsque $[(\frac{L_r}{h_2-h_1})_{\text{peu profond}}]_{\text{mes}} > 8$ and $L_r/h_2 > 5$. Ceci est valable pour les ressauts hydrauliques formés dans un canal trapézoïdal asymétrique en aval de vannes parallélogrammes, plutôt qu'en aval de vanne triangulaire. Ceci indique que la forme de la vanne en amont (triangulaire) modifie les caractéristiques du ressaut hydraulique.

Le tableau (3.1) présente tous les points de mesure expérimentaux utilisés pour tracer les figures (3.2, 3.3 et 3.4)

Tableau 3.1. Données expérimentales et théoriques pour différents paramètres

F ₁	Y _{exp}	Y Bélanger	Y triangulaire	Chachereau et Chanson(2011)		$(\frac{L_r}{h_2})$		$(\frac{L_r}{h_2-h_1})$	
				F ₁	Y	Peu profond	Plus profond	Peu profond	Plus profond
5.73	3.61	7.61	3.64	2.4	2.97	3.93	2.66	6.62	3.08
4.86	3.49	6.40	3.25	2.7	3.33	3.71	2.65	6.27	3.14
4.32	3.40	5.62	3.00	2.8	3.60	3.63	2.56	6.11	3.09
3.92	3.20	5.07	2.81	2.9	3.93	3.67	2.63	6.13	3.32
3.82	3.22	4.93	2.76	3.2	4.21	3.60	2.57	6.22	3.16
6.11	3.42	8.16	3.80	3.4	4.44	4.20	3.17	6.81	5.49
6.00	3.41	8.01	3.76	3.9	5.02	4.21	3.17	6.91	5.43
5.80	3.41	7.71	3.67	5	6.22	4.16	3.13	6.87	5.30
5.60	3.39	7.44	3.58	5.1	6.51	4.18	3.13	6.73	5.30
5.28	3.28	6.98	3.44	Sultana (2011)		4.24	3.14	7.01	5.38
5.19	3.27	6.86	3.40	1.09	3.68	4.24	3.13	7.05	5.41
5.03	3.23	6.63	3.33	3.8	9.95	4.26	3.12	7.05	5.40
2.10	2.98	2.51	-	-	-	6.73	5.41	-	7.22
2.01	2.83	2.38	-	-	-	6.58	5.33	10.46	-
1.95	2.79	2.30	-	-	-	6.46	5.17	10.56	7.01
1.90	2.80	2.24	-	-	-	6.28	5.02	10.18	6.91
1.76	2.60	2.04	-	-	-	6.16	4.95	10.39	6.91
1.65	2.62	1.89	-	-	-	5.73	4.62	9.93	-
1.55	2.43	1.75	-	-	-	5.80	4.67	-	-
1.45	2.25	1.61	-	-	-	-	-	-	-
2.25	2.23	2.72	-	-	-	-	-	-	-
1.54	2.04	1.73	-	-	-	5.57	4.55	-	6.81
1.40	2.00	1.54	-	-	-	5.47	4.48	-	-

III.3.3. Rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique

Le rendement du ressaut hydraulique pour un canal trapézoïdal asymétrique est donné par

$\eta = \Delta H / H_1$, lorsque :

$$H_1 = h_{1 \text{ moy}} + \frac{\left(\frac{Q}{A_1}\right)^2}{2g} \quad (3.7)$$

Avec $A_1 = \frac{1}{2} \times \frac{b}{D} \times h_{1 \text{ peu profond}}^2$ quand : $h_{1 \text{ plus profond}} < D$. And: $A_1 = b \times \left(h_{1 \text{ moy}} - \frac{D}{2}\right)$ quand : $h_{1 \text{ plus profond}} > D$

$$\text{Et } H_2 = h_{2 \text{ moy}} + \frac{\left(\frac{Q}{A_2}\right)^2}{2g} \quad (3.8)$$

Avec: $h_{2 \text{ plus profond}} > D : A_2 = b \times \left(h_{2 \text{ moy}} - \frac{D}{2}\right)$

En utilisant la relation générale du est donnée rendement donnée par (Hager and Sinniger. 1989):

$$\eta = \frac{1 - Y + \frac{F_1^2}{2} \left(1 - \frac{A_1^2}{A_2^2}\right)}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (3.9)$$

le rendement (équation 3.10) s'écrit pour un canal trapézoïdal asymétrique comme suit:

$$\eta = \frac{1 - Y_{\text{moy}} + \frac{F_1^2}{2} \left(1 - \frac{1}{4D^2} \frac{h_{1 \text{ plus profond}}^4}{(h_{2 \text{ moy}} - \frac{D}{2})^2}\right)}{1 + \frac{F_1^2}{2}}; \text{ quand : } h_{1 \text{ plus profond}} < D \text{ et } h_{2 \text{ plus profond}} > D \quad (3.10)$$

$$\eta = \frac{1 - Y_{\text{moy}} + \frac{F_1^2}{2} \left(1 - \frac{\left(h_{1 \text{ moy}} - \frac{D}{2}\right)^2}{\left(h_{2 \text{ moy}} - \frac{D}{2}\right)^2}\right)}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad ; \text{ quand : } h_{1 \text{ plus profond}} > D \text{ et } h_{2 \text{ plus profond}} > D \quad (3.11)$$

Quand : $D=0$, c'est le cas d'un canal rectangulaire :

$$\eta = \frac{1 - Y + \frac{F_1^2}{2} \left(1 - \frac{1}{Y^2}\right)}{1 + \frac{F_1^2}{2}} = I - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2}}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (3.12)$$

(Hager et Sinniger, 1985) a donné la même relation pour un canal rectangulaire Eq.(3.12), ce qui vérifie les relations du canal trapézoïdal asymétrique (Equations 3.10 et 3.11). Le rendement a été proposée par (Wanoschek and Hager. 1989) .

En comparant les (équations 3.10 et 3.11) avec les valeurs trouvées par $\eta = \Delta H / H_1$, nous constatons que les (équations 3.10 et 3.11) n'ont pas été vérifiées pour notre type de canal, car les (équations 3.10 et 3.11) n'ont pas été vérifiées pour notre type de canal $3.82 < F_1 < 6.11$, ce qui est dû à la non-horizontalité de la surface libre en amont du ressaut hydraulique. Il est donc nécessaire de vérifier ces relations pour une surface libre horizontale en amont.

Pour cette raison, nous proposons une relation basée sur le graphique $\eta = f(F_1)$ (Equation 3.9), avec : $\eta = \Delta H / H_1$. Cette relation est valable lorsque la surface libre en amont du ressaut hydraulique n'est pas horizontale et pour $3.82 < F_1 < 6.11$.

$$\eta = -0,0309F_1^2 + 0,4496F_1 - 0,9344; R^2 = 0,9826 \quad (3.13)$$

Pour un ressaut hydraulique dans un canal triangulaire avec un angle d'ouverture de 90° , avec un angle d'inclinaison des parois ($m=0.03$), $b=0.5m$ and $3.61 < F_1 < 12.98$, nous avons utilisé les résultats de (Debabeche et al., 2009), le rendement est calculé par la relation suivante :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{4Y^4 \cos \alpha}}{1 + \frac{F_1^2}{4 \cos \alpha}} \quad (3.14)$$

Pour un canal trapézoïdal symétrique avec un angle d'inclinaison des parois ($m=1,62$), $b=0,2$ et $2.40 < F_1 < 12.80$, en utilisant les résultats de (Wanoschek et Hager, 1989), l'efficacité est calculée par la relation suivante :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \left[\frac{(1+M)^3}{(1+2M)(1+MY)^2} \right]}{1 + \frac{F_1^2}{2} \frac{(1+M)}{(1+2M)}} \quad ; \text{ avec: } M = \frac{mh_{1\text{ave}}}{b} \quad (3.15)$$

(Figure 3.5) montre les valeurs de rendement η dans les canaux triangulaires, trapézoïdaux symétriques et trapézoïdaux asymétriques.

Selon cette figure, pour la gamme $3.82 < F_1 < 4.86$, le rendement du ressaut hydraulique se situe entre celle des canaux triangulaires et celle des canaux trapézoïdaux symétriques. Cependant, pour la plage $5.02 < F_1 < 6.11$, le rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique est supérieur à celle de ses homologues dans un canal trapézoïdal triangulaire et symétrique.

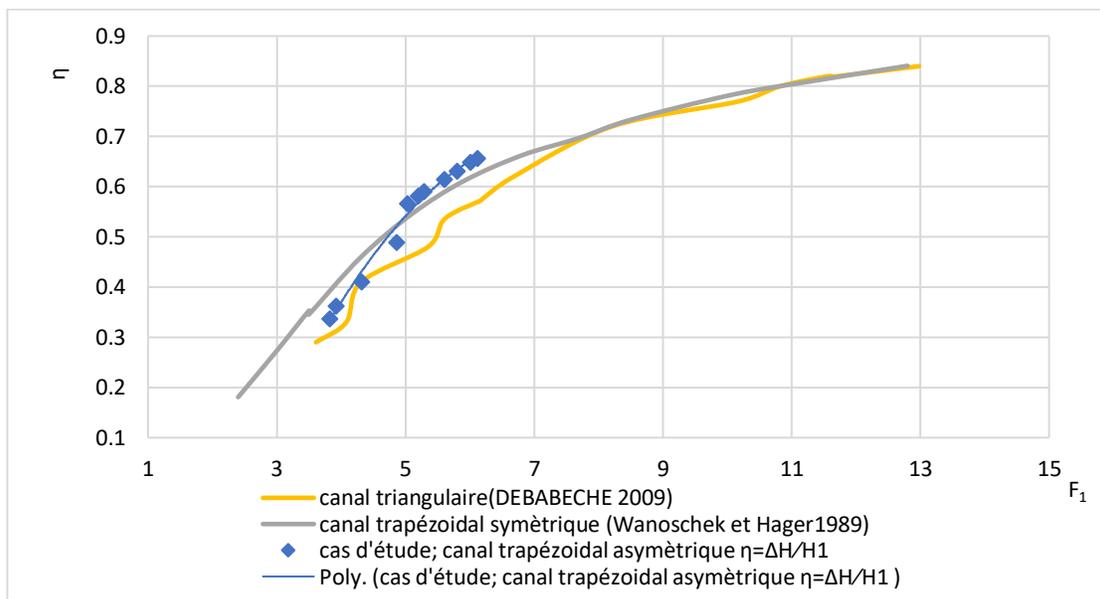


Figure 3.5. Rendement η en fonction du F_1 pour les canaux (rectangulaire, trapézoïdal symétrique et trapézoïdal asymétrique)

Le tableau (3.4) représente le rendement η du ressaut hydraulique pour les canaux de forme : rectangulaire, trapézoïdal symétrique et trapézoïdal asymétrique).

Tableau 3.2. Rendement η du ressaut hydraulique de notre cas d'étude

Canal trapézoïdal asymétrique - Vannes	Canal trapézoïdal asymétrique			Canal triangulaire		Canal trapézoïdal symétrique	
	N° d'essai	F ₁	η	F ₁	η	F ₁	η
Vanne parallélogramme h _v =0.04m	P4-1	5.73	-	3,61	0,29	12,80	0,841
	P4-2	4.86	0,49	4,08	0,33	11,40	0,812
	P4-3	4.32	0,41	4,31	0,41	10,10	0,784
	P4-4	3.92	0,36	5,35	0,48	8,50	0,733
	P4-5	3.82	0,34	5,57	0,53	7,70	0,697
Vanne parallélogramme h _v =0.06m	P6-1	6.11	0,66	5,78	0,55	6,80	0,662
	P6-2	6.00	0,65	6,13	0,57	5,90	0,611
	P6-3	5.80	0,63	6,14	0,57	5,10	0,546
	P6-4	5.60	0,61	6,68	0,62	4,30	0,459
	P6-5	5.28	0,59	8,21	0,72	3,50	0,345
	P6-6	5.19	0,58	10,18	0,77	3,50	0,353
	P6-7	5.03	0,57	10,82	0,8	3,00	0,273
Vanne triangulaire h _v =0.07m	T7-1	2.10	-	11,56	0,82	2,40	0,181
	T7-2	2.01	-	11,71	0,82	-	-
	T7-3	1.95	-	12,98	0,84	-	-
	T7-4	1.90	-	-	-	-	-
	T7-5	1.76	-	-	-	-	-
	T7-6	1.65	-	-	-	-	-
	T7-7	1.55	-	-	-	-	-
	T7-8	1.45	-	-	-	-	-
	T7-9	2.25	-	-	-	-	-
	T7-10	1.54	-	-	-	-	-
	T7-11	1.40	-	-	-	-	-

Le tableau (3.3) représente le rendement η du ressaut hydraulique pour l'étude de (Debabeche et al., 2009) et l'étude (Wanoschek et Hager, 1989).

Tableau 3.3. Rendement η du ressaut hydraulique de l'étude de (Debabeche et al., 2009) et l'étude (Wanoschek et Hager, 1989).

Canal triangulaire (Debabeche et al., 2009)		Canal trapézoïdal symétrique (Wanoschek et Hager, 1989)
$\eta(\%)$	F_1	$\eta(\%)$
0,29	12,80	0,841
0,33	11,40	0,812
0,41	10,10	0,784
0,48	8,50	0,733
0,53	7,70	0,697
0,55	6,80	0,662
0,57	5,90	0,611
0,57	5,10	0,546
0,62	4,30	0,459
0,72	3,50	0,345
0,77	3,50	0,353
0,8	3,00	0,273
0,82	2,40	0,181
0,82	-	-
0,84	-	-

III.4. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude expérimentale des propriétés du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique à deux vannes parallélogrammes et une vanne triangulaire.

Cette étude a analysé les propriétés d'un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique, notamment le rapport des hauteurs conjuguées, les longueurs caractéristiques et le rendement. L'étude de ces paramètres vise à dimensionner les structures hydrauliques et à renforcer les zones soumises à de grandes forces d'érosion.

Pour le rapport des hauteurs conjuguées et les longueurs caractéristiques, les résultats expérimentaux ont montré que la variation de Y , L_r/h_2 and L_r/h_2-h_1 , augmentent avec l'augmentation du nombre de Froude.

En outre, le canal trapézoïdal asymétrique avec des vannes de forme parallélogramme réduit la hauteur et la longueur du ressaut hydraulique mieux que le canal rectangulaire, contrairement au canal trapézoïdal asymétrique avec une vanne triangulaire. Ainsi, le canal trapézoïdal asymétrique avec des vannes parallélogrammes réduit la hauteur du ressaut hydraulique comme le canal triangulaire.

En outre, les résultats ont mis en évidence de nouvelles informations sur le rendement d'un ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique, et une nouvelle relation a été développée pour calculer le rendement pour $3,82 < F_1 < 6,11$. Le rendement du ressaut dans cas d'étude a été comparé à d'autres types de canaux. Pour $3,82 < F_1 < 4,86$, le rendement du ressaut hydraulique est entre les canaux triangulaires et trapézoïdaux symétriques, et il est considéré comme plus efficace que le canal triangulaire et trapézoïdal symétrique pour $5,02 < F_1 < 6,11$.

Ces résultats ne sont valables que pour la pente transversale du fond et la largeur du canal utilisées dans cette étude.

Conclusion de la troisième partie

La troisième partie de ce travail présente les résultats et la discussion de notre étude expérimentale. Le ressaut hydraulique a été étudié dans deux modèles différents : le premier modèle s'agit d'un canal rectangulaire avec une vanne rectangulaire et 4 vannes dentées ; et le deuxième modèle s'agit d'un canal trapézoïdal asymétrique.

Cette partie a été divisée en trois chapitres :

Le premier chapitre a présenté les travaux expérimentaux effectués dans le premier modèle où le ressaut hydraulique a été formé dans un canal rectangulaire en aval d'une vanne rectangulaire. Le but était de valider la méthode de travail et de définir la valeur de certains paramètres nécessaires dans les conditions non homogènes de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal. Une relation générale a été développée pour évaluer la perte d'énergie en amont du ressaut pour but de calculer la hauteur initiale du ressaut hydraulique dans les conditions non homogènes de la distribution de débit sur la largeur du canal. Le résultat le plus pertinent dans ce chapitre est l'influence significative d'une faible variation de la hauteur supercritique sur la charge ;

Le deuxième chapitre a étudié le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire en aval de quatre vannes dentées différentes. En premier lieu, nous avons calculé la hauteur initiale du ressaut en utilisant la relation générale de la perte de charge développée dans le chapitre précédent. En deuxième lieu, nous avons modifié et validé la relation de Bélanger dans les conditions non homogènes, en comparant la hauteur de réservoir mesurée avec celle calculée à partir de la relation modifiée de Bélanger.

Au troisième chapitre, nous avons étudié expérimentalement les propriétés du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique à vannes parallélogrammes et triangulaire.

Les principaux paramètres de ressaut hydraulique ont été étudiés, tels que le rapport des hauteurs conjuguées et les longueurs caractéristiques. Les résultats obtenus lors des expérimentations ont indiqué que le canal trapézoïdal asymétrique avec des vannes parallélogrammes réduit la hauteur et la longueur du ressaut hydraulique mieux que le canal rectangulaire, contrairement au canal trapézoïdal asymétrique avec une vanne triangulaire.

Conclusion de la troisième partie

Ainsi, le canal trapézoïdal asymétrique avec des vannes parallélogrammes réduit la hauteur du ressaut hydraulique comme le canal triangulaire.

Une nouvelle relation a été développée pour calculer le rendement pour $3,82 < F_1 < 6,11$. Le rendement du ressaut a été comparé à d'autres types de canaux. Nous avons obtenu que, pour $3,82 < F_1 < 4,86$, le rendement du ressaut hydraulique est entre les canaux triangulaires et trapézoïdaux symétriques, et il est considéré comme plus efficace que le canal triangulaire et trapézoïdal symétrique pour $5,02 < F_1 < 6,11$.

Conclusion générale

Cette thèse de doctorat s'inscrit dans le domaine des constructions d'ouvrages hydrauliques dont l'évacuateur de crue constitue l'organe principal des barrages. Le ressaut hydraulique est le phénomène physique responsable de la dissipation d'énergie au niveau des évacuateurs de crue. Dans ce travail, nous nous sommes intéressés à l'étude théorique et expérimentale du phénomène du ressaut hydraulique dans différentes conditions de distribution transversale la hauteur de l'eau (homogènes et non homogènes).

Les modèles réduits sont considérés comme le moyen le plus fiable à résoudre un problème d'écoulement impossible à étudier par le calcul. C'est le cas pour le développement de structures telles que les déversoirs, les dissipateurs d'énergie, les barrages et les prises d'eau en rivière, etc. Pour cela, dans cette recherche, le ressaut hydraulique a été étudié expérimentalement dans deux modèles réduits différents.

Synthèse et originalités des travaux

Plusieurs raisons peuvent être à l'origine de la non-homogénéité de la distribution du débit transversalement notamment la géométrie asymétrique du canal ou du bassin, la forme de certains déversoirs non linéaires comme (Piano Key Weir et labyrinthe), aussi, par des vannes spéciales où l'aire de la sortie de l'eau n'est pas uniforme (vannes dentées). Dans notre étude, nous avons choisi deux façons différentes d'engendrer la non homogénéité de la hauteur de l'eau, la première en plaçant une vanne dentée en amont du canal et la deuxième par une section trapézoïdale asymétrique du canal.

