

Université Mohamed Khider – Biskra
Faculté des Sciences et de la technologie
Département de Génie civil et d'Hydraulique
Ref :



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم : الهندسة المدنية والري
المرجع:

Thèse présentée en vue de l'obtention
du Diplôme de
Doctorat en sciences
Spécialité : **Hydraulique**
Option : **Sciences Hydrauliques**

THÈME

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU RESSAUT
HYDRAULIQUE DANS QUELQUES TYPES DE
CANAUX PRISMATIQUES**

Présentée par :

HAFNAOUI MOHAMMED AMIN

Soutenue publiquement le : 28/06/2018

Devant le jury composé de :

Président :	OUAMANE Ahmed	Professeur	Université de Biskra
Encadreur :	DEBABECHE Mahmoud	Professeur	Université de Biskra
Co-Encadreur :	Rita CARVALHO	Professeur	Université de Coimbra
Examineur :	BOUZIANE Mohamed Toufik	Professeur	Université de Biskra
Examineur :	REMINI Boualem	Professeur	Université de Blida
Examineur :	GHOMRI Ali	M.C. (A)	Université d'El-Oued

SOMMAIRE

DÉDICACE.....	I
REMERCIEMENTS.....	II
RÉSUMÉ.....	III
LISTE DES FIGURES.....	V
LISTE DES TABLEAUX.....	IX
INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	01

Première Partie

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION À LA PREMIÈRE PARTIE.....	04
I. REVUE DE LA LITTÉRATURE.....	05
I.1. INTRODUCTION.....	05
I.2. GÉNÉRALITÉS SUR LES ÉCOULEMENTS À SURFACE LIBRE	05
I.2.1. La surface libre	05
I.2.2. Géométrie des canaux.....	05
I.2.3. Canal prismatique.....	06
I.2.4. Types d'écoulement.....	07
I.2.4.1. Variabilité dans le temps.....	07
I.2.4.2. Variabilité dans l'espace.....	07
I.2.5. Ressaut hydraulique.....	08
I.3. LES ÉQUATIONS DE BARRÉ SAINT-VENANT	09
I.3.1. Volume et système de contrôle.....	09
I.3.2. Équation de la conservation de masse.....	10
I.3.3. Équation de la conservation de quantité de mouvement.....	11
I.3.4. Forme conservative et non conservative.....	12
I.4. RÉOLUTION NUMÉRIQUE DU SYSTÈME DE BARRÉ SAINT-VENANT	13
I.4.1. La méthode des différences finies.....	13
I.4.2. la méthode des éléments finis.....	14
I.4.3. La méthode des volumes finis.....	14
I.4.4. La méthode des caractéristiques.....	14

I.4.5. schémas par différences finies.....	15
I.4.5.1. Stabilité.....	16
I.4.5.2. Résolution du système par schéma explicite.....	16
I.4.5.2.1. Schéma de Lax.....	17
I.4.5.2.2. Schéma de Lax-Wendroff.....	18
I.4.5.2.3. Schéma de McCormack.....	19
I.4.5.2. Résolution du système par un schéma implicite.....	21
I.4.5.2.1. Schéma de Preissmann.....	21
I.4.6. Schémas à haute résolution.....	22
I.4.6.1. Extension TVD du schéma de MacCormack.....	23
1.5. CONCLUSION.....	24

II. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

II.1. INTRODUCTION.....	25
II.2. ÉTUDE DE HAGER ET AL. (1990).....	25
II.2.1. Ressaut hydraulique classique.....	25
II.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	26
II.2.3. Formes du ressaut hydraulique.....	27
II.2.4. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	29
II.2.4.1. Longueur du rouleau.....	29
II.2.4.2. Longueur du ressaut.....	30
II.2.5. Rendement du ressaut.....	31
II.3. ÉTUDE DE HAGER (1992).....	31
II.3.1. Procédure expérimentale.....	32
II.3.2. Analyse des données.....	32
II.4. ÉTUDE DE GHARANGIK ET CHAUDHRY (1991).....	33
II.4.1. Équations de Boussinesq.....	33
II.4.2. Solution numérique.....	34
II.4.3. Conditions initiales et aux limites.....	35
II.4.4. Conditions de Stabilité.....	36
II.4.5. Procédure expérimental.....	36
II.4.6. Modèle Numérique.....	37
II.4.7. Procédure de calcul.....	37
II.4.8. Résultats.....	38