Plusieurs objectifs ont été atteints, dans les quels, nous citons :

Dans le cas d'une distribution homogène la hauteur de l'eau sur la largeur du canal :

L'objectif a été d'étudier et de vérifier plusieurs paramètres du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, en aval d'une vanne rectangulaire pour l'utiliser dans les conditions non homogènes. Tels que, le profils transversaux et longitudinaux ; la hauteur supercritique du ressaut ; l'influence de la variation des hauteurs sur la charge ; la dissipation d'énergie dans le canal ; et enfin, développement d'une relation générale de la perte d'énergie en amont du ressaut pour but de calculer la hauteur initiale du ressaut

Conclusion générale

hydraulique dans les conditions non homogènes de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal.

Dans le cas d'une distribution non homogène la hauteur de l'eau sur la largeur du canal :

- *Canal rectangulaire - vannes dentées :*

L'objectif principal a été de modifier la relation de Bélanger, pour qu'elle soit applicable dans les conditions non homogènes. L'étude a été faite sur un ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire, en aval de 4 vannes dentées. La nouvelle relation de Bélanger a été bien vérifiée dans ces conditions, en comparant la hauteur de réservoir mesurée avec celle calculée à partir de la nouvelle relation.

- *Canal trapézoïdal asymétrique :*

Dans ce cas, le but a été d'étudier le ressaut hydraulique formé dans un canal trapézoïdal asymétrique. Nous avons étudié les paramètres du ressaut comme : « le rapport des hauteurs conjuguées $(h_2/h_1)_{\text{moy}}$ » et « les longueurs caractéristiques $L_{r(\text{peu profond})}/h_2-h_1(\text{peu profond})$; $L_{r(\text{peu profond})}/h_2(\text{moy})$ et $L_{r(\text{plus profond})}/h_2(\text{moy})$ ». Enfin, nous avons développé une relation au calcul du rendement du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique.

Le contenu de notre présente étude comprend trois parties principales :

Dans la première partie, nous avons donné un aperçu général sur la bibliographie du ressaut hydraulique dans plusieurs types de canaux : rectangulaire, triangulaire, trapézoïdal symétrique et trapézoïdal asymétrique, dans lequel plusieurs travaux ont été présentés en détail.

Dans la deuxième partie, nous avons bien détaillé le travail expérimental. Plusieurs essais ont été effectués sur le ressaut hydraulique dans des conditions homogènes et non homogènes de la distribution transversale de la hauteur de l'eau. Ces essais ont été réalisés sur deux modèles différents dans deux laboratoires de recherche : (HECE) à l'université de Liège, et (LARGHYDE) à l'université de Biskra. Dans le premier modèle, nous avons fait un modèle numérique, ensuite nous avons étudié les propriétés du ressaut dans un canal rectangulaire en aval d'une vanne rectangulaire, et 4 vannes dentées. Pour le second modèle, les propriétés du ressaut hydraulique ont été étudiés dans un canal trapézoïdal asymétrique à vannes parallélogramme et triangulaire.

La troisième partie a été consacrée à la discussion des résultats expérimentaux obtenus lors des essais réalisés. Cette partie a été divisée également en deux parties. La première partie a présenté les résultats obtenus dans le modèle I (canal rectangulaire), tandis que la deuxième partie a exposé ceux du modèle II (canal trapézoïdal asymétrique).

Enseignements principaux

Le résultat le plus pertinent dans l'étude du ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire en aval d'une vanne rectangulaire était l'impact important de la faible variation de hauteur initiale d'eau sur la charge. Aussi, une relation générale pour la perte d'énergie en amont du ressaut a été développée pour but de calculer la hauteur initiale du ressaut hydraulique dans les conditions non homogènes de la distribution la hauteur de l'eau sur la largeur du canal.

Dans le cas du ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire en aval de quatre vannes dentées, la mesure de la hauteur initiale du ressaut était impossible à cause la non homogénéité de la distribution de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal. La hauteur initiale du ressaut a été donc calculée à l'aide d'une relation générale de la perte de charge trouvée précédemment. La relation de Bélanger a été modifiée et validée dans ces conditions non homogènes.

L'étude du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal asymétrique a mis en évidence qu'il y'a une influence de la géométrie du canal sur l'efficacité du ressaut, dans lequel, l'efficacité du ressaut dans un canal trapézoïdal asymétrique est entre les canaux triangulaires et trapézoïdaux symétriques, pour $3,82 < F_1 < 4,86$, et il est considéré comme plus efficace que le canal triangulaire et trapézoïdal symétrique pour $5,02 < F_1 < 6,11$.

Perspectives

Plusieurs perspectives de recherche sont liées à ce travail. Dans cette thèse, nous avons proposé un sujet d'actualité qui s'intéressait à l'étude du ressaut dans des conditions de distribution homogènes et non homogènes transversalement de la hauteur de l'eau.

Dans le cadre des résultats obtenus lors de l'étude réalisée sur le premier modèle (canal rectangulaire en aval des vannes dentées), la nouvelle relation de Bélanger proposée

Conclusion générale

ouvre la porte à la quantification de la perte d'énergie dans les conditions non homogènes de la distribution de la hauteur de l'eau. Il serait donc intéressant de quantifier la perte d'énergie en aval des déversoirs non rectangulaires, tels que le PKW.

- Dans le cadre des résultats obtenus lors de l'étude réalisée sur le deuxième modèle, nous proposons d'élargir le cercle de recherche sur le canal trapézoïdal asymétrique. Un travail pourrait être réalisé afin d'étudier le ressaut hydraulique sur ce type de canal en modifiant la géométrie du canal, par exemple en changeant sa pente ou sa largeur.

Références bibliographiques

- 1) A, Bakhmeteff . B., and Matzke. A. E. 1936. “The Hydraulic Jump in Terms of Dynamic Similarity.” Transactions of the American Society of Civil Engineers 101(1): 360–347.
- 2) Achour, B., & Debabeche, M. (2003). Ressaut Hydraulique Contrôlé par Seuil en Canal Triangulaire. *J. Hydraul. Res.*, 41(3), 319–325.
- 3) Achour, B., Debabeche, M., Khattaoui, M., & Bedjaoui, A. (2002). Ressaut hydraulique classique et contrôlé dans quelques profils de canaux (Première partie). In *Larhyss Journal*, N°.
- 4) Afzal, N., & Bushra, A. (2002). Structure du ressaut hydraulique turbulent dans un canal trapézoïdal. *Journal of Hydraulic Research*, 40(2), 205–214. <https://doi.org/10.1080/00221680209499863>
 - a. Anandraj, “Investigational Study on Self Aeration Characteristic of Hydraulic Jump,” *IOSR J. Mech. Civ. Eng.*, vol. 4, no. 2, pp. 27–31, 2012, doi: 10.9790/1684-0422731.
- 5) Carl E. Kindsvater, & J.ASCE. (1944). The Hydraulic Jump in Sloping Channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers* , 109(1).
- 6) Chanson, H. (2009). Un hydraulicien d’exception bien en avance sur son époque: Jean-Baptiste Charles Joseph Bélanger (1790-1874). *Houille Blanche*, 5, 183–188. <https://doi.org/10.1051/lhb/2009072>
- 7) Chanson, H. (2012). Momentum Considerations in Hydraulic Jumps and Bores. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 138(4), 382–385. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)ir.1943-4774.0000409](https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000409)
- 8) Chow. (1959). *Open-channel hydraulics* (International student edition. McGraw-Hill Civil Engineering Series. McGraw-Hill, Ed.).
- 9) Debabeche, M., & Achour, B. (2007). Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. *Journal of Hydraulic Research*, 45(1), 135–139. <https://doi.org/10.1080/00221686.2007.9521753>
- 10) Diaz. (1954). The hydraulic jump in non-rectangular open channel.
- 11) Hager, W. H. (1992). Energy dissipators and hydraulic jump. In *Journal of Fluid Mechanics* (1st ed., Vol. 247). Kluwer Academic Publishers. <https://doi.org/10.1017/S002211209321062X>
- 12) Hager, W. H. (1999). *Wastewater Hydraulics : Theory and Practice* (Springer).
- 13) Hager, W. H., & Sinniger, R. (1985). Flow Characteristics Of The Hydraulic Jump In A Stilling Basin With An Abrupt Bottom Rise. *Journal of Hydraulic Research*, 23(2), 101–113. <https://doi.org/10.1080/00221688609498544>
- 14) Hager, W. H., & Sinniger, R. (1985). Flow Characteristics Of The Hydraulic Jump In A Stilling Basin With An Abrupt Bottom Rise. *Journal of Hydraulic Research*, 23(2), 101–113. <https://doi.org/10.1080/00221688609498544>
- 15) Hager, W. H., & Sinniger, R. O. (1989). *Hydraulic construction, Stationary flow* (Presses polytechniques romandes CH-1015, Ed.; New edition, Vol. 15).
- 16) Hager, W. H., & Wanoschek, R. (1987). Hydraulic Jump In Triangular Channel. *Journal of Hydraulic Research*, 549–564. <https://doi.org/10.1080/00221688909499251>
- 17) Hager, W. H., R. Bremen, and N. Kawagoshi. 1990. “Length of RollerRessaut Hydraulique Classique: Longueur Du Rouleau.” *Journal of Hydraulic Research* 28(5): 591–608.

- 18) Huichao, D., & Lingling, W. (2004). Numerical study of submerged hydraulic jump. *Environmental Hydraulics and Sustainable Water Management*, Two Volume Set, September 2013, 1697–1702. <https://doi.org/10.1201/b16814-277>
- 19) H. E. Schulz, J. D. Nóbrega, A. L. A. Simões, H. Schulz, and R. de M. Porto, “Details of Hydraulic Jumps for Design Criteria of Hydraulic Structures,” in *Hydrodynamics - Concepts and Experiments*, InTech, 2015. doi: 10.5772/58963.
- 20) H. W. & F. M. Vimaldoss Jesudhas, Ram Balachandar, “Modelling hydraulic jumps: IDDES versus experiments,” *Environ. Fluid Mech.*, pp. 393–413, 2020.
- 21) F. Bahmanpouri, C. Gualtieri, and H. Chanson, “Flow patterns and free-surface dynamics in hydraulic jump on pebbled rough bed,” *Proc. Inst. Civ. Eng. Water Manag.*, vol. 176, no. 1, pp. 32–49, 2023, doi: 10.1680/jwama.20.00040.
- 22) G. Han, J., Kang, H., & Bae, “hydraulic performance of asymmetrical trapezoidal open channels,” *J. hydro-environment Res.*, vol. 11, pp. 15–23, 2016.
- 23) J. N. Bradley, & A. J. Peterka. (1957). Hydraulic Design of Stilling Basins: Hydraulic Jumps on a Horizontal Apron (Basin I). *Journal of the Hydraulics Division*, 83(5).
- 24) John W. Forster, & Raymond A. Skrinde. (1950). Control of the hydraulic jump by sills. *Transactions de l’American Society of Civil Engineers*, 115(1).
- 25) Kiyoumars Roushangar; Roghayeh Ghasempour, “Evaluation of the impact of channel geometry and rough elements arrangement in hydraulic jump energy dissipation via SVM,” *Hydroinformatics*, pp. 92–103, 2019, doi: <https://doi.org/10.2166/hydro.2018.028>.
- 26) K. Roushangar, R. Ghasempour, and R. Valizadeh, “Effect of channel boundary conditions in predicting hydraulic jump characteristics using an ANFIS-based approach,” *J. Appl. Fluid Mech.*, vol. 11, no. 3, pp. 555–565, 2018, doi: 10.29252/jafm.11.03.27933.
- 27) Kiri, U., Leng, X., & Chanson, H. (2018). Positive surge propagation in a non-rectangular asymmetrical channel.
- 28) Kiri, U., Leng, X., & Chanson, H. (2020). Positive surge propagating in an asymmetrical canal. *Journal of Hydro-Environment Research*, 31, 41–47. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2020.04.002>
- 29) Leng, X., Lubin, P., & Chanson, H. (2017). CFD Modelling of Breaking and Undular Tidal Bores with Physical Validation (Vol. 7, Issue 1).
- 30) Mc. Corcodal. (1994). *Journal of Hydraulic Research*. 32(1), 119–130.
- 31) Navale, Architecture, ‘Voies Navigables et Constructions Hydrauliques’, 2011
- 32) N.S . GOVIND A RAO, & D . MURALIDHAR. (1963). Discharge characteristics of weirs of finite-crest width (*La houille blanche*, Vol. 5).
- 33) NV. Bretz. (1988). Ressaut hydraulique forcé par seuil . *Laboratoire de Construction Hydraulique, EPF, Communication 2*.
- 34) Okada, A., & Aki, S. (1955). Etude expérimentale de ressaut hydraulique sur tablier à pente inversée . *Journal de l’Institut Central de Recherche Du Laboratoire Technique de l’industrie de l’énergie Électrique* , 5(6), 161–174.
- 35) Pagliara, & Puruginelli. (2000). Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire prismatique à contre pente.
- 36) Posey, C. J., & Hsing, P. S. (1938). Hydraulic Jump in Trapezoidal Channels: Vol. Dec.121(22) (*Engineering News-Record*, Ed.).
- 37) Rajaratnam, N. (1964). Discussion to Silvester. *Journal of Hydraulic Division.*, ASCE 90((HY4)), 341–350.
- 38) S. K. Gupta, R. C. Mehta, and V. K. Dwivedi, “Modeling of Relative Length and Relative Energy Loss of Free Hydraulic Jump in Horizontal Prismatic Channel,” *Procedia Eng.*, vol. 51, pp. 529–537, Jan. 2013, doi:

- 10.1016/J.PROENG.2013.01.075.
- 39) V. Atashi, Y. H. Lim, M. Khajavi, and M. S. Bajestan, “Characteristics of Hydraulic Jumps in Stilling Basins with Permeable Six-Legged Elements,” no. May, 2020, doi: 10.1061/9780784482971.007.
- 40) Y. Chachereau and H. Chanson, “Free-surface fluctuations and turbulence in hydraulic jumps,” *Exp. Therm. Fluid Sci.*, vol. 35, no. 6, pp. 896–909, 2011, doi: 10.1016/j.expthermflusci.2011.01.009.
- 41) W. Rand. (1957). An approach to generalised design of stilling basin,. Trans. New-York, Academy of Sciences, 20(2), 173–191.
- 42) W. Rand. (1965). Flow over a vertical sill in an open channel. Proc. ASCE, J. Hydraulic Division, 91(97), 97–122.
- 43) W.H. Hager, and R.O. Sinniger. 1989. *Constructions Hydrauliques: Écoulements Stationnaires*. presses. Lausanne.
- 44) Wanoschek, R., & Hager, W. H. (1989). Hydraulic jump in trapezoidal channel Ressaut hydraulique en canal trapezoidal. *Journal of Hydraulic Research*, 27(3), 429–446. <https://doi.org/10.1080/00221688909499175>
- 45) WH. Hager, R. Breme, & N. Kawagoshi. (1990). Classic hydraulic jump: Length of roller . 591–608. <https://doi.org/10.1080/00221689009499048>
- 46) Yasuki Nakayama, *Introduction to Fluid Mechanics*, Second edi. 2013.

Principales notations

L	Longueur du canal trapézoïdal asymétrique [m]
l	Largeur du canal “canal trapézoïdal asymétrique” [m]
m	Inclinaison transversale du fond du canal par rapport à l'horizon [-]
M	Paramètre de forme, $M = mh/b$ [-]
F_1	Nombre incident de Froude [-]
g	Accélération de la gravité [m/s^2]
h_1 (s)	Hauteur initiale de l'eau sur le côté peu profond de la largeur du canal [m]
h_1 (c)	Hauteur initiale de l'eau au centre de la largeur du canal [m]
h_1 (d)	Hauteur initiale de l'eau du côté plus profond de la largeur du canal [m]
h_{1ave}	Hauteur initiale moyenne de l'eau [m]
h_2 (s)	Hauteur finale de l'eau sur le côté peu profond de la largeur du canal [m]
h_2 (c)	Hauteur finale de l'eau au centre de la largeur du canal [m]
h_2 (d)	Hauteur finale de l'eau sur le côté plus profond de la largeur du canal [m]
h_{2ave}	Hauteur finale moyenne de l'eau [m]
h_v	Hauteur de l'ouverture de la vanne [m]
h_0	Différence de hauteur entre le côté plus profond et le côté peu profond [m]
A_t	Surface de la sortie d'eau [m^2]
x_0	Largeur de la section transversale [m]
$L_{r(s)}$	Longueur du rouleau sur le côté peu profond [m]
$L_{r(d)}$	Longueur du rouleau du côté plus profond [m]
H_1	Charge initiale du ressaut hydraulique [m]
H_2	Charge finale du ressaut hydraulique [m]
D	Différence transversale dans l'élévation du fond du canal [m]
Q	Débit de l'eau [m^3/s]
Y	Hauteurs conjuguées [-]
ΔH	Perte de charge [m]
η	Rendement du ressaut hydraulique [-]
b	Largeur du canal rectangulaire [m]
l	Longueur du canal rectangulaire [m]
h_{mes}	Hauteur mesurée de l'eau [m]
h_{1theo}	Hauteur théorique initiale de l'eau [m]
h_r	Hauteur de l'eau dans le réservoir [m]

Annexes

Variation de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal

Tableau a.1. Mesure expérimentales de $h_{me}/h_r=f(y/b)$; $Q=0.0385m^3/s$; $h_v=0.02m$

y/b	$h_{(x=17cm)}/h_r$	$h_{(x=27cm)}/h_r$	$h_{(x=37cm)}/h_r$	y /b	$h_{(x=17cm)}/h_r$	$h_{(x=27cm)}/b$	$h_{(x=37cm)}/h_r$
0,041	0,0594	0,0641	0,0658	0,426	0,0600	0,0601	0,0597
0,051	0,0593	0,0625	0,0638	0,437	0,0589	0,0601	0,0600
0,061	0,0566	0,0647	0,0621	0,447	0,0602	0,0589	0,0601
0,071	0,0575	0,0622	0,0598	0,457	0,0600	0,0591	0,0610
0,081	0,0554	0,0620	0,0592	0,467	0,0598	0,0589	0,0611
0,091	0,0571	0,0558	0,0572	0,477	0,0587	0,0595	0,0611
0,102	0,0554	0,0579	0,0568	0,487	0,0585	0,0586	0,0584
0,112	0,0564	0,0545	0,0563	0,497	0,0578	0,0582	0,0609
0,122	0,0559	0,0542	0,0566	0,508	0,0582	0,0586	0,0602
0,132	0,0559	0,0549	0,0559	0,518	0,0581	0,0580	0,0601
0,142	0,0561	0,0552	0,0568	0,528	0,0578	0,0587	0,0589
0,152	0,0556	0,0547	0,0558	0,538	0,0583	0,0584	0,0596
0,162	0,0557	0,0557	0,0568	0,548	0,0581	0,0586	0,0594
0,173	0,0565	0,0559	0,0573	0,558	0,0587	0,0586	0,0595
0,183	0,0558	0,0560	0,0575	0,569	0,0587	0,0591	0,0594
0,193	0,0569	0,0560	0,0567	0,579	0,0593	0,0588	0,0600
0,203	0,0564	0,0566	0,0577	0,589	0,0587	0,0599	0,0600
0,213	0,0562	0,0571	0,0562	0,599	0,0593	0,0590	0,0602
0,223	0,0566	0,0573	0,0566	0,609	0,0594	0,0600	0,0602
0,234	0,0568	0,0576	0,0573	0,619	0,0598	0,0592	0,0601
0,244	0,0574	0,0578	0,0565	0,629	0,0599	0,0591	0,0605
0,254	0,0577	0,0572	0,0572	0,640	0,0604	0,0604	0,0610
0,264	0,0574	0,0569	0,0564	0,650	0,0596	0,0599	0,0602
0,274	0,0575	0,0565	0,0574	0,660	0,0599	0,0598	0,0607
0,284	0,0572	0,0570	0,0577	0,670	0,0598	0,0605	0,0597
0,294	0,0577	0,0560	0,0581	0,680	0,0593	0,0600	0,0594
0,305	0,0574	0,0560	0,0576	0,690	0,0588	0,0596	0,0602
0,315	0,0570	0,0567	0,0592	0,701	0,0592	0,0590	0,0614
0,325	0,0565	0,0571	0,0593	0,711	0,0589	0,0592	0,0603
0,335	0,0572	0,0574	0,0592	0,721	0,0592	0,0590	0,0598
0,345	0,0573	0,0570	0,0605	0,731	0,0580	0,0583	0,0599
0,355	0,0573	0,0575	0,0591	0,741	0,0589	0,0585	0,0604
0,365	0,0576	0,0577	0,0597	0,751	0,0589	0,0587	0,0597
0,376	0,0582	0,0581	0,0588	0,761	0,0590	0,0595	0,0595
0,386	0,0583	0,0592	0,0596	0,772	0,0594	0,0589	0,0595
0,396	0,0592	0,0594	0,0591	0,782	0,0595	0,0591	0,0603
0,406	0,0595	0,0595	0,0594	0,792	0,0591	0,0602	0,0596
0,416	0,0596	0,0600	0,0596	0,802	0,0593	0,0593	0,0598

Suite du tableau :

y /b	h_(x=17cm)/h_r	h_(x=27cm)/h_r	h_(x=37cm)/h_r
0,812	0,0589	0,0602	0,0598
0,822	0,0594	0,0604	0,0598
0,832	0,0597	0,0595	0,0604
0,843	0,0599	0,0603	0,0605
0,853	0,0596	0,0600	0,0595
0,863	0,0600	0,0596	0,0638
0,873	0,0590	0,0600	0,0630
0,883	0,0589	0,0595	0,0651
0,893	0,0593	0,0594	0,0651
0,904	0,0588	0,0599	0,0677
0,914	0,0597	0,0598	0,0677
0,924	0,0596	0,0606	0,0677
0,934	0,0611	0,0629	0,0646
0,944	0,0604	0,0666	0,0651
0,954	0,0637	0,0664	0,0667
0,964	0,0640	0,0651	0,0646
0,975	0,0648	0,0661	0,0651
0,985	0,0637	0,0636	0,0667

Variation de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal

Tableau a.2. Mesure expérimentales de $h_{mes}/h_r=f(y/b)$; $Q=0.0485m^3/s$; $h_v=0.02m$

y /b	$h_{(x=17cm)}/h_r$	$h_{(x= 27cm)}/h_r$	$h_{(x= 37cm)}/h_r$	y /b	$h_{(x=17cm)}/h_r$	$h_{(x= 27cm)}/h_r$	$h_{(x= 37cm)}/h_r$
0,0406	0,0339	0,0365	0,0399	0,4264	0,0339	0,0359	0,0359
0,0508	0,0346	0,0357	0,0403	0,4365	0,0340	0,0356	0,0364
0,0609	0,0343	0,0341	0,0387	0,4467	0,0344	0,0351	0,0368
0,0711	0,0333	0,0337	0,0347	0,4569	0,0339	0,0347	0,0367
0,0812	0,0319	0,0331	0,0348	0,4670	0,0339	0,0339	0,0352
0,0914	0,0313	0,0333	0,0353	0,4772	0,0341	0,0334	0,0354
0,1015	0,0314	0,0325	0,0330	0,4873	0,0334	0,0334	0,0358
0,1117	0,0315	0,0322	0,0326	0,4975	0,0340	0,0339	0,0356
0,1218	0,0311	0,0315	0,0334	0,5076	0,0336	0,0340	0,0365
0,1320	0,0312	0,0330	0,0334	0,5178	0,0335	0,0348	0,0359
0,1421	0,0316	0,0324	0,0328	0,5279	0,0333	0,0347	0,0364
0,1523	0,0318	0,0327	0,0328	0,5381	0,0327	0,0345	0,0368
0,1624	0,0318	0,0324	0,0333	0,5482	0,0333	0,0351	0,0367
0,1726	0,0323	0,0330	0,0341	0,5584	0,0337	0,0354	0,0354
0,1827	0,0323	0,0331	0,0346	0,5685	0,0335	0,0355	0,0339
0,1929	0,0319	0,0329	0,0342	0,5787	0,0336	0,0343	0,0350
0,2030	0,0327	0,0329	0,0330	0,5888	0,0335	0,0354	0,0348
0,2132	0,0330	0,0331	0,0336	0,5990	0,0338	0,0336	0,0349
0,2234	0,0329	0,0336	0,0329	0,6091	0,0337	0,0350	0,0352
0,2335	0,0329	0,0325	0,0340	0,6193	0,0341	0,0349	0,0358
0,2437	0,0331	0,0328	0,0335	0,6294	0,0353	0,0341	0,0363
0,2538	0,0321	0,0331	0,0333	0,6396	0,0347	0,0347	0,0364
0,2640	0,0324	0,0337	0,0340	0,6497	0,0348	0,0342	0,0362
0,2741	0,0321	0,0326	0,0336	0,6599	0,0338	0,0343	0,0367
0,2843	0,0324	0,0341	0,0344	0,6701	0,0341	0,0345	0,0367
0,2944	0,0321	0,0334	0,0334	0,6802	0,0341	0,0340	0,0358
0,3046	0,0325	0,0331	0,0348	0,6904	0,0341	0,0344	0,0349
0,3147	0,0325	0,0332	0,0344	0,7005	0,0343	0,0341	0,0353
0,3249	0,0324	0,0329	0,0340	0,7107	0,0339	0,0335	0,0347
0,3350	0,0326	0,0327	0,0347	0,7208	0,0334	0,0339	0,0360
0,3452	0,0335	0,0337	0,0354	0,7310	0,0338	0,0343	0,0359
0,3553	0,0335	0,0344	0,0350	0,7411	0,0338	0,0342	0,0359
0,3655	0,0335	0,0340	0,0344	0,7513	0,0342	0,0340	0,0349
0,3756	0,0332	0,0343	0,0352	0,7614	0,0350	0,0343	0,0353
0,3858	0,0329	0,0347	0,0354	0,7716	0,0344	0,0346	0,0347
0,3959	0,0339	0,0345	0,0358	0,7817	0,0335	0,0349	0,0347
0,4061	0,0336	0,0344	0,0356	0,7919	0,0336	0,0352	0,0349
0,4162	0,0343	0,0361	0,0365	0,8020	0,0336	0,0346	0,0355

Suite du tableau :

y /b	h_(x=17cm)/h_r	h_(x=27cm)/h_r	h_(x=37cm)/h_r
0,8122	0,0342	0,0346	0,0365
0,8223	0,0343	0,0339	0,0359
0,8325	0,0341	0,0343	0,0362
0,8426	0,0342	0,0341	0,0372
0,8528	0,0340	0,0348	0,0360
0,8629	0,0345	0,0348	0,0350
0,8731	0,0342	0,0345	0,0362
0,8832	0,0342	0,0346	0,0355
0,8934	0,0342	0,0347	0,0348
0,9036	0,0340	0,0345	0,0355
0,9137	0,0341	0,0350	0,0360
0,9239	0,0347	0,0350	0,0367
0,9340	0,0348	0,0360	0,0378
0,9442	0,0339	0,0358	0,0389
0,9543	0,0352	0,0380	0,0373
0,9645	0,0369	0,0374	0,0394
0,9746	0,0373	0,0367	0,0377
0,9848	0,0373	0,0384	0,0368

Variation de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal

Tableau a.3. Mesure expérimentales de $h_{mes}/h_r=f(y/b)$; $Q=0.9 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$

y/b	$h_{(x=17\text{cm})}/h_r$	$h_{(x=27\text{cm})}/h_r$	$h_{(x=37\text{cm})}/h_r$	y/b	$h_{(x=17\text{cm})}/h_r$	$h_{(x=27\text{cm})}/h_r$	$h_{(x=37\text{cm})}/h_r$
0,0406	0,1334	0,1328	0,1378	0,4264	0,1328	0,1310	0,1322
0,0508	0,1333	0,1372	0,1367	0,4365	0,1347	0,1317	0,1329
0,0609	0,1322	0,1388	0,1381	0,4467	0,1322	0,1289	0,1372
0,0711	0,1346	0,1414	0,1407	0,4569	0,1321	0,1323	0,1361
0,0812	0,1339	0,1343	0,1420	0,4670	0,1330	0,1307	0,1327
0,0914	0,1285	0,1350	0,1424	0,4772	0,1346	0,1278	0,1310
0,1015	0,1302	0,1331	0,1412	0,4873	0,1320	0,1322	0,1351
0,1117	0,1287	0,1321	0,1405	0,4975	0,1302	0,1292	0,1319
0,1218	0,1284	0,1300	0,1392	0,5076	0,1321	0,1309	0,1342
0,1320	0,1285	0,1295	0,1344	0,5178	0,1316	0,1327	0,1307
0,1421	0,1281	0,1294	0,1354	0,5279	0,1309	0,1309	0,1353
0,1523	0,1279	0,1273	0,1338	0,5381	0,1314	0,1317	0,1334
0,1624	0,1273	0,1276	0,1299	0,5482	0,1325	0,1300	0,1354
0,1726	0,1274	0,1279	0,1304	0,5584	0,1330	0,1309	0,1338
0,1827	0,1282	0,1282	0,1304	0,5685	0,1323	0,1319	0,1355
0,1929	0,1284	0,1260	0,1289	0,5787	0,1343	0,1340	0,1325
0,2030	0,1290	0,1282	0,1274	0,5888	0,1331	0,1325	0,1354
0,2132	0,1281	0,1251	0,1298	0,5990	0,1328	0,1342	0,1373
0,2234	0,1291	0,1276	0,1296	0,6091	0,1360	0,1338	0,1360
0,2335	0,1305	0,1271	0,1296	0,6193	0,1328	0,1342	0,1343
0,2437	0,1283	0,1293	0,1265	0,6294	0,1319	0,1327	0,1378
0,2538	0,1299	0,1292	0,1279	0,6396	0,1327	0,1335	0,1362
0,2640	0,1297	0,1269	0,1305	0,6497	0,1337	0,1326	0,1362
0,2741	0,1290	0,1289	0,1252	0,6599	0,1342	0,1300	0,1343
0,2843	0,1295	0,1272	0,1281	0,6701	0,1338	0,1330	0,1378
0,2944	0,1278	0,1312	0,1291	0,6802	0,1333	0,1308	0,1362
0,3046	0,1295	0,1284	0,1293	0,6904	0,1342	0,1315	0,1378
0,3147	0,1288	0,1253	0,1310	0,7005	0,1320	0,1306	0,1362
0,3249	0,1290	0,1283	0,1315	0,7107	0,1321	0,1324	0,1362
0,3350	0,1300	0,1270	0,1322	0,7208	0,1318	0,1341	0,1350
0,3452	0,1303	0,1296	0,1289	0,7310	0,1336	0,1310	0,1339
0,3553	0,1291	0,1304	0,1335	0,7411	0,1318	0,1327	0,1327
0,3655	0,1299	0,1312	0,1317	0,7513	0,1347	0,1321	0,1321
0,3756	0,1314	0,1330	0,1323	0,7614	0,1346	0,1321	0,1335
0,3858	0,1316	0,1325	0,1303	0,7716	0,1332	0,1341	0,1375
0,3959	0,1326	0,1330	0,1309	0,7817	0,1322	0,1337	0,1383
0,4061	0,1338	0,1318	0,1301	0,7919	0,1332	0,1361	0,1349
0,4162	0,1318	0,1328	0,1303	0,8020	0,1368	0,1337	0,1395

Suite du tableau :

y /b	h_(x=17cm)/h_r	h_(x=27cm)/h_r	h_(x=37cm)/h_r
0,8122	0,1314	0,1352	0,1341
0,8223	0,1343	0,1359	0,1375
0,8325	0,1370	0,1353	0,1341
0,8426	0,1344	0,1376	0,1375
0,8528	0,1370	0,1374	0,1342
0,8629	0,1341	0,1353	0,1399
0,8731	0,1344	0,1372	0,1371
0,8832	0,1339	0,1408	0,1442
0,8934	0,1338	0,1396	0,1443
0,9036	0,1365	0,1388	0,1451
0,9137	0,1349	0,1390	0,1475
0,9239	0,1359	0,1388	0,1490
0,9340	0,1388	0,1427	0,1469
0,9442	0,1408	0,1447	0,1470
0,9543	0,1377	0,1474	0,1463
0,9645	0,1383	0,1402	0,1416
0,9746	0,1354	0,1420	0,1406
0,9848	0,1355	0,1401	0,1350

Variation de la hauteur de l'eau sur la largeur du canal

Tableau a.4. Mesure expérimentales de $h_{me}/h_r=f(y/b)$; $Q=0.11 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05\text{m}$

y/b	$h_{(x=17\text{cm})}/h_r$	$h_{(x=27\text{cm})}/h_r$	$h_{(x=37\text{cm})}/h_r$	y /b	$h_{(x=17\text{cm})}/h_r$	$h_{(x=27\text{cm})}/b$	$h_{(x=37\text{cm})}/h_r$
0,0406	0,0913	0,0961	0,0986	0,4264	0,0952	0,0934	0,0977
0,0508	0,0919	0,0942	0,0972	0,4365	0,0927	0,0952	0,0930
0,0609	0,0931	0,0958	0,0994	0,4467	0,0923	0,0935	0,0916
0,0711	0,0949	0,0979	0,0999	0,4569	0,0933	0,0949	0,0935
0,0812	0,0921	0,0959	0,1019	0,4670	0,0919	0,0955	0,0949
0,0914	0,0909	0,0928	0,0969	0,4772	0,0918	0,0939	0,0944
0,1015	0,0907	0,0917	0,0992	0,4873	0,0919	0,0925	0,0910
0,1117	0,0905	0,0905	0,0961	0,4975	0,0934	0,0943	0,0944
0,1218	0,0899	0,0936	0,0970	0,5076	0,0926	0,0927	0,0926
0,1320	0,0893	0,0910	0,0940	0,5178	0,0924	0,0930	0,0966
0,1421	0,0892	0,0916	0,0934	0,5279	0,0925	0,0921	0,0937
0,1523	0,0897	0,0915	0,0915	0,5381	0,0930	0,0926	0,0937
0,1624	0,0898	0,0912	0,0926	0,5482	0,0925	0,0926	0,0935
0,1726	0,0895	0,0907	0,0909	0,5584	0,0929	0,0933	0,0935
0,1827	0,0914	0,0910	0,0914	0,5685	0,0927	0,0927	0,0928
0,1929	0,0905	0,0922	0,0909	0,5787	0,0937	0,0932	0,0933
0,2030	0,0905	0,0908	0,0922	0,5888	0,0929	0,0935	0,0949
0,2132	0,0914	0,0906	0,0939	0,5990	0,0934	0,0942	0,0943
0,2234	0,0911	0,0904	0,0929	0,6091	0,0933	0,0935	0,0941
0,2335	0,0901	0,0904	0,0922	0,6193	0,0933	0,0949	0,0948
0,2437	0,0904	0,0898	0,0936	0,6294	0,0942	0,0951	0,0949
0,2538	0,0903	0,0910	0,0922	0,6396	0,0945	0,0953	0,0974
0,2640	0,0904	0,0900	0,0949	0,6497	0,0950	0,0959	0,0956
0,2741	0,0896	0,0917	0,0940	0,6599	0,0934	0,0953	0,0937
0,2843	0,0903	0,0915	0,0952	0,6701	0,0939	0,0950	0,0931
0,2944	0,0910	0,0907	0,0906	0,6802	0,0904	0,0900	0,0908
0,3046	0,0909	0,0909	0,0913	0,6904	0,0896	0,0889	0,0933
0,3147	0,0904	0,0917	0,0911	0,7005	0,0903	0,0889	0,0941
0,3249	0,0892	0,0920	0,0950	0,7107	0,0910	0,0887	0,0917
0,3350	0,0918	0,0920	0,0919	0,7208	0,0909	0,0898	0,0917
0,3452	0,0912	0,0911	0,0931	0,7310	0,0904	0,0887	0,0884
0,3553	0,0911	0,0917	0,0948	0,7411	0,0892	0,0891	0,0891
0,3655	0,0929	0,0927	0,0942	0,7513	0,0918	0,0891	0,0862
0,3756	0,0920	0,0910	0,0962	0,7614	0,0912	0,0906	0,0888
0,3858	0,0927	0,0948	0,0941	0,7716	0,0911	0,0872	0,0890
0,3959	0,0930	0,0943	0,0935	0,7817	0,0929	0,0905	0,0890
0,4061	0,0942	0,0939	0,0950	0,7919	0,0920	0,0916	0,0913
0,4162	0,0938	0,0938	0,0939	0,8020	0,0927	0,0896	0,0913

Suite du tableau :

y /b	h_(x=17cm)/h_r	h_(x=27cm)/h_r	h_(x=37cm)/h_r
0,8122	0,0930	0,0916	0,0913
0,8223	0,0942	0,0914	0,0929
0,8325	0,0938	0,0927	0,0906
0,8426	0,0952	0,0927	0,0906
0,8528	0,0927	0,0933	0,0951
0,8629	0,0898	0,0932	0,0951
0,8731	0,0897	0,0926	0,0936
0,8832	0,0892	0,0926	0,0969
0,8934	0,0893	0,0928	0,0956
0,9036	0,0899	0,0949	0,0984
0,9137	0,0905	0,0961	0,0983
0,9239	0,0907	0,0950	0,0974
0,9340	0,0909	0,0958	0,1021
0,9442	0,0921	0,0957	0,0984
0,9543	0,0949	0,0961	0,0983
0,9645	0,0931	0,0950	0,0974
0,9746	0,0919	0,0958	0,1021
0,9848	0,0913	0,0957	0,1005

Variation de la hauteur de l'eau sur la longueur du canal

Variation des hauteurs mesurées et calculées du ressaut pour l'ouverture 0.02 m

*Tableau a.5. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L_r)$;
 $Q=0.0385 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.02\text{m}$*

x/L_r	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/h_r	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,311	0,0525	0,0525	1,245	0,0614	0,0611
0,342	0,0528	0,0521	1,277	0,0616	0,0600
0,374	0,0531	0,0520	1,308	0,0619	0,0600
0,405	0,0534	0,0535	1,339	0,0622	0,0606
0,436	0,0537	0,0539	1,370	0,0625	0,0678
0,467	0,0540	0,0542	1,401	0,0628	0,1053
0,498	0,0543	0,0546	1,432	0,0631	0,0957
0,529	0,0546	0,0545	1,463	0,0634	0,1193
0,560	0,0549	0,0546	1,494	0,0637	0,1029
0,592	0,0552	0,0551	1,526	0,0640	0,1090
0,623	0,0555	0,0551	1,557	0,0643	0,1273
0,654	0,0558	0,0556	1,588	0,4206	0,1644
0,685	0,0561	0,0552	1,619	0,4206	0,1647
0,716	0,0564	0,0547	1,650	0,4206	0,2138
0,747	0,0567	0,0550	1,681	0,4206	0,2209
0,778	0,0570	0,0555	1,712	0,4205	0,1998
0,809	0,0573	0,0539	1,744	0,4205	0,1530
0,841	0,0576	0,0554	1,775	0,4205	0,1757
0,872	0,0578	0,0548	1,806	0,4205	0,2198
0,903	0,0581	0,0560	1,837	0,4205	0,2397
0,934	0,0584	0,0551	1,868	0,4204	0,2508
0,965	0,0587	0,0555	1,899	0,4204	0,2304
0,996	0,0590	0,0565	1,930	0,4204	0,2335
1,027	0,0593	0,0566	1,961	0,4204	0,2602
1,059	0,0596	0,0558	1,993	0,4204	0,2767
1,090	0,0599	0,0559	2,024	0,4204	0,2926
1,121	0,0602	0,0575	2,055	0,4203	0,3061
1,152	0,0605	0,0563	2,086	0,4203	0,2939
1,183	0,0608	0,0564	2,117	0,4203	0,3078
1,214	0,0611	0,0594	2,148	0,4203	0,3385

Annexes A- Tableaux

x/L	h _{calc} /h _r	h _{mes} /h _r	x/L	h _{calc} /h _r	h _{mes} /h _r
2,179	0,4203	0,3529	3,300	0,4196	0,4074
2,211	0,4202	0,3734	3,331	0,4196	0,4102
2,242	0,4202	0,3513	3,363	0,4196	0,3872
2,273	0,4202	0,3745	3,394	0,4195	0,3573
2,304	0,4202	0,3761	3,425	0,4195	0,3683
2,335	0,4202	0,3803	3,456	0,4195	0,3780
2,366	0,4202	0,3754	3,487	0,4195	0,4092
2,397	0,4201	0,3687	3,518	0,4195	0,4076
2,428	0,4201	0,3595	3,549	0,4195	0,4014
2,460	0,4201	0,3740	3,580	0,4194	0,3981
2,491	0,4201	0,3917	3,612	0,4194	0,4021
2,522	0,4201	0,3905	3,643	0,4194	0,4073
2,553	0,4200	0,3990	3,674	0,4194	0,4108
2,584	0,4200	0,4012	3,705	0,4194	0,4107
2,615	0,4200	0,4012	3,736	0,4193	0,3916
2,646	0,4200	0,4012	3,767	0,4193	0,3662
2,678	0,4200	0,4012	3,798	0,4193	0,3846
2,709	0,4200	0,4012	3,830	0,4193	0,3725
2,740	0,4199	0,3744	3,861	0,4193	0,3685
2,771	0,4199	0,3905	3,892	0,4193	0,3775
2,802	0,4199	0,3800	3,923	0,4192	0,3835
2,833	0,4199	0,3902	3,954	0,4192	0,4020
2,864	0,4199	0,3932	3,985	0,4192	0,4041
2,896	0,4198	0,3935	4,016	0,4192	0,4092
2,927	0,4198	0,3981	4,047	0,4192	0,4035
2,958	0,4198	0,3932	4,079	0,4191	0,4074
2,989	0,4198	0,3873	4,110	0,4191	0,4117
3,020	0,4198	0,3880	4,141	0,4191	0,4077
3,051	0,4197	0,3943	4,172	0,4191	0,4077
3,082	0,4197	0,4099	4,203	0,4191	0,4077
3,113	0,4197	0,4015	4,234	0,4191	0,4077
3,145	0,4197	0,3837	4,265	0,4190	0,4077
3,176	0,4197	0,3946	4,515	0,4189	0,4091
3,207	0,4197	0,3789	5,449	0,4183	0,4110
3,238	0,4196	0,3722	6,383	0,4178	0,4178
3,269	0,4196	0,3687	-	-	-

Tableau a.6. Mesure expérimentales*de $h/h_r=f(x/Lr)$; $Q=0.042m^3/s$; $h_v =0.02 m$*

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,2938	0,0439	0,0439	1,1752	0,0513	0,0561
0,3232	0,0442	0,0438	1,2046	0,0516	0,0823
0,3526	0,0444	0,0435	1,2340	0,0518	0,0821
0,3819	0,0447	0,0442	1,2633	0,0521	0,0695
0,4113	0,0449	0,0447	1,2927	0,0523	0,0838
0,4407	0,0452	0,0445	1,3221	0,0526	0,0884
0,4701	0,0454	0,0453	1,3515	0,0528	0,0774
0,4995	0,0457	0,0456	1,3809	0,0530	0,0777
0,5288	0,0459	0,0448	1,4102	0,0533	0,1113
0,5582	0,0462	0,0456	1,4396	0,0535	0,0834
0,5876	0,0464	0,0458	1,4690	0,0538	0,1330
0,6170	0,0467	0,0455	1,4984	0,0540	0,1460
0,6464	0,0469	0,0462	1,5278	0,0543	0,1493
0,6757	0,0472	0,0460	1,5571	0,3888	0,1117
0,7051	0,0474	0,0459	1,5865	0,3888	0,1277
0,7345	0,0477	0,0464	1,6159	0,3888	0,1331
0,7639	0,0479	0,0464	1,6453	0,3888	0,1693
0,7933	0,0482	0,0465	1,6747	0,3888	0,1869
0,8226	0,0484	0,0468	1,7040	0,3888	0,1904
0,8520	0,0487	0,0467	1,7334	0,3888	0,1755
0,8814	0,0489	0,0463	1,7628	0,3887	0,2106
0,9108	0,0491	0,0473	1,7922	0,3887	0,2283
0,9402	0,0494	0,0464	1,8216	0,3887	0,2371
0,9695	0,0496	0,0468	1,8509	0,3887	0,2376
0,9989	0,0499	0,0466	1,8803	0,3887	0,2217
1,0283	0,0501	0,0474	1,9097	0,3887	0,2390
1,0577	0,0504	0,0490	1,9391	0,3887	0,2632
1,0871	0,0506	0,0506	1,9685	0,3886	0,2812
1,1164	0,0509	0,0491	1,9978	0,3886	0,2789
1,1458	0,0511	0,0561	2,0272	0,3886	0,3038

Annexes A- Tableaux

x/L	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/L_r	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
2,0566	0,3886	0,2872	3,1143	0,3881	0,3686
2,0860	0,3886	0,2936	3,1437	0,3881	0,3770
2,1154	0,3886	0,2892	3,1730	0,3881	0,3683
2,1447	0,3886	0,3027	3,2024	0,3881	0,3797
2,1741	0,3886	0,3323	3,2318	0,3881	0,3787
2,2035	0,3885	0,3185	3,2612	0,3880	0,3752
2,2329	0,3885	0,3070	3,2906	0,3880	0,3562
2,2623	0,3885	0,3200	3,3199	0,3880	0,3616
2,2916	0,3885	0,3278	3,3493	0,3880	0,3832
2,3210	0,3885	0,3417	3,3787	0,3880	0,3820
2,3504	0,3885	0,3404	3,4081	0,3880	0,3792
2,3798	0,3885	0,3490	3,4375	0,3880	0,3721
2,4092	0,3884	0,3546	3,4668	0,3879	0,3800
2,4385	0,3884	0,3578	3,4962	0,3879	0,3616
2,4679	0,3884	0,3578	3,5256	0,3879	0,3759
2,4973	0,3884	0,3578	3,5550	0,3879	0,3847
2,5267	0,3884	0,3578	3,5844	0,3879	0,3860
2,5561	0,3884	0,3578	3,6137	0,3879	0,3869
2,5854	0,3884	0,3494	3,6431	0,3879	0,3743
2,6148	0,3883	0,3594	3,6725	0,3879	0,3836
2,6442	0,3883	0,3594	3,7019	0,3878	0,3857
2,6736	0,3883	0,3597	3,7313	0,3878	0,3818
2,7030	0,3883	0,3634	3,7606	0,3878	0,3819
2,7323	0,3883	0,3669	3,7900	0,3878	0,3838
2,7617	0,3883	0,3577	3,8194	0,3878	0,3855
2,7911	0,3883	0,3637	3,8488	0,3878	0,3777
2,8205	0,3882	0,3702	3,8782	0,3878	0,3845
2,8499	0,3882	0,3727	3,9075	0,3877	0,3833
2,8792	0,3882	0,3718	3,9369	0,3877	0,3833
2,9086	0,3882	0,3739	3,9663	0,3877	0,3833
2,9380	0,3882	0,3681	3,9957	0,3877	0,3833
2,9674	0,3882	0,3610	4,0251	0,3877	0,3833
2,9968	0,3882	0,3629	4,2601	0,3876	0,3835
3,0261	0,3882	0,3742	5,1415	0,3872	0,3825
3,0555	0,3881	0,3782	6,0229	0,3867	0,3867
3,0849	0,3881	0,3793	-	-	-

Tableau a.7. Mesure expérimentales du graphique de $h/h_r=f(x/L)$; $Q=0.045m^3/s$; $h_v = 0.02m$

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,281	0,038	0,038	1,122	0,045	0,042
0,309	0,038	0,037	1,150	0,045	0,042
0,337	0,039	0,038	1,178	0,045	0,043
0,365	0,039	0,038	1,207	0,046	0,042
0,393	0,039	0,038	1,235	0,046	0,042
0,421	0,039	0,039	1,263	0,046	0,043
0,449	0,040	0,040	1,291	0,046	0,043
0,477	0,040	0,040	1,319	0,046	0,044
0,505	0,040	0,041	1,347	0,047	0,045
0,533	0,040	0,041	1,375	0,047	0,053
0,561	0,040	0,041	1,403	0,047	0,050
0,589	0,041	0,040	1,431	0,047	0,050
0,617	0,041	0,041	1,459	0,048	0,044
0,645	0,041	0,040	1,487	0,048	0,044
0,673	0,041	0,040	1,515	0,048	0,047
0,701	0,042	0,040	1,543	0,048	0,045
0,730	0,042	0,040	1,571	0,048	0,051
0,758	0,042	0,040	1,599	0,049	0,050
0,786	0,042	0,040	1,627	0,049	0,064
0,814	0,042	0,041	1,655	0,049	0,075
0,842	0,043	0,041	1,684	0,049	0,098
0,870	0,043	0,041	1,712	0,050	0,071
0,898	0,043	0,041	1,740	0,050	0,081
0,926	0,043	0,041	1,768	0,050	0,092
0,954	0,044	0,042	1,796	0,050	0,103
0,982	0,044	0,041	1,824	0,050	0,106
1,010	0,044	0,041	1,852	0,374	0,110
1,038	0,044	0,042	1,880	0,374	0,164
1,066	0,044	0,042	1,908	0,374	0,166
1,094	0,045	0,042	1,936	0,374	0,156

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/hr	h_{mesurée}/hr	x/Lr	h_{calc}/hr	h_{mesurée}/hr
1,964	0,374	0,148	2,974	0,374	0,355
1,992	0,374	0,164	3,002	0,374	0,342
2,020	0,374	0,196	3,030	0,374	0,353
2,048	0,374	0,163	3,058	0,374	0,357
2,076	0,374	0,178	3,087	0,374	0,363
2,104	0,374	0,176	3,115	0,374	0,351
2,133	0,374	0,212	3,143	0,374	0,363
2,161	0,374	0,224	3,171	0,374	0,370
2,189	0,374	0,230	3,199	0,374	0,363
2,217	0,374	0,204	3,227	0,374	0,367
2,245	0,374	0,192	3,255	0,374	0,366
2,273	0,374	0,178	3,283	0,374	0,357
2,301	0,374	0,228	3,311	0,374	0,357
2,329	0,374	0,225	3,339	0,374	0,341
2,357	0,374	0,225	3,367	0,374	0,367
2,385	0,374	0,225	3,395	0,374	0,368
2,413	0,374	0,225	3,423	0,374	0,350
2,441	0,374	0,225	3,451	0,374	0,371
2,469	0,374	0,261	3,479	0,374	0,373
2,497	0,374	0,281	3,507	0,374	0,374
2,525	0,374	0,296	3,535	0,374	0,366
2,553	0,374	0,294	3,564	0,373	0,366
2,581	0,374	0,294	3,592	0,373	0,366
2,610	0,374	0,305	3,620	0,373	0,366
2,638	0,374	0,302	3,648	0,373	0,364
2,666	0,374	0,320	3,676	0,373	0,370
2,694	0,374	0,319	3,704	0,373	0,349
2,722	0,374	0,321	3,732	0,373	0,369
2,750	0,374	0,335	3,760	0,373	0,369
2,778	0,374	0,335	3,788	0,373	0,369
2,806	0,374	0,345	3,816	0,373	0,369
2,834	0,374	0,336	3,844	0,373	0,369
2,862	0,374	0,328	4,069	0,373	0,371
2,890	0,374	0,323	4,910	0,373	0,370
2,918	0,374	0,341	5,752	0,373	0,373
2,946	0,374	0,337	-	-	-

Tableau a.8. *Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L)$;*

$$Q=0.0485\text{m}^3/\text{s}; h_v =0.02\text{m}$$

x/L_r	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/L_r	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,2669	0,0301	0,0301	1,0944	0,0361	0,0356
0,2936	0,0303	0,0301	1,1211	0,0363	0,0363
0,3203	0,0305	0,0308	1,1478	0,0365	0,0352
0,3470	0,0307	0,0309	1,1745	0,0367	0,0369
0,3737	0,0309	0,0312	1,2012	0,0369	0,0365
0,4004	0,0311	0,0305	1,2279	0,0371	0,0367
0,4271	0,0313	0,0319	1,2545	0,0373	0,0422
0,4538	0,0315	0,0322	1,2812	0,0375	0,0425
0,4805	0,0317	0,0325	1,3079	0,0376	0,0498
0,5072	0,0319	0,0324	1,3346	0,0378	0,0457
0,5339	0,0321	0,0329	1,3613	0,0380	0,0484
0,5605	0,0323	0,0325	1,3880	0,0382	0,0585
0,5872	0,0325	0,0324	1,4147	0,0384	0,0557
0,6139	0,0327	0,0327	1,4414	0,0386	0,0629
0,6406	0,0329	0,0321	1,4681	0,0388	0,0688
0,6673	0,0331	0,0323	1,4948	0,0390	0,0764
0,6940	0,0333	0,0327	1,5215	0,0391	0,0844
0,7207	0,0335	0,0330	1,5482	0,0393	0,0834
0,7474	0,0336	0,0326	1,5749	0,0395	0,1007
0,7741	0,0338	0,0332	1,6016	0,0397	0,1145
0,8008	0,0340	0,0330	1,6282	0,0399	0,0984
0,8275	0,0342	0,0336	1,6549	0,0401	0,1156
0,8542	0,0344	0,0337	1,6816	0,0403	0,1153
0,8809	0,0346	0,0338	1,7083	0,0404	0,1289
0,9075	0,0348	0,0338	1,7350	0,0406	0,1400
0,9342	0,0350	0,0338	1,7617	0,0408	0,1629
0,9609	0,0352	0,0339	1,7884	0,0410	0,1628
0,9876	0,0354	0,0337	1,8151	0,0412	0,1650
1,0143	0,0356	0,0344	1,8418	0,0414	0,1836
1,0410	0,0358	0,0354	1,8685	0,0415	0,1907
1,0677	0,0359	0,0347	1,8952	0,0417	0,2038

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,9219	0,0419	0,1943	2,8828	0,3413	0,3307
1,9486	0,0421	0,2166	2,9095	0,3413	0,3311
1,9752	0,0423	0,2097	2,9362	0,3412	0,3252
2,0019	0,0425	0,2236	2,9629	0,3412	0,3292
2,0286	0,0426	0,2250	2,9896	0,3412	0,3258
2,0553	0,0428	0,2262	3,0163	0,3412	0,3317
2,0820	0,0430	0,2405	3,0429	0,3412	0,3372
2,1087	0,3415	0,2366	3,0696	0,3412	0,3424
2,1354	0,3415	0,2465	3,0963	0,3412	0,3417
2,1621	0,3415	0,2417	3,1230	0,3412	0,3371
2,1888	0,3415	0,2465	3,1497	0,3412	0,3404
2,2155	0,3415	0,2462	3,1764	0,3412	0,3385
2,2422	0,3415	0,2462	3,2031	0,3412	0,3397
2,2689	0,3415	0,2484	3,2298	0,3411	0,3422
2,2956	0,3415	0,2484	3,2565	0,3411	0,3395
2,3222	0,3415	0,2484	3,2832	0,3411	0,3313
2,3489	0,3414	0,2718	3,3099	0,3411	0,3416
2,3756	0,3414	0,2586	3,3366	0,3411	0,3442
2,4023	0,3414	0,2554	3,3633	0,3411	0,3412
2,4290	0,3414	0,2664	3,3899	0,3411	0,3428
2,4557	0,3414	0,2753	3,4166	0,3411	0,3421
2,4824	0,3414	0,2779	3,4433	0,3411	0,3399
2,5091	0,3414	0,2832	3,4700	0,3411	0,3422
2,5358	0,3414	0,2826	3,4967	0,3411	0,3404
2,5625	0,3414	0,2916	3,5234	0,3410	0,3404
2,5892	0,3414	0,3063	3,5501	0,3410	0,3404
2,6159	0,3414	0,3006	3,5768	0,3410	0,3404
2,6426	0,3413	0,2961	3,6035	0,3410	0,3404
2,6693	0,3413	0,3115	3,6302	0,3410	0,3404
2,6959	0,3413	0,3121	3,6569	0,3410	0,3404
2,7226	0,3413	0,3065	3,6836	0,3410	-
2,7493	0,3413	0,3131	3,7103	0,3410	-
2,7760	0,3413	0,3155	3,7370	0,3410	-
2,8027	0,3413	0,3188	3,7636	0,3410	-
2,8294	0,3413	0,3252	3,7903	0,3409	-
2,8561	0,3413	0,3152	3,8170	0,3409	-

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
3,8437	0,3409	-	4,8047	0,3406	-
3,8704	0,3409	-	4,8313	0,3406	-
3,8971	0,3409	-	4,8580	0,3406	-
3,9238	0,3409	-	4,8847	0,3406	-
3,9505	0,3409	-	4,9114	0,3406	-
3,9772	0,3409	-	4,9381	0,3406	-
4,0039	0,3409	-	4,9648	0,3405	-
4,0306	0,3409	-	4,9915	0,3405	-
4,0573	0,3409	-	5,0182	0,3405	-
4,0840	0,3408	-	5,0449	0,3405	-
4,1106	0,3408	-	5,0716	0,3405	-
4,1373	0,3408	-	5,0983	0,3405	-
4,1640	0,3408	-	5,1250	0,3405	-
4,1907	0,3408	-	5,1517	0,3405	-
4,2174	0,3408	-	5,1783	0,3405	-
4,2441	0,3408	-	5,2050	0,3405	-
4,2708	0,3408	-	5,2317	0,3404	-
4,2975	0,3408	-	5,2584	0,3404	-
4,3242	0,3408	-	5,2851	0,3404	-
4,3509	0,3408	-	5,3118	0,3404	-
4,3776	0,3407	-	5,3385	0,3404	-
4,4043	0,3407	-	5,3652	0,3404	-
4,4310	0,3407	-	5,3919	0,3404	-
4,4576	0,3407	-	5,4186	0,3404	-
4,4843	0,3407	-	5,4453	0,3404	-
4,5110	0,3407	-	5,4720	0,3404	0,3404
4,5377	0,3407	-	-	-	-
4,5644	0,3407	-	-	-	-
4,5911	0,3407	-	-	-	-
4,6178	0,3407	-	-	-	-
4,6445	0,3407	-	-	-	-
4,6712	0,3406	0,3406	-	-	-
4,6979	0,3406	-	-	-	-
4,7246	0,3406	-	-	-	-
4,7513	0,3406	-	-	-	-
4,7780	0,3406	-	-	-	-

Variation des hauteurs mesurées et calculées du ressaut pour l'ouverture 0.03m*Tableau a.9. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/Lr)$;*

$$Q=0.053m^3/s ; h_v = 0.03m$$

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,2516	0,0870	0,0870	0,9812	0,0953	0,0935
0,2768	0,0873	0,0888	1,0064	0,0956	0,0943
0,3019	0,0875	0,0893	1,0315	0,0958	0,0980
0,3271	0,0878	0,0903	1,0567	0,0961	0,0938
0,3522	0,0881	0,0895	1,0819	0,0964	0,1083
0,3774	0,0884	0,0902	1,1070	0,0967	0,1003
0,4026	0,0887	0,0910	1,1322	0,0970	0,1174
0,4277	0,0890	0,0919	1,1573	0,0973	0,1244
0,4529	0,0893	0,0902	1,1825	0,0975	0,1273
0,4780	0,0896	0,0910	1,2077	0,0978	0,1251
0,5032	0,0898	0,0906	1,2328	0,5062	0,1341
0,5283	0,0901	0,0899	1,2580	0,5062	0,1515
0,5535	0,0904	0,0911	1,2831	0,5062	0,1498
0,5787	0,0907	0,0899	1,3083	0,5061	0,1751
0,6038	0,0910	0,0917	1,3334	0,5061	0,1784
0,6290	0,0913	0,0923	1,3586	0,5061	0,2024
0,6541	0,0916	0,0910	1,3838	0,5061	0,2132
0,6793	0,0918	0,0914	1,4089	0,5060	0,2324
0,7045	0,0921	0,0919	1,4341	0,5060	0,2375
0,7296	0,0924	0,0923	1,4592	0,5060	0,2483
0,7548	0,0927	0,0917	1,4844	0,5060	0,2623
0,7799	0,0930	0,0921	1,5096	0,5059	0,2800
0,8051	0,0933	0,0921	1,5347	0,5059	0,2957
0,8303	0,0936	0,0921	1,5599	0,5059	0,3056
0,8554	0,0938	0,0927	1,5850	0,5059	0,3101
0,8806	0,0941	0,0918	1,6102	0,5058	0,3296
0,9057	0,0944	0,0926	1,6354	0,5058	0,3375
0,9309	0,0947	0,0910	1,6605	0,5058	0,3195
0,9561	0,0950	0,0926	1,6857	0,5058	0,3396

Annexes A- Tableaux

x/L	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/L	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,7108	0,5057	0,3468	2,6417	0,5048	0,4844
1,7360	0,5057	0,3444	2,6669	0,5047	0,4830
1,7612	0,5057	0,3411	2,6921	0,5047	0,4874
1,7863	0,5057	0,3472	2,7172	0,5047	0,4873
1,8115	0,5056	0,3647	2,7424	0,5047	0,4881
1,8366	0,5056	0,3699	2,7675	0,5046	0,4837
1,8618	0,5056	0,3658	2,7927	0,5046	0,4895
1,8870	0,5055	0,3722	2,8179	0,5046	0,4987
1,9121	0,5055	0,3866	2,8430	0,5046	0,4893
1,9373	0,5055	0,3866	2,8682	0,5045	0,4960
1,9624	0,5055	0,3933	2,8933	0,5045	0,4916
1,9876	0,5054	0,4133	2,9185	0,5045	0,4943
2,0128	0,5054	0,4194	2,9436	0,5044	0,4953
2,0379	0,5054	0,4238	2,9688	0,5044	0,4888
2,0631	0,5054	0,4190	2,9940	0,5044	0,4953
2,0882	0,5053	0,4355	3,0191	0,5044	0,4917
2,1134	0,5053	0,4354	3,0443	0,5043	0,4987
2,1385	0,5053	0,4561	3,0694	0,5043	0,4947
2,1637	0,5053	0,4561	3,0946	0,5043	0,4935
2,1889	0,5052	0,4561	3,1198	0,5043	0,4952
2,2140	0,5052	0,4325	3,1449	0,5042	0,4969
2,2392	0,5052	0,4403	3,1701	0,5042	0,4930
2,2643	0,5052	0,4418	3,1952	0,5042	0,4964
2,2895	0,5051	0,4417	3,2204	0,5042	0,4911
2,3147	0,5051	0,4527	3,2456	0,5041	0,4949
2,3398	0,5051	0,4492	3,2707	0,5041	0,4958
2,3650	0,5051	0,4629	3,2959	0,5041	0,4987
2,3901	0,5050	0,4549	3,3210	0,5041	0,4956
2,4153	0,5050	0,4627	3,3462	0,5040	0,4972
2,4405	0,5050	0,4712	3,3714	0,5040	0,4948
2,4656	0,5049	0,4772	3,3965	0,5040	0,4912
2,4908	0,5049	0,4734	3,4217	0,5039	0,4912
2,5159	0,5049	0,4707	3,4468	0,5039	0,4912
2,5411	0,5049	0,4740	3,6481	0,5037	0,4951
2,5663	0,5048	0,4768	4,4029	0,5029	0,4957
2,5914	0,5048	0,4863	5,1577	0,5021	0,5021
2,6166	0,5048	0,4798	-	-	-

Tableau a.10. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L)$;

$$Q=0.058m^3/s ; h_v= 0.03m$$

x/Lr	h _{calc} /h _r	h _{mes} /h _r	x/Lr	h _{calc} /h _r	h _{mes} /h _v
0,237	0,073	0,073	0,924	0,080	0,079
0,261	0,074	0,074	0,948	0,081	0,078
0,284	0,074	0,073	0,971	0,081	0,079
0,308	0,074	0,074	0,995	0,081	0,077
0,332	0,074	0,075	1,019	0,081	0,079
0,355	0,075	0,075	1,042	0,082	0,079
0,379	0,075	0,075	1,066	0,082	0,084
0,403	0,075	0,075	1,090	0,082	0,081
0,426	0,075	0,077	1,114	0,082	0,087
0,450	0,076	0,076	1,137	0,083	0,086
0,474	0,076	0,076	1,161	0,083	0,096
0,498	0,076	0,076	1,185	0,083	0,102
0,521	0,076	0,075	1,208	0,083	0,111
0,545	0,077	0,076	1,232	0,083	0,116
0,569	0,077	0,076	1,256	0,473	0,118
0,592	0,077	0,071	1,279	0,473	0,134
0,616	0,077	0,075	1,303	0,473	0,135
0,640	0,077	0,076	1,327	0,473	0,153
0,663	0,078	0,076	1,350	0,473	0,166
0,687	0,078	0,076	1,374	0,473	0,188
0,711	0,078	0,076	1,398	0,473	0,183
0,734	0,078	0,076	1,422	0,473	0,184
0,758	0,079	0,077	1,445	0,473	0,193
0,782	0,079	0,077	1,469	0,473	0,207
0,806	0,079	0,077	1,493	0,473	0,220
0,829	0,079	0,077	1,516	0,473	0,231
0,853	0,080	0,077	1,540	0,473	0,238
0,877	0,080	0,078	1,564	0,473	0,245
0,900	0,080	0,077	1,587	0,473	0,252

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,611	0,473	0,255	2,488	0,472	0,436
1,635	0,473	0,265	2,511	0,472	0,441
1,658	0,473	0,295	2,535	0,472	0,441
1,682	0,473	0,290	2,559	0,472	0,444
1,706	0,473	0,306	2,582	0,472	0,449
1,730	0,473	0,307	2,606	0,472	0,450
1,753	0,473	0,314	2,630	0,472	0,457
1,777	0,473	0,317	2,653	0,472	0,450
1,801	0,473	0,315	2,677	0,472	0,455
1,824	0,473	0,318	2,701	0,472	0,458
1,848	0,473	0,336	2,725	0,472	0,458
1,872	0,473	0,339	2,748	0,472	0,462
1,895	0,473	0,344	2,772	0,472	0,456
1,919	0,473	0,357	2,796	0,472	0,464
1,943	0,473	0,358	2,819	0,472	0,460
1,966	0,473	0,365	2,843	0,472	0,462
1,990	0,473	0,378	2,867	0,472	0,459
2,014	0,473	0,365	2,890	0,472	0,463
2,037	0,473	0,379	2,914	0,472	0,465
2,061	0,473	0,369	2,938	0,472	0,463
2,085	0,473	0,378	2,961	0,472	0,461
2,109	0,473	0,386	2,985	0,472	0,466
2,132	0,473	0,398	3,009	0,472	0,462
2,156	0,473	0,395	3,033	0,472	0,464
2,180	0,473	0,389	3,056	0,472	0,468
2,203	0,473	0,391	3,080	0,472	0,465
2,227	0,473	0,392	3,104	0,472	0,465
2,251	0,473	0,401	3,127	0,472	0,463
2,274	0,473	0,413	3,151	0,472	0,465
2,298	0,473	0,415	3,175	0,472	0,461
2,322	0,473	0,418	3,198	0,472	0,469
2,345	0,473	0,420	3,222	0,472	0,464
2,369	0,473	0,419	3,246	0,472	0,466
2,393	0,472	0,427	3,435	0,472	0,470
2,417	0,472	0,429	4,146	0,471	0,467
2,440	0,472	0,438	4,857	0,470	0,470
2,464	0,472	0,440	-	-	-

Tableau a.11. Mesure expérimentales de $h/h_r=f(x/Lr)$; $Q=0.063m^3/s$; $h_v=0.03m$

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,224	0,060	0,060	0,874	0,066	0,073
0,247	0,060	0,061	0,897	0,066	0,072
0,269	0,060	0,060	0,919	0,066	0,074
0,291	0,060	0,062	0,942	0,066	0,072
0,314	0,061	0,060	0,964	0,067	0,094
0,336	0,061	0,062	0,987	0,067	0,088
0,359	0,061	0,062	1,009	0,067	0,092
0,381	0,061	0,062	1,031	0,067	0,114
0,404	0,061	0,062	1,054	0,067	0,112
0,426	0,062	0,062	1,076	0,068	0,129
0,448	0,062	0,062	1,099	0,068	0,143
0,471	0,062	0,063	1,121	0,068	0,145
0,493	0,062	0,063	1,143	0,068	0,158
0,516	0,063	0,062	1,166	0,068	0,174
0,538	0,063	0,063	1,188	0,069	0,168
0,561	0,063	0,063	1,211	0,069	0,199
0,583	0,063	0,063	1,233	0,069	0,217
0,605	0,063	0,063	1,256	0,069	0,234
0,628	0,064	0,064	1,278	0,070	0,235
0,650	0,064	0,064	1,300	0,070	0,248
0,673	0,064	0,064	1,323	0,070	0,261
0,695	0,064	0,065	1,345	0,070	0,259
0,717	0,064	0,064	1,368	0,070	0,265
0,740	0,065	0,064	1,390	0,071	0,266
0,762	0,065	0,064	1,413	0,071	0,276
0,785	0,065	0,067	1,435	0,071	0,270
0,807	0,065	0,066	1,457	0,071	0,288
0,830	0,065	0,065	1,480	0,071	0,287
0,852	0,066	0,070	1,502	0,072	0,298

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,525	0,072	0,304	2,354	0,444	0,425
1,547	0,072	0,307	2,377	0,444	0,418
1,569	0,444	0,304	2,399	0,444	0,421
1,592	0,444	0,311	2,421	0,444	0,421
1,614	0,444	0,311	2,444	0,444	0,427
1,637	0,444	0,326	2,466	0,444	0,428
1,659	0,444	0,333	2,489	0,444	0,432
1,682	0,444	0,332	2,511	0,444	0,430
1,704	0,444	0,337	2,534	0,444	0,426
1,726	0,444	0,338	2,556	0,444	0,431
1,749	0,444	0,342	2,578	0,444	0,435
1,771	0,444	0,341	2,601	0,444	0,436
1,794	0,444	0,355	2,623	0,444	0,430
1,816	0,444	0,363	2,646	0,444	0,435
1,839	0,444	0,362	2,668	0,444	0,430
1,861	0,444	0,360	2,691	0,444	0,440
1,883	0,444	0,368	2,713	0,444	0,436
1,906	0,444	0,371	2,735	0,444	0,438
1,928	0,444	0,371	2,758	0,444	0,440
1,951	0,444	0,371	2,780	0,444	0,441
1,973	0,444	0,353	2,803	0,444	0,441
1,995	0,444	0,361	2,825	0,444	0,440
2,018	0,444	0,363	2,847	0,444	0,440
2,040	0,444	0,361	2,870	0,444	0,441
2,063	0,444	0,363	2,892	0,443	0,440
2,085	0,444	0,376	2,915	0,443	0,439
2,108	0,444	0,385	2,937	0,443	0,440
2,130	0,444	0,381	2,960	0,443	0,436
2,152	0,444	0,385	2,982	0,443	0,440
2,175	0,444	0,391	3,004	0,443	0,440
2,197	0,444	0,392	3,027	0,443	0,440
2,220	0,444	0,398	3,049	0,443	0,440
2,242	0,444	0,401	3,072	0,443	0,440
2,265	0,444	0,402	3,251	0,443	0,440
2,287	0,444	0,401	3,924	0,443	0,440
2,309	0,444	0,405	4,596	0,442	0,442
2,332	0,444	0,419	-	-	-

Tableau a.12. Mesure expérimentales de $h/h_r=f(x/Lr)$; $Q=0.068 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03 \text{ m}$

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,213	0,050	0,050	0,831	0,055	0,053
0,234	0,050	0,049	0,852	0,055	0,054
0,256	0,050	0,049	0,874	0,055	0,053
0,277	0,050	0,050	0,895	0,055	0,053
0,298	0,050	0,051	0,916	0,055	0,053
0,320	0,050	0,050	0,938	0,056	0,053
0,341	0,051	0,051	0,959	0,056	0,054
0,362	0,051	0,047	0,980	0,056	0,054
0,384	0,051	0,051	1,001	0,056	0,053
0,405	0,051	0,051	1,023	0,056	0,055
0,426	0,051	0,051	1,044	0,056	0,054
0,447	0,052	0,051	1,065	0,057	0,054
0,469	0,052	0,051	1,087	0,057	0,054
0,490	0,052	0,051	1,108	0,057	0,055
0,511	0,052	0,052	1,129	0,057	0,055
0,533	0,052	0,052	1,151	0,057	0,057
0,554	0,052	0,052	1,172	0,057	0,058
0,575	0,053	0,052	1,193	0,058	0,060
0,597	0,053	0,052	1,215	0,058	0,066
0,618	0,053	0,052	1,236	0,058	0,069
0,639	0,053	0,052	1,257	0,058	0,088
0,661	0,053	0,052	1,278	0,058	0,100
0,682	0,053	0,052	1,300	0,058	0,101
0,703	0,054	0,052	1,321	0,059	0,115
0,724	0,054	0,052	1,342	0,059	0,112
0,746	0,054	0,052	1,364	0,059	0,119
0,767	0,054	0,053	1,385	0,059	0,133
0,788	0,054	0,053	1,406	0,059	0,146
0,810	0,054	0,053	1,428	0,059	0,154

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/hr	h_{mes}/hr	x/Lr	h_{calc}/hr	h_{mes}/hr
1,449	0,060	0,168	2,237	0,408	0,320
1,470	0,060	0,176	2,259	0,408	0,309
1,492	0,060	0,186	2,280	0,408	0,324
1,513	0,060	0,192	2,301	0,408	0,337
1,534	0,060	0,188	2,323	0,408	0,336
1,555	0,408	0,203	2,344	0,408	0,341
1,577	0,408	0,193	2,365	0,408	0,350
1,598	0,408	0,207	2,387	0,408	0,351
1,619	0,408	0,205	2,408	0,408	0,356
1,641	0,408	0,218	2,429	0,408	0,354
1,662	0,408	0,219	2,450	0,408	0,356
1,683	0,408	0,231	2,472	0,408	0,363
1,705	0,408	0,241	2,493	0,408	0,370
1,726	0,408	0,237	2,514	0,408	0,371
1,747	0,408	0,252	2,536	0,408	0,374
1,769	0,408	0,251	2,557	0,408	0,378
1,790	0,408	0,259	2,578	0,408	0,376
1,811	0,408	0,257	2,600	0,408	0,377
1,832	0,408	0,282	2,621	0,408	0,372
1,854	0,408	0,282	2,642	0,408	0,373
1,875	0,408	0,245	2,664	0,408	0,385
1,896	0,408	0,251	2,685	0,408	0,385
1,918	0,408	0,251	2,706	0,408	0,387
1,939	0,408	0,253	2,727	0,408	0,393
1,960	0,408	0,272	2,749	0,408	0,392
1,982	0,408	0,268	2,770	0,408	0,391
2,003	0,408	0,266	2,791	0,408	0,400
2,024	0,408	0,278	2,813	0,408	0,397
2,046	0,408	0,288	2,834	0,408	0,394
2,067	0,408	0,281	2,855	0,408	0,395
2,088	0,408	0,292	2,877	0,408	0,400
2,110	0,408	0,293	2,898	0,408	0,396
2,131	0,408	0,292	2,919	0,408	0,396
2,152	0,408	0,296	2,941	0,408	-
2,173	0,408	0,293	2,962	0,408	-
2,195	0,408	0,306	2,983	0,408	-
2,216	0,408	0,315	3,004	0,408	-

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/hr	h_{mes}/hr	x/Lr	h_{calc}/hr	h_{mes}/hr
3,026	0,408	-	3,814	0,407	-
3,047	0,408	-	3,835	0,407	-
3,068	0,408	-	3,857	0,407	-
3,090	0,408	0,403	3,878	0,407	-
3,111	0,407	-	3,899	0,407	-
3,132	0,407	-	3,921	0,407	-
3,154	0,407	-	3,942	0,407	-
3,175	0,407	-	3,963	0,407	-
3,196	0,407	-	3,985	0,407	-
3,218	0,407	-	4,006	0,407	-
3,239	0,407	-	4,027	0,407	-
3,260	0,407	-	4,049	0,407	-
3,281	0,407	-	4,070	0,407	-
3,303	0,407	-	4,091	0,407	-
3,324	0,407	-	4,112	0,407	-
3,345	0,407	-	4,134	0,407	-
3,367	0,407	-	4,155	0,407	-
3,388	0,407	-	4,176	0,407	-
3,409	0,407	-	4,198	0,407	-
3,431	0,407	-	4,219	0,407	-
3,452	0,407	-	4,240	0,407	-
3,473	0,407	-	4,262	0,407	-
3,495	0,407	-	4,283	0,407	-
3,516	0,407	-	4,304	0,407	-
3,537	0,407	-	4,326	0,407	-
3,558	0,407	-	4,347	0,407	-
3,580	0,407	-	4,368	0,407	0,407
3,601	0,407	-	-	-	-
3,622	0,407	-	-	-	-
3,644	0,407	-	-	-	-
3,665	0,407	-	-	-	-
3,686	0,407	-	-	-	-
3,708	0,407	-	-	-	-
3,729	0,407	0,408	-	-	-
3,750	0,407	-	-	-	-
3,772	0,407	-	-	-	-
3,793	0,407	-	-	-	-

Variation des hauteurs mesurées et calculées du ressaut pour l'ouverture 0.04m

Tableau a.13. Mesure expérimentales de $h/h_r=f(x/Lr)$; $Q=0.07 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v 0.04 \text{ m}$

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,209	0,106	0,106	0,815	0,114	0,113
0,230	0,106	0,107	0,836	0,114	0,112
0,251	0,107	0,107	0,857	0,114	0,115
0,272	0,107	0,107	0,878	0,114	0,115
0,293	0,107	0,107	0,899	0,115	0,117
0,314	0,107	0,107	0,920	0,115	0,122
0,334	0,108	0,108	0,941	0,115	0,123
0,355	0,108	0,108	0,961	0,115	0,122
0,376	0,108	0,109	0,982	0,116	0,124
0,397	0,108	0,108	1,003	0,116	0,117
0,418	0,109	0,108	1,024	0,116	0,123
0,439	0,109	0,110	1,045	0,116	0,122
0,460	0,109	0,109	1,066	0,117	0,118
0,481	0,109	0,109	1,087	0,117	0,121
0,502	0,110	0,110	1,108	0,117	0,133
0,523	0,110	0,108	1,129	0,117	0,141
0,543	0,110	0,109	1,150	0,118	0,149
0,564	0,110	0,109	1,170	0,118	0,167
0,585	0,111	0,110	1,191	0,118	0,171
0,606	0,111	0,109	1,212	0,118	0,170
0,627	0,111	0,109	1,233	0,119	0,189
0,648	0,111	0,110	1,254	0,119	0,221
0,669	0,112	0,110	1,275	0,119	0,238
0,690	0,112	0,111	1,296	0,119	0,230
0,711	0,112	0,110	1,317	0,120	0,254
0,732	0,112	0,110	1,338	0,120	0,260
0,752	0,113	0,111	1,359	0,120	0,276
0,773	0,113	0,110	1,379	0,121	0,298
0,794	0,113	0,114	1,400	0,121	0,325

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,421	0,121	0,316	2,195	0,556	0,503
1,442	0,557	0,330	2,215	0,556	0,503
1,463	0,557	0,341	2,236	0,556	0,505
1,484	0,557	0,326	2,257	0,556	0,505
1,505	0,557	0,331	2,278	0,556	0,514
1,526	0,557	0,338	2,299	0,556	0,512
1,547	0,557	0,367	2,320	0,556	0,519
1,568	0,557	0,360	2,341	0,556	0,525
1,588	0,557	0,382	2,362	0,556	0,527
1,609	0,557	0,390	2,383	0,556	0,528
1,630	0,557	0,396	2,404	0,556	0,531
1,651	0,557	0,394	2,424	0,556	0,526
1,672	0,557	0,391	2,445	0,556	0,532
1,693	0,557	0,412	2,466	0,556	0,531
1,714	0,557	0,414	2,487	0,556	0,535
1,735	0,557	0,415	2,508	0,556	0,541
1,756	0,557	0,423	2,529	0,556	0,537
1,777	0,557	0,429	2,550	0,556	0,539
1,797	0,557	0,457	2,571	0,556	0,535
1,818	0,557	0,439	2,592	0,556	0,537
1,839	0,557	0,466	2,613	0,556	0,543
1,860	0,557	0,467	2,633	0,556	0,544
1,881	0,557	0,467	2,654	0,556	0,544
1,902	0,557	0,468	2,675	0,556	0,540
1,923	0,557	0,482	2,696	0,556	0,541
1,944	0,557	0,483	2,717	0,556	0,546
1,965	0,557	0,487	2,738	0,556	0,541
1,986	0,557	0,493	2,759	0,555	0,550
2,006	0,557	0,489	2,780	0,555	0,544
2,027	0,557	0,477	2,801	0,555	0,544
2,048	0,556	0,494	2,822	0,555	0,548
2,069	0,556	0,479	2,842	0,555	0,549
2,090	0,556	0,487	2,863	0,555	0,548
2,111	0,556	0,485	2,884	0,555	-
2,132	0,556	0,492	2,905	0,555	-
2,153	0,556	0,497	2,926	0,555	-
2,174	0,556	0,495	2,947	0,555	-

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
2,968	0,555	-	3,741	0,554	-
2,989	0,555	-	3,762	0,554	-
3,010	0,555	-	3,783	0,554	-
3,031	0,555	0,550	3,804	0,554	-
3,051	0,555	-	3,825	0,554	-
3,072	0,555	-	3,846	0,554	-
3,093	0,555	-	3,867	0,554	-
3,114	0,555	-	3,887	0,554	-
3,135	0,555	-	3,908	0,554	-
3,156	0,555	-	3,929	0,554	-
3,177	0,555	-	3,950	0,554	-
3,198	0,555	-	3,971	0,554	-
3,219	0,555	-	3,992	0,554	-
3,240	0,555	-	4,013	0,554	-
3,260	0,555	-	4,034	0,554	-
3,281	0,555	-	4,055	0,554	-
3,302	0,555	-	4,076	0,554	-
3,323	0,555	-	4,096	0,554	-
3,344	0,555	-	4,117	0,554	-
3,365	0,555	-	4,138	0,554	-
3,386	0,555	-	4,159	0,554	-
3,407	0,555	-	4,180	0,553	-
3,428	0,555	-	4,201	0,553	-
3,449	0,555	-	4,222	0,553	-
3,469	0,554	-	4,243	0,553	-
3,490	0,554	-	4,264	0,553	-
3,511	0,554	-	4,285	0,553	0,553
3,532	0,554	-	-	-	-
3,553	0,554	-	-	-	-
3,574	0,554	-	-	-	-
3,595	0,554	-	-	-	-
3,616	0,554	-	-	-	-
3,637	0,554	-	-	-	-
3,658	0,554	0,550	-	-	-
3,678	0,554	-	-	-	-
3,699	0,554	-	-	-	-
3,720	0,554	-	-	-	-

Tableau a.14. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/Lr)$;

$$Q=0.08m^3/s ; h_v=4 \text{ cm}$$

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,191	0,083	0,083	0,746	0,089	0,101
0,210	0,083	0,083	0,765	0,089	0,112
0,229	0,083	0,083	0,784	0,089	0,123
0,249	0,084	0,084	0,803	0,089	0,115
0,268	0,084	0,084	0,822	0,090	0,137
0,287	0,084	0,084	0,841	0,090	0,152
0,306	0,084	0,084	0,860	0,090	0,157
0,325	0,084	0,085	0,880	0,090	0,147
0,344	0,085	0,086	0,899	0,090	0,177
0,363	0,085	0,085	0,918	0,091	0,156
0,382	0,085	0,085	0,937	0,091	0,169
0,402	0,085	0,084	0,956	0,091	0,169
0,421	0,085	0,085	0,975	0,091	0,196
0,440	0,086	0,084	0,994	0,091	0,204
0,459	0,086	0,084	1,013	0,092	0,203
0,478	0,086	0,086	1,032	0,092	0,196
0,497	0,086	0,085	1,052	0,092	0,162
0,516	0,086	0,086	1,071	0,092	0,177
0,535	0,087	0,085	1,090	0,092	0,189
0,554	0,087	0,086	1,109	0,093	0,202
0,574	0,087	0,087	1,128	0,509	0,202
0,593	0,087	0,087	1,147	0,509	0,198
0,612	0,087	0,087	1,166	0,509	0,236
0,631	0,088	0,087	1,185	0,509	0,246
0,650	0,088	0,086	1,205	0,509	0,255
0,669	0,088	0,086	1,224	0,509	0,277
0,688	0,088	0,088	1,243	0,509	0,300
0,707	0,088	0,090	1,262	0,509	0,296
0,727	0,089	0,096	1,281	0,509	0,310

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,300	0,509	0,291	2,008	0,508	0,447
1,319	0,509	0,279	2,027	0,508	0,445
1,338	0,509	0,281	2,046	0,508	0,445
1,358	0,509	0,288	2,065	0,508	0,454
1,377	0,509	0,264	2,084	0,508	0,448
1,396	0,509	0,265	2,103	0,508	0,454
1,415	0,509	0,266	2,122	0,508	0,453
1,434	0,509	0,251	2,141	0,508	0,461
1,453	0,509	0,256	2,161	0,508	0,464
1,472	0,509	0,260	2,180	0,508	0,468
1,491	0,509	0,270	2,199	0,508	0,469
1,510	0,509	0,277	2,218	0,508	0,475
1,530	0,509	0,277	2,237	0,508	0,482
1,549	0,509	0,283	2,256	0,508	0,472
1,568	0,509	0,266	2,275	0,508	0,485
1,587	0,509	0,286	2,294	0,508	0,471
1,606	0,509	0,299	2,314	0,508	0,472
1,625	0,509	0,284	2,333	0,508	0,478
1,644	0,509	0,284	2,352	0,508	0,469
1,663	0,509	0,289	2,371	0,508	0,469
1,683	0,509	0,410	2,390	0,508	0,468
1,702	0,509	0,408	2,409	0,508	0,471
1,721	0,509	0,414	2,428	0,508	0,469
1,740	0,509	0,415	2,447	0,508	0,471
1,759	0,509	0,429	2,466	0,508	0,470
1,778	0,509	0,431	2,486	0,508	0,473
1,797	0,508	0,432	2,505	0,508	0,473
1,816	0,508	0,432	2,524	0,508	0,474
1,836	0,508	0,439	2,543	0,508	0,481
1,855	0,508	0,440	2,562	0,508	0,479
1,874	0,508	0,437	2,581	0,508	0,487
1,893	0,508	0,442	2,600	0,508	0,479
1,912	0,508	0,447	2,619	0,508	0,476
1,931	0,508	0,446	2,772	0,508	0,491
1,950	0,508	0,450	3,346	0,507	0,505
1,969	0,508	0,450	3,920	0,506	0,506
1,988	0,508	0,442	-	-	-

Tableau a.15. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/Lr)$; $Q=0.085$
 $m^3/s ; h_v = 0.04 m$

x/Lr	h _{calc} /h _r	h _{mes} /h _r	x/Lr	h _{calc} /h _r	h _{mes} /h _r
0,1836	0,0756	0,0756	0,7161	0,0809	0,0805
0,2020	0,0758	0,0766	0,7345	0,0811	0,0808
0,2204	0,0760	0,0766	0,7529	0,0813	0,0797
0,2387	0,0762	0,0770	0,7712	0,0815	0,0815
0,2571	0,0764	0,0767	0,7896	0,0817	0,0826
0,2754	0,0766	0,0777	0,8080	0,0818	0,0817
0,2938	0,0767	0,0772	0,8263	0,0820	0,0836
0,3122	0,0769	0,0779	0,8447	0,0822	0,0855
0,3305	0,0771	0,0778	0,8630	0,0824	0,0902
0,3489	0,0773	0,0780	0,8814	0,0826	0,0876
0,3673	0,0775	0,0778	0,8998	0,0827	0,0969
0,3856	0,0777	0,0778	0,9181	0,0829	0,1007
0,4040	0,0778	0,0784	0,9365	0,0831	0,1005
0,4223	0,0780	0,0785	0,9549	0,0833	0,1341
0,4407	0,0782	0,0784	0,9732	0,0835	0,1338
0,4591	0,0784	0,0785	0,9916	0,0836	0,1597
0,4774	0,0786	0,0789	1,0100	0,0838	0,1636
0,4958	0,0787	0,0786	1,0283	0,0840	0,1733
0,5142	0,0789	0,0787	1,0467	0,0842	0,1904
0,5325	0,0791	0,0778	1,0650	0,0844	0,1988
0,5509	0,0793	0,0787	1,0834	0,0845	0,2087
0,5692	0,0795	0,0801	1,1018	0,0847	0,1995
0,5876	0,0797	0,0792	1,1201	0,0849	0,2191
0,6060	0,0798	0,0808	1,1385	0,0851	0,2141
0,6243	0,0800	0,0796	1,1569	0,0853	0,2028
0,6427	0,0802	0,0791	1,1752	0,0855	0,1960
0,6611	0,0804	0,0788	1,1936	0,0856	0,1940
0,6794	0,0806	0,0799	1,2119	0,0858	0,1852
0,6978	0,0807	0,0799	1,2303	0,0860	0,1846

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,2487	0,0862	0,1692	1,9281	0,4861	0,4180
1,2670	0,0864	0,1749	1,9465	0,4861	0,4192
1,2854	0,0865	0,1726	1,9648	0,4861	0,4226
1,3038	0,0867	0,1733	1,9832	0,4861	0,4170
1,3221	0,0869	0,1882	2,0015	0,4861	0,4325
1,3405	0,0871	0,2083	2,0199	0,4861	0,4254
1,3588	0,0873	0,2098	2,0383	0,4860	0,4339
1,3772	0,0874	0,2297	2,0566	0,4860	0,4265
1,3956	0,0876	0,2225	2,0750	0,4860	0,4287
1,4139	0,0878	0,2505	2,0934	0,4860	0,4313
1,4323	0,0880	0,2733	2,1117	0,4860	0,4257
1,4507	0,0882	0,2914	2,1301	0,4860	0,4279
1,4690	0,4866	0,2897	2,1484	0,4859	0,4274
1,4874	0,4865	0,2951	2,1668	0,4859	0,4258
1,5057	0,4865	0,3093	2,1852	0,4859	0,4221
1,5241	0,4865	0,3205	2,2035	0,4859	0,4234
1,5425	0,4865	0,3065	2,2219	0,4859	0,4235
1,5608	0,4865	0,3234	2,2403	0,4859	0,4322
1,5792	0,4865	0,3325	2,2586	0,4858	0,4330
1,5976	0,4864	0,3325	2,2770	0,4858	0,4359
1,6159	0,4864	0,3355	2,2953	0,4858	0,4415
1,6343	0,4864	0,3374	2,3137	0,4858	0,4436
1,6526	0,4864	0,3488	2,3321	0,4858	0,4433
1,6710	0,4864	0,3578	2,3504	0,4858	0,4511
1,6894	0,4864	0,3549	2,3688	0,4857	0,4540
1,7077	0,4863	0,3691	2,3872	0,4857	0,4617
1,7261	0,4863	0,3686	2,4055	0,4857	0,4604
1,7445	0,4863	0,3732	2,4239	0,4857	0,4641
1,7628	0,4863	0,3813	2,4422	0,4857	0,4730
1,7812	0,4863	0,3714	2,4606	0,4857	0,4686
1,7996	0,4863	0,3780	2,4790	0,4857	0,4695
1,8179	0,4862	0,3848	2,4973	0,4856	0,4674
1,8363	0,4862	0,3913	2,5157	0,4856	0,4674
1,8546	0,4862	0,3988	2,5341	0,4856	-
1,8730	0,4862	0,3937	2,5524	0,4856	-
1,8914	0,4862	0,4108	2,5708	0,4856	-
1,9097	0,4862	0,4024	2,5891	0,4856	-

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
2,6075	0,4855	-	3,2869	0,4849	-
2,6259	0,4855	-	3,3053	0,4849	-
2,6442	0,4855	-	3,3237	0,4849	-
2,6626	0,4855	0,4795	3,3420	0,4849	-
2,6810	0,4855	-	3,3604	0,4849	-
2,6993	0,4855	-	3,3787	0,4848	-
2,7177	0,4854	-	3,3971	0,4848	-
2,7361	0,4854	-	3,4155	0,4848	-
2,7544	0,4854	-	3,4338	0,4848	-
2,7728	0,4854	-	3,4522	0,4848	-
2,7911	0,4854	-	3,4706	0,4848	-
2,8095	0,4854	-	3,4889	0,4847	-
2,8279	0,4853	-	3,5073	0,4847	-
2,8462	0,4853	-	3,5256	0,4847	-
2,8646	0,4853	-	3,5440	0,4847	-
2,8830	0,4853	-	3,5624	0,4847	-
2,9013	0,4853	-	3,5807	0,4847	-
2,9197	0,4853	-	3,5991	0,4846	-
2,9380	0,4852	-	3,6175	0,4846	-
2,9564	0,4852	-	3,6358	0,4846	-
2,9748	0,4852	-	3,6542	0,4846	-
2,9931	0,4852	-	3,6726	0,4846	-
3,0115	0,4852	-	3,6909	0,4846	-
3,0299	0,4852	-	3,7093	0,4845	-
3,0482	0,4851	-	3,7276	0,4845	-
3,0666	0,4851	-	3,7460	0,4845	-
3,0849	0,4851	-	3,7644	0,4845	0,4845
3,1033	0,4851	-	-	-	-
3,1217	0,4851	-	-	-	-
3,1400	0,4851	-	-	-	-
3,1584	0,4850	-	-	-	-
3,1768	0,4850	-	-	-	-
3,1951	0,4850	-	-	-	-
3,2135	0,4850	0,4861	-	-	-
3,2318	0,4850	-	-	-	-
3,2502	0,4850	-	-	-	-
3,2686	0,4849	-	-	-	-

Tableau a.16. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/Lr)$; $Q=0.09$
 m^3/s ; $h_v=0.04$ m

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,1768	0,0648	0,0648	0,6894	0,0695	0,0742
0,1944	0,0649	0,0658	0,7070	0,0696	0,0724
0,2121	0,0651	0,0652	0,7247	0,0698	0,0738
0,2298	0,0653	0,0660	0,7424	0,0699	0,0873
0,2475	0,0654	0,0658	0,7601	0,0701	0,0808
0,2651	0,0656	0,0665	0,7778	0,0703	0,0986
0,2828	0,0658	0,0662	0,7954	0,0704	0,1038
0,3005	0,0659	0,0670	0,8131	0,0706	0,1139
0,3182	0,0661	0,0665	0,8308	0,0707	0,1235
0,3358	0,0662	0,0671	0,8485	0,0709	0,1300
0,3535	0,0664	0,0668	0,8661	0,0711	0,1272
0,3712	0,0666	0,0667	0,8838	0,0712	0,1414
0,3889	0,0667	0,0669	0,9015	0,0714	0,1523
0,4066	0,0669	0,0674	0,9192	0,0715	0,1600
0,4242	0,0670	0,0673	0,9368	0,0717	0,1770
0,4419	0,0672	0,0661	0,9545	0,0719	0,1805
0,4596	0,0674	0,0677	0,9722	0,0720	0,1884
0,4773	0,0675	0,0673	0,9899	0,0722	0,1997
0,4949	0,0677	0,0676	1,0075	0,0723	0,1875
0,5126	0,0679	0,0676	1,0252	0,0725	0,1921
0,5303	0,0680	0,0681	1,0429	0,0727	0,1961
0,5480	0,0682	0,0685	1,0606	0,0728	0,2073
0,5656	0,0683	0,0683	1,0782	0,0730	0,2273
0,5833	0,0685	0,0681	1,0959	0,0731	0,2350
0,6010	0,0687	0,0680	1,1136	0,0733	0,2342
0,6187	0,0688	0,0678	1,1313	0,0735	0,2599
0,6363	0,0690	0,0686	1,1490	0,0736	0,2592
0,6540	0,0691	0,0699	1,1666	0,0738	0,2425
0,6717	0,0693	0,0715	1,1843	0,0739	0,2528

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,2020	0,0741	0,2432	1,8560	0,4586	0,3941
1,2197	0,0743	0,2405	1,8737	0,4586	0,3888
1,2373	0,0744	0,2212	1,8914	0,4586	0,3924
1,2550	0,0746	0,2458	1,9090	0,4586	0,3957
1,2727	0,0747	0,2286	1,9267	0,4586	0,3907
1,2904	0,0749	0,2174	1,9444	0,4586	0,3998
1,3080	0,0751	0,2334	1,9621	0,4586	0,4025
1,3257	0,0752	0,2436	1,9797	0,4586	0,4068
1,3434	0,0754	0,2524	1,9974	0,4585	0,4147
1,3611	0,0755	0,2782	2,0151	0,4585	0,4195
1,3787	0,0757	0,2739	2,0328	0,4585	0,4105
1,3964	0,0758	0,2927	2,0504	0,4585	0,4181
1,4141	0,0760	0,2851	2,0681	0,4585	0,4186
1,4318	0,0762	0,3028	2,0858	0,4585	0,4177
1,4494	0,0763	0,3061	2,1035	0,4585	0,4162
1,4671	0,0765	0,3242	2,1211	0,4584	0,4112
1,4848	0,0766	0,3158	2,1388	0,4584	0,4126
1,5025	0,0768	0,3280	2,1565	0,4584	0,4185
1,5202	0,0770	0,3306	2,1742	0,4584	0,4169
1,5378	0,0771	0,3353	2,1918	0,4584	0,4126
1,5555	0,0773	0,3353	2,2095	0,4584	0,4144
1,5732	0,0774	0,3305	2,2272	0,4584	0,4165
1,5909	0,0776	0,3306	2,2449	0,4584	0,4245
1,6085	0,0778	0,3359	2,2626	0,4583	0,4219
1,6262	0,0779	0,3508	2,2802	0,4583	0,4268
1,6439	0,4588	0,3579	2,2979	0,4583	0,4290
1,6616	0,4588	0,3588	2,3156	0,4583	0,4318
1,6792	0,4588	0,3550	2,3333	0,4583	0,4365
1,6969	0,4588	0,3588	2,3509	0,4583	0,4359
1,7146	0,4588	0,3575	2,3686	0,4583	0,4402
1,7323	0,4587	0,3720	2,3863	0,4582	0,4439
1,7499	0,4587	0,3648	2,4040	0,4582	0,4422
1,7676	0,4587	0,3702	2,4216	0,4582	0,4485
1,7853	0,4587	0,3771	2,4393	0,4582	-
1,8030	0,4587	0,3815	2,4570	0,4582	-
1,8206	0,4587	0,3848	2,4747	0,4582	-
1,8383	0,4587	0,3981	2,4923	0,4582	-

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	-
2,5100	0,4582	-	3,1640	0,4577	-
2,5277	0,4581	-	3,1817	0,4576	-
2,5454	0,4581	-	3,1994	0,4576	-
2,5630	0,4581	0,4565	3,2171	0,4576	-
2,5807	0,4581	-	3,2347	0,4576	-
2,5984	0,4581	-	3,2524	0,4576	-
2,6161	0,4581	-	3,2701	0,4576	-
2,6338	0,4581	-	3,2878	0,4576	-
2,6514	0,4580	-	3,3054	0,4575	-
2,6691	0,4580	-	3,3231	0,4575	-
2,6868	0,4580	-	3,3408	0,4575	-
2,7045	0,4580	-	3,3585	0,4575	-
2,7221	0,4580	-	3,3762	0,4575	-
2,7398	0,4580	-	3,3938	0,4575	-
2,7575	0,4580	-	3,4115	0,4575	-
2,7752	0,4580	-	3,4292	0,4575	-
2,7928	0,4579	-	3,4469	0,4574	-
2,8105	0,4579	-	3,4645	0,4574	-
2,8282	0,4579	-	3,4822	0,4574	-
2,8459	0,4579	-	3,4999	0,4574	-
2,8635	0,4579	-	3,5176	0,4574	-
2,8812	0,4579	-	3,5352	0,4574	-
2,8989	0,4579	-	3,5529	0,4574	-
2,9166	0,4578	-	3,5706	0,4573	-
2,9342	0,4578	-	3,5883	0,4573	-
2,9519	0,4578	-	3,6059	0,4573	-
2,9696	0,4578	-	3,6236	0,4573	0,4573
2,9873	0,4578	-	-	-	-
3,0050	0,4578	-	-	-	-
3,0226	0,4578	-	-	-	-
3,0403	0,4577	-	-	-	-
3,0580	0,4577	-	-	-	-
3,0757	0,4577	-	-	-	-
3,0933	0,4577	0,4589	-	-	-
3,1110	0,4577	-	-	-	-
3,1287	0,4577	-	-	-	-
3,1464	0,4577	-	-	-	-

Variation des hauteurs mesurées et calculées du ressaut pour l'ouverture 0.05 m

Tableau a.17. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/Lr)$;

$$Q=0.09 \text{ m}^3/\text{s}; h_v=0.05 \text{ m}$$

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,1768	0,1278	0,1278	0,6894	0,1344	0,1318
0,1944	0,1280	0,1254	0,7070	0,1346	0,1373
0,2121	0,1282	0,1281	0,7247	0,1349	0,1293
0,2298	0,1284	0,1269	0,7424	0,1351	0,1349
0,2475	0,1287	0,1265	0,7601	0,1353	0,1516
0,2651	0,1289	0,1261	0,7778	0,1356	0,1467
0,2828	0,1291	0,1246	0,7954	0,1358	0,1458
0,3005	0,1294	0,1262	0,8131	0,1360	0,1735
0,3182	0,1296	0,1264	0,8308	0,1363	0,1713
0,3358	0,1298	0,1266	0,8485	0,1365	0,1393
0,3535	0,1301	0,1272	0,8661	0,1367	0,1469
0,3712	0,1303	0,1273	0,8838	0,5941	0,2027
0,3889	0,1305	0,1254	0,9015	0,5941	0,1853
0,4066	0,1307	0,1259	0,9192	0,5941	0,1887
0,4242	0,1310	0,1265	0,9368	0,5941	0,2154
0,4419	0,1312	0,1266	0,9545	0,5940	0,2117
0,4596	0,1314	0,1280	0,9722	0,5940	0,2507
0,4773	0,1317	0,1270	0,9899	0,5940	0,2911
0,4949	0,1319	0,1251	1,0075	0,5939	0,2541
0,5126	0,1321	0,1263	1,0252	0,5939	0,3043
0,5303	0,1323	0,1247	1,0429	0,5939	0,2428
0,5480	0,1326	0,1272	1,0606	0,5938	0,2942
0,5656	0,1328	0,1262	1,0782	0,5938	0,3021
0,5833	0,1330	0,1271	1,0959	0,5938	0,3267
0,6010	0,1333	0,1290	1,1136	0,5938	0,3598
0,6187	0,1335	0,1259	1,1313	0,5937	0,3164
0,6363	0,1337	0,1275	1,1490	0,5937	0,3593
0,6540	0,1340	0,1283	1,1666	0,5937	0,3631
0,6717	0,1342	0,1276	1,1843	0,5936	0,3518

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,2020	0,5936	0,3810	1,8560	0,5925	0,5318
1,2197	0,5936	0,3864	1,8737	0,5925	0,5251
1,2373	0,5936	0,3593	1,8914	0,5925	0,5564
1,2550	0,5935	0,4097	1,9090	0,5924	0,5224
1,2727	0,5935	0,4017	1,9267	0,5924	0,5616
1,2904	0,5935	0,4164	1,9444	0,5924	0,5298
1,3080	0,5934	0,4219	1,9621	0,5924	0,5516
1,3257	0,5934	0,4205	1,9797	0,5923	0,5395
1,3434	0,5934	0,4438	1,9974	0,5923	0,5480
1,3611	0,5934	0,4882	2,0151	0,5923	0,5489
1,3787	0,5933	0,4390	2,0328	0,5922	0,5579
1,3964	0,5933	0,4711	2,0504	0,5922	0,5629
1,4141	0,5933	0,4704	2,0681	0,5922	0,5573
1,4318	0,5932	0,4818	2,0858	0,5922	0,5653
1,4494	0,5932	0,4783	2,1035	0,5921	0,5598
1,4671	0,5932	0,4895	2,1211	0,5921	0,5770
1,4848	0,5931	0,4859	2,1388	0,5921	0,5562
1,5025	0,5931	0,4890	2,1565	0,5920	0,5580
1,5202	0,5931	0,4846	2,1742	0,5920	0,5668
1,5378	0,5931	0,4768	2,1918	0,5920	0,5636
1,5555	0,5930	0,4741	2,2095	0,5919	0,5643
1,5732	0,5930	0,4687	2,2272	0,5919	0,5719
1,5909	0,5930	0,4801	2,2449	0,5919	0,5817
1,6085	0,5929	0,4867	2,2626	0,5919	0,5660
1,6262	0,5929	0,5007	2,2802	0,5918	0,5854
1,6439	0,5929	0,5077	2,2979	0,5918	0,5741
1,6616	0,5929	0,4934	2,3156	0,5918	0,5733
1,6792	0,5928	0,5135	2,3333	0,5917	0,5833
1,6969	0,5928	0,5140	2,3509	0,5917	0,5803
1,7146	0,5928	0,5213	2,3686	0,5917	0,5798
1,7323	0,5927	0,5278	2,3863	0,5917	0,5816
1,7499	0,5927	0,5339	2,4040	0,5916	0,5724
1,7676	0,5927	0,5249	2,4216	0,5916	0,5818
1,7853	0,5927	0,5090	2,5630	0,5914	0,5826
1,8030	0,5926	0,5295	3,0933	0,5905	0,5880
1,8206	0,5926	0,5223	3,6236	0,5896	0,5896
1,8383	0,5926	0,5388	-	-	-

Tableau a.18. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L)$;

$$Q=0.1m^3/s; h_v=0.05 m$$

x/Lr	h _{calc} /h _r	h _{mes} /h _r	x/Lr	h _{calc} /h _r	h _{mes} /h _r
0,1648	0,1056	0,1056	0,6426	0,1111	0,1161
0,1812	0,1058	0,1059	0,6591	0,1113	0,1240
0,1977	0,1060	0,1061	0,6756	0,1115	0,1396
0,2142	0,1062	0,1054	0,6920	0,1117	0,1454
0,2307	0,1064	0,1058	0,7085	0,1119	0,1549
0,2472	0,1066	0,1068	0,7250	0,1121	0,1814
0,2636	0,1068	0,1063	0,7415	0,1123	0,1778
0,2801	0,1070	0,1057	0,7580	0,1124	0,2108
0,2966	0,1071	0,1072	0,7744	0,1126	0,2184
0,3131	0,1073	0,1071	0,7909	0,1128	0,2217
0,3295	0,1075	0,1064	0,8074	0,1130	0,2173
0,3460	0,1077	0,1072	0,8239	0,1132	0,2364
0,3625	0,1079	0,1067	0,8403	0,1134	0,2543
0,3790	0,1081	0,1069	0,8568	0,1136	0,2989
0,3955	0,1083	0,1068	0,8733	0,1138	0,2730
0,4119	0,1085	0,1076	0,8898	0,1140	0,2916
0,4284	0,1087	0,1059	0,9062	0,1141	0,2999
0,4449	0,1089	0,1073	0,9227	0,1143	0,3072
0,4614	0,1090	0,1082	0,9392	0,1145	0,3192
0,4778	0,1092	0,1124	0,9557	0,1147	0,3229
0,4943	0,1094	0,1107	0,9722	0,1149	0,3242
0,5108	0,1096	0,1085	0,9886	0,5570	0,3399
0,5273	0,1098	0,1116	1,0051	0,5570	0,3323
0,5437	0,1100	0,1121	1,0216	0,5570	0,3317
0,5602	0,1102	0,1121	1,0381	0,5569	0,3129
0,5767	0,1104	0,1117	1,0545	0,5569	0,3112
0,5932	0,1106	0,1124	1,0710	0,5569	0,2776
0,6097	0,1107	0,1099	1,0875	0,5569	0,2704
0,6261	0,1109	0,1137	1,1040	0,5568	0,2665

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,1205	0,5568	0,2805	1,7301	0,5560	0,4943
1,1369	0,5568	0,2970	1,7466	0,5560	0,4969
1,1534	0,5568	0,2869	1,7631	0,5560	0,4942
1,1699	0,5568	0,3089	1,7795	0,5560	0,5060
1,1864	0,5567	0,2982	1,7960	0,5560	0,5085
1,2028	0,5567	0,3078	1,8125	0,5559	0,5067
1,2193	0,5567	0,3113	1,8290	0,5559	0,5135
1,2358	0,5567	0,3245	1,8454	0,5559	0,5029
1,2523	0,5567	0,3231	1,8619	0,5559	0,5046
1,2687	0,5566	0,3282	1,8784	0,5559	0,5049
1,2852	0,5566	0,3276	1,8949	0,5558	0,4888
1,3017	0,5566	0,3372	1,9114	0,5558	0,4892
1,3182	0,5566	0,3499	1,9278	0,5558	0,5002
1,3347	0,5566	0,3662	1,9443	0,5558	0,5002
1,3511	0,5565	0,3934	1,9608	0,5558	0,4873
1,3676	0,5565	0,3768	1,9773	0,5557	0,5009
1,3841	0,5565	0,3975	1,9937	0,5557	0,5041
1,4006	0,5565	0,4076	2,0102	0,5557	0,5013
1,4170	0,5564	0,4264	2,0267	0,5557	0,5026
1,4335	0,5564	0,4279	2,0432	0,5556	0,5042
1,4500	0,5564	0,4438	2,0597	0,5556	0,5015
1,4665	0,5564	0,4326	2,0761	0,5556	0,5101
1,4829	0,5564	0,4346	2,0926	0,5556	0,5116
1,4994	0,5563	0,4392	2,1091	0,5556	0,5072
1,5159	0,5563	0,4524	2,1256	0,5555	0,5054
1,5324	0,5563	0,4505	2,1420	0,5555	0,5156
1,5489	0,5563	0,4601	2,1585	0,5555	0,5229
1,5653	0,5563	0,4627	2,1750	0,5555	0,5211
1,5818	0,5562	0,4718	2,1915	0,5555	0,5311
1,5983	0,5562	0,4817	2,2079	0,5554	0,5340
1,6148	0,5562	0,4695	2,2244	0,5554	0,5364
1,6312	0,5562	0,4806	2,2409	0,5554	0,5353
1,6477	0,5562	0,4832	2,2574	0,5554	0,5400
1,6642	0,5561	0,4871	2,3892	0,5552	0,5471
1,6807	0,5561	0,4883	2,8835	0,5546	0,5527
1,6972	0,5561	0,4963	3,3778	0,5539	0,5539
1,7136	0,5561	0,5001	-	-	-

Tableau a.19. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/Lr)$;

$$Q=0.106m^3/s; h_v=0.05m$$

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
0,158	0,095	0,095	0,618	0,100	0,097
0,174	0,095	0,095	0,634	0,100	0,097
0,190	0,095	0,095	0,650	0,100	0,098
0,206	0,095	0,095	0,666	0,100	0,098
0,222	0,095	0,094	0,682	0,100	0,098
0,238	0,096	0,095	0,697	0,101	0,097
0,254	0,096	0,095	0,713	0,101	0,098
0,269	0,096	0,095	0,729	0,101	0,100
0,285	0,096	0,096	0,745	0,101	0,100
0,301	0,096	0,096	0,761	0,101	0,101
0,317	0,096	0,095	0,777	0,101	0,108
0,333	0,097	0,098	0,792	0,102	0,116
0,349	0,097	0,095	0,808	0,102	0,123
0,365	0,097	0,096	0,824	0,102	0,129
0,380	0,097	0,096	0,840	0,102	0,173
0,396	0,097	0,096	0,856	0,102	0,172
0,412	0,097	0,096	0,872	0,102	0,171
0,428	0,098	0,095	0,888	0,103	0,179
0,444	0,098	0,097	0,903	0,103	0,182
0,460	0,098	0,095	0,919	0,103	0,191
0,475	0,098	0,096	0,935	0,103	0,217
0,491	0,098	0,096	0,951	0,103	0,221
0,507	0,098	0,096	0,967	0,103	0,246
0,523	0,099	0,097	0,983	0,104	0,253
0,539	0,099	0,096	0,999	0,104	0,249
0,555	0,099	0,097	1,014	0,104	0,258
0,571	0,099	0,098	1,030	0,104	0,266
0,586	0,099	0,097	1,046	0,104	0,274
0,602	0,099	0,098	1,062	0,104	0,292

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,078	0,105	0,300	1,664	0,533	0,435
1,094	0,105	0,318	1,680	0,533	0,431
1,109	0,105	0,337	1,696	0,533	0,440
1,125	0,105	0,333	1,712	0,533	0,444
1,141	0,105	0,327	1,728	0,533	0,437
1,157	0,105	0,337	1,743	0,533	0,443
1,173	0,106	0,345	1,759	0,533	0,454
1,189	0,106	0,351	1,775	0,533	0,462
1,205	0,106	0,354	1,791	0,533	0,461
1,220	0,106	0,362	1,807	0,533	0,458
1,236	0,106	0,369	1,823	0,533	0,459
1,252	0,107	0,376	1,839	0,533	0,466
1,268	0,107	0,382	1,854	0,533	0,475
1,284	0,107	0,377	1,870	0,533	0,475
1,300	0,107	0,398	1,886	0,533	0,484
1,316	0,107	0,403	1,902	0,533	0,488
1,331	0,107	0,393	1,918	0,533	0,488
1,347	0,108	0,397	1,934	0,532	0,490
1,363	0,108	0,404	1,949	0,532	0,488
1,379	0,108	0,428	1,965	0,532	0,490
1,395	0,108	0,365	1,981	0,532	0,504
1,411	0,533	0,356	1,997	0,532	0,494
1,426	0,533	0,359	2,013	0,532	0,497
1,442	0,533	0,364	2,029	0,532	0,501
1,458	0,533	0,362	2,045	0,532	0,503
1,474	0,533	0,350	2,060	0,532	0,507
1,490	0,533	0,371	2,076	0,532	0,500
1,506	0,533	0,374	2,092	0,532	0,501
1,522	0,533	0,381	2,108	0,532	0,512
1,537	0,533	0,382	2,124	0,532	0,513
1,553	0,533	0,391	2,140	0,532	0,511
1,569	0,533	0,394	2,156	0,532	0,509
1,585	0,533	0,404	2,171	0,532	0,513
1,601	0,533	0,419	2,187	0,532	0,527
1,617	0,533	0,441	2,203	0,532	-
1,632	0,533	0,429	2,219	0,532	-
1,648	0,533	0,440	2,235	0,532	-

Annexes A- Tableaux

x/L	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/L	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
2,251	0,532	-	2,837	0,531	-
2,266	0,532	-	2,853	0,531	-
2,282	0,532	-	2,869	0,531	-
2,298	0,532	0,527	2,885	0,531	-
2,314	0,532	-	2,900	0,531	-
2,330	0,532	-	2,916	0,531	-
2,346	0,532	-	2,932	0,531	-
2,362	0,532	-	2,948	0,531	-
2,377	0,532	-	2,964	0,531	-
2,393	0,532	-	2,980	0,531	-
2,409	0,532	-	2,996	0,531	-
2,425	0,532	-	3,011	0,531	-
2,441	0,532	-	3,027	0,531	-
2,457	0,532	-	3,043	0,531	-
2,473	0,532	-	3,059	0,531	-
2,488	0,532	-	3,075	0,531	-
2,504	0,532	-	3,091	0,531	-
2,520	0,532	-	3,106	0,531	-
2,536	0,532	-	3,122	0,531	-
2,552	0,532	-	3,138	0,531	-
2,568	0,532	-	3,154	0,531	-
2,583	0,532	-	3,170	0,531	-
2,599	0,532	-	3,186	0,531	-
2,615	0,532	-	3,202	0,531	-
2,631	0,532	-	3,217	0,531	-
2,647	0,532	-	3,233	0,531	-
2,663	0,532	-	3,249	0,531	0,531
2,679	0,532	-	-	-	-
2,694	0,532	-	-	-	-
2,710	0,532	-	-	-	-
2,726	0,532	-	-	-	-
2,742	0,532	-	-	-	-
2,758	0,532	-	-	-	-
2,774	0,531	0,533	-	-	-
2,789	0,531	-	-	-	-
2,805	0,531	-	-	-	-
2,821	0,531	-	-	-	-

Tableau a.20. Mesure expérimentales ayant servi au traçage du graphique de $h/h_r=f(x/L)$;

$$Q=0.11m^3/s; h_v=0.05 m$$

x/Lr	h _{calc} /h _r	h _{mes} /h _r	x/Lr	h _{calc} /h _r	h _{mes} /h _r
0,1546	0,0864	0,0864	0,6030	0,0911	0,1392
0,1701	0,0866	0,0872	0,6185	0,0913	0,1577
0,1856	0,0867	0,0862	0,6340	0,0914	0,1457
0,2010	0,0869	0,0882	0,6494	0,0916	0,1313
0,2165	0,0871	0,0872	0,6649	0,0917	0,1510
0,2319	0,0872	0,0872	0,6804	0,0919	0,1657
0,2474	0,0874	0,0873	0,6958	0,0921	0,1927
0,2629	0,0876	0,0874	0,7113	0,0922	0,2019
0,2783	0,0877	0,0878	0,7268	0,0924	0,1933
0,2938	0,0879	0,0878	0,7422	0,0925	0,2052
0,3093	0,0880	0,0888	0,7577	0,0927	0,1871
0,3247	0,0882	0,0874	0,7731	0,0929	0,2151
0,3402	0,0884	0,0885	0,7886	0,0930	0,1925
0,3556	0,0885	0,0879	0,8041	0,0932	0,1649
0,3711	0,0887	0,0878	0,8195	0,0933	0,1626
0,3866	0,0888	0,0880	0,8350	0,0935	0,1550
0,4020	0,0890	0,0893	0,8505	0,0937	0,1425
0,4175	0,0892	0,0903	0,8659	0,0938	0,1665
0,4330	0,0893	0,0905	0,8814	0,0940	0,1641
0,4484	0,0895	0,0897	0,8968	0,0941	0,1809
0,4639	0,0896	0,0887	0,9123	0,0943	0,1862
0,4793	0,0898	0,0920	0,9278	0,0945	0,1803
0,4948	0,0900	0,0918	0,9432	0,0946	0,1772
0,5103	0,0901	0,1061	0,9587	0,0948	0,1887
0,5257	0,0903	0,1030	0,9742	0,0950	0,1534
0,5412	0,0905	0,1095	0,9896	0,0951	0,1530
0,5567	0,0906	0,1067	1,0051	0,0953	0,1608
0,5721	0,0908	0,1207	1,0205	0,0954	0,1959
0,5876	0,0909	0,1369	1,0360	0,0956	0,1656

Annexes A- Tableaux

x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/Lr	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
1,0515	0,0958	0,1570	1,6236	0,5205	0,4107
1,0669	0,0959	0,1698	1,6391	0,5205	0,4215
1,0824	0,0961	0,1754	1,6545	0,5205	0,4191
1,0979	0,0962	0,1556	1,6700	0,5205	0,4181
1,1133	0,0964	0,1875	1,6854	0,5205	0,4302
1,1288	0,0966	0,2011	1,7009	0,5204	0,4289
1,1442	0,0967	0,2072	1,7164	0,5204	0,4248
1,1597	0,0969	0,2210	1,7318	0,5204	0,4122
1,1752	0,0970	0,2154	1,7473	0,5204	0,4167
1,1906	0,0972	0,2417	1,7628	0,5204	0,4166
1,2061	0,0974	0,2603	1,7782	0,5204	0,4190
1,2216	0,0975	0,2932	1,7937	0,5203	0,4236
1,2370	0,0977	0,2877	1,8091	0,5203	0,4201
1,2525	0,0978	0,3123	1,8246	0,5203	0,4129
1,2680	0,0980	0,3316	1,8401	0,5203	0,4265
1,2834	0,0982	0,3406	1,8555	0,5203	0,4200
1,2989	0,0983	0,3637	1,8710	0,5203	0,4120
1,3143	0,0985	0,3680	1,8865	0,5202	0,4221
1,3298	0,0986	0,3677	1,9019	0,5202	0,4263
1,3453	0,0988	0,3843	1,9174	0,5202	0,4405
1,3607	0,0990	0,4057	1,9329	0,5202	0,4443
1,3762	0,0991	0,4137	1,9483	0,5202	0,4362
1,3917	0,0993	0,4123	1,9638	0,5202	0,4490
1,4071	0,0994	0,4163	1,9792	0,5201	0,4601
1,4226	0,0996	0,4063	1,9947	0,5201	0,4711
1,4380	0,0998	0,4070	2,0102	0,5201	0,4711
1,4535	0,0999	0,4169	2,0256	0,5201	0,4703
1,4690	0,1001	0,4206	2,0411	0,5201	0,4742
1,4844	0,1002	0,4335	2,0566	0,5201	0,4851
1,4999	0,1004	0,4310	2,0720	0,5200	0,4853
1,5154	0,1006	0,4335	2,0875	0,5200	0,4916
1,5308	0,1007	0,4235	2,1029	0,5200	0,4957
1,5463	0,1009	0,4201	2,1184	0,5200	0,4960
1,5617	0,1010	0,4286	2,1339	0,5200	-
1,5772	0,1012	0,4147	2,1493	0,5200	-
1,5927	0,1014	0,4086	2,1648	0,5199	-
1,6081	0,5205	0,4133	2,1803	0,5199	-

Annexes A- Tableaux

x/L	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r	x/L	h_{calc}/h_r	h_{mes}/h_r
2,1957	0,5199	-	2,7678	0,5193	-
2,2112	0,5199	-	2,7833	0,5193	-
2,2266	0,5199	-	2,7988	0,5192	-
2,2421	0,5199	0,5083	2,8142	0,5192	-
2,2576	0,5198	-	2,8297	0,5192	-
2,2730	0,5198	-	2,8452	0,5192	-
2,2885	0,5198	-	2,8606	0,5192	-
2,3040	0,5198	-	2,8761	0,5192	-
2,3194	0,5198	-	2,8915	0,5191	-
2,3349	0,5198	-	2,9070	0,5191	-
2,3503	0,5197	-	2,9225	0,5191	-
2,3658	0,5197	-	2,9379	0,5191	-
2,3813	0,5197	-	2,9534	0,5191	-
2,3967	0,5197	-	2,9689	0,5191	-
2,4122	0,5197	-	2,9843	0,5190	-
2,4277	0,5197	-	2,9998	0,5190	-
2,4431	0,5196	-	3,0152	0,5190	-
2,4586	0,5196	-	3,0307	0,5190	-
2,4741	0,5196	-	3,0462	0,5190	-
2,4895	0,5196	-	3,0616	0,5190	-
2,5050	0,5196	-	3,0771	0,5189	-
2,5204	0,5195	-	3,0926	0,5189	-
2,5359	0,5195	-	3,1080	0,5189	-
2,5514	0,5195	-	3,1235	0,5189	-
2,5668	0,5195	-	3,1390	0,5189	-
2,5823	0,5195	-	3,1544	0,5189	-
2,5978	0,5195	-	3,1699	0,5188	0,5188
2,6132	0,5194	-	-	-	-
2,6287	0,5194	-	-	-	-
2,6441	0,5194	-	-	-	-
2,6596	0,5194	-	-	-	-
2,6751	0,5194	-	-	-	-
2,6905	0,5194	-	-	-	-
2,7060	0,5193	0,5206	-	-	-
2,7215	0,5193	-	-	-	-
2,7369	0,5193	-	-	-	-
2,7524	0,5193	-	-	-	-

Figures des ressauts hydrauliques formés dans le canal rectangulaire- vanne rectangulaire

Les quatre figures en dessous représentent les ressauts hydrauliques formés dans le canal rectangulaire en aval de la vanne rectangulaire, pour l'ouverture $h_v=0.02m$.



Figure b.1. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.0385m^3/s$; $h_v=0.02m$

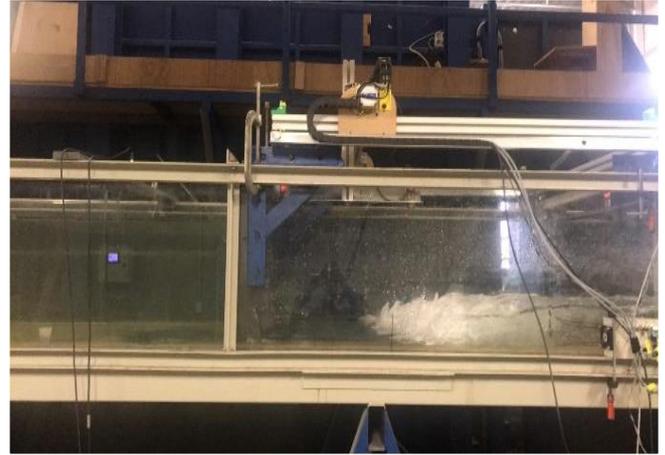


Figure b.2. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.042m^3/s$; $h_v=0.02m$

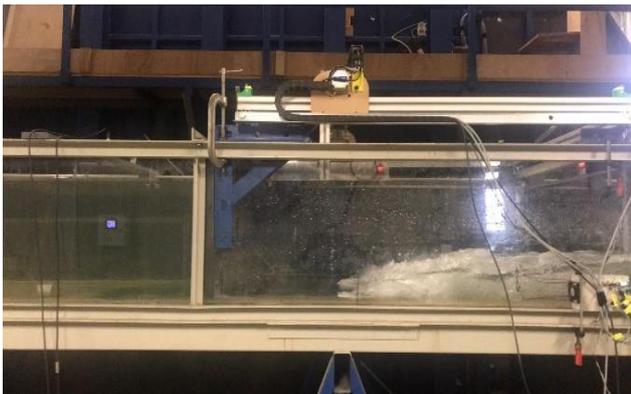


Figure b.3. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.045m^3/s$; $h_v=0.02m$

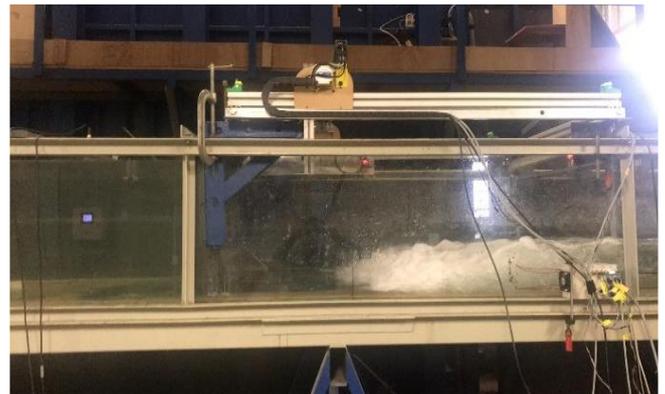


Figure b.4. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.0485 m^3/s$; $h_v=0.02m$

Les quatre figures en dessous représentent les ressauts hydrauliques formés dans le canal rectangulaire en aval de la vanne rectangulaire, pour l'ouverture $h_v=0.03\text{m}$.



Figure b.5. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.053 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$



Figure b.6. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.058 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$



Figure b.7. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.063 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$



Figure b.8. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.068 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.03\text{m}$

Les quatre figures en dessous représentent les ressauts hydrauliques formés dans le canal rectangulaire en aval de la vanne rectangulaire, pour l'ouverture $h_v=0.04m$.

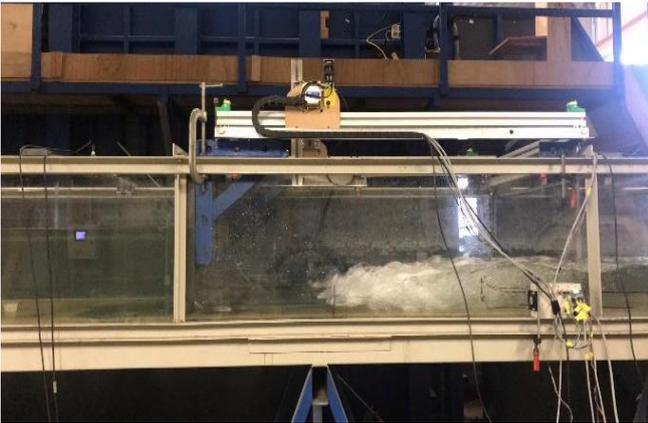


Figure b.9. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.07m^3/s$; $h_v=0.04m$

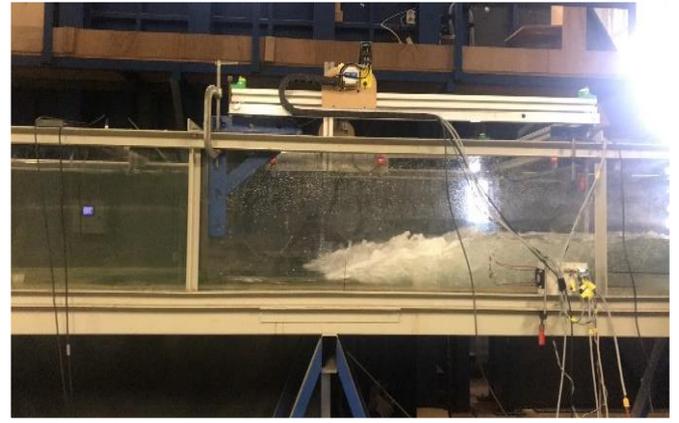


Figure b.10. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.08m^3/s$; $h_v=0.04m$



Figure b.11. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.085m^3/s$; $h_v=0.04m$

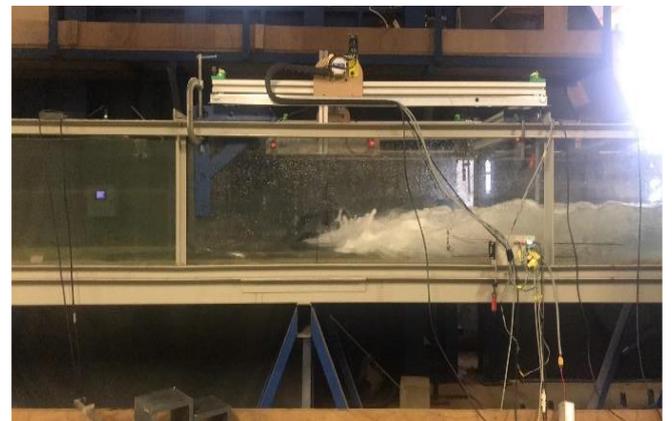


Figure b.12. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.09m^3/s$; $h_v=0.04m$

Les quatre figures en dessous représentent les ressauts hydrauliques formés dans le canal rectangulaire en aval de la vanne rectangulaire, pour l'ouverture $h_v=0.05m$.

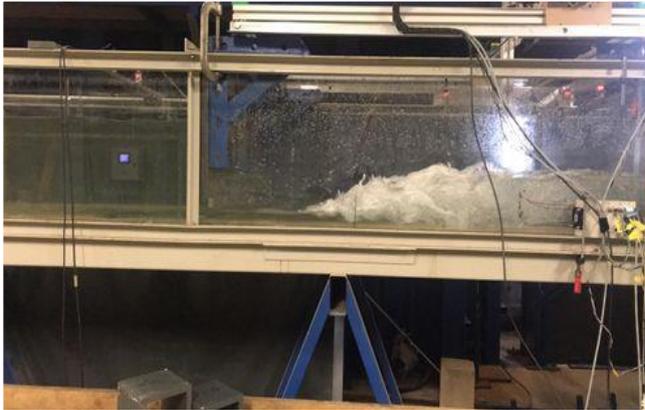


Figure b.13. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.09 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05m$



Figure b.14. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.1 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05m$

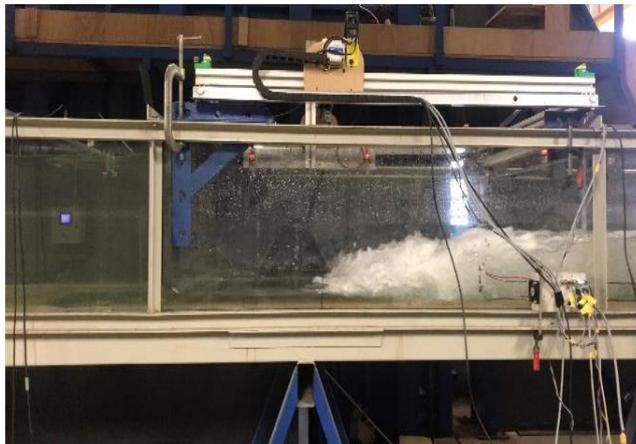


Figure b.15. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.106 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05m$

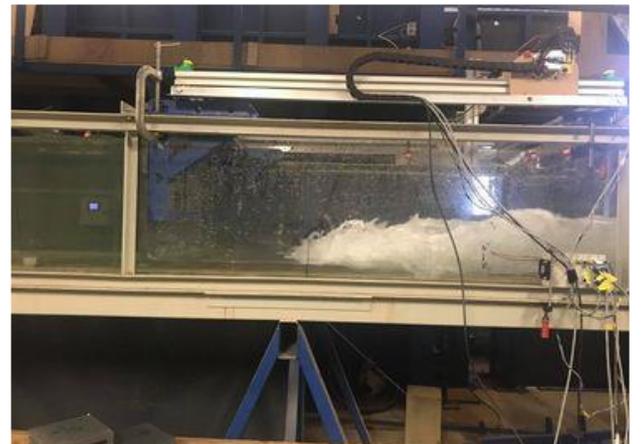


Figure b.16. Ressaut hydraulique formé dans un canal rectangulaire- vanne rectangulaire
 $Q= 0.11 \text{ m}^3/\text{s}$; $h_v=0.05m$