II.5. ÉTUDE DE CARVALHO ET AL. (2008).....	40
II.5.1. Procédure expérimentale.....	40
II.5.2. Modèle Mathématique.....	41
II.5.3. Simulations numériques et résultats.....	42
II.6. CONCLUSION.....	46

Deuxième Partie

CONTRIBUTION À LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS QUELQUES TYPES DE CANAUX PRISMATIQUES

INTRODUCTION À LA DEUXIÈME PARTIE	47
III. PROGRAMMATION DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ DANS UN CANAL TRIANGULAIRE	48
III.1. INTRODUCTION.....	48
III.2. TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX	48
III.2.1. ÉTUDE DE ACHOUR ET DEBABECHE (2003).....	48
III.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	49
III.2.1.2. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude.....	49
III.2.1.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut.....	49
III.2.2. ÉTUDE DE DEBABECHE ET ACHOUR (2007).....	49
III.2.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	50
III.2.2.2. Hauteur relative du seuil.....	50
III.2.2.3. Longueur relative du bassin.....	50
III.2.3. LES TRAVAUX DE BABECHE ET AL.....	51
III.2.3.1. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses (2006).....	52
III.2.3.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	52
III.2.3.1.2. Longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	52
III.2.3.1.3. Rendement du ressaut hydraulique.....	52
III.2.3.2. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire forcé par marche positive (2008).....	53
III.2.3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	53
III.2.3.2.2. Hauteur relative du seuil et de la marche.....	54
III.2.3.2.3. Longueur relative du bassin.....	54
III.2.3.2.4. Rendement du ressaut hydraulique.....	55
III.2.3.3. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente positive (2009).....	55
III.2.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	55
III.2.3.3.2. hauteur relative du seuil h_s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	55
III.2.3.3.3. Longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	55
III.2.3.3.4. Longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1	56

III.2.3.3.5. Rendement du ressaut hydraulique.....	56
III.2.3.4. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente négative (2010).....	56
III.2.3.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	56
III.2.3.4.2. Hauteur relative du seuil h_s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1	57
III.2.3.4.3. Longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	57
III.2.3.4.4. Longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1	57
III.2.3.4.5. Rendement du ressaut hydraulique.....	57
III.3. PROGRAMMATION EN LANGAGE FORTRAN	58
III.3.1. Structure générale du programme.....	59
III.3.2. Interface du programme.....	60
III.3.3. Introduire les données.....	60
III.3.4. Les résultats.....	61
III.3.5. Les messages d'erreurs.....	62
III.4. Conclusion.....	64
IV. MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE	66
IV.1. INTRODUCTION.....	66
IV.2. APPLICATION.....	66
IV.2.1. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial.....	67
IV.2.2. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial-Torrentiel	70
IV.2.3. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial- Torrentiel-Fluvial.....	72
IV.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE	75
IV.3.1. Impact des paramètres hydrauliques et numériques sur la localisation du ressaut hydraulique.....	75
IV.3.1.1. L'effet du changement du pas d'espace Δx	77
IV.3.1.2. L'effet du changement du coefficient de la quantité de mouvement β	77
IV.3.1.3. L'effet du changement du coefficient de la rugosité de Manning n	79
IV.3.1.4. Utilisation de l'extension de haute résolution TVD du schéma de MacCormack.....	81
IV.3.1.5. Variation du profil de surface en fonction du temps.....	83
IV.3.1.6. Variation du débit, la Vitesse et le Nombre de Froude.....	83
IV.3.2. Localisation du ressaut hydraulique.....	85
IV.3.2.1. Description des essais expérimentaux.....	85

IV.3.2.2. Simulation numérique.....	86
IV.4. DÉPLACEMENT DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE.....	87
IV.4.1. Description des essais expérimentaux.....	88
IV.4.2. Simulation numérique.....	90
IV.4.3. Analyse et discussion.....	96
IV.4.4. Résultats.....	99
IV.5. CONCLUSION.....	103
V. ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET NUMERIQUE SUR LE DÉPLACEMENT D'UN RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE EN PRÉSENCE D'UN OBSTACLE	104
V.1. INTRODUCTION.....	104
V.2. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE	104
V.2.1. Description du canal.....	104
V.2.2. Mesure du débit.....	106
V.2.3. Limnimétrie.....	106
V.3. ÉTUDE EXPÉRIMENTAL	107
V.3.1. Description des essais.....	107
V.3.2. Résultats expérimentaux.....	109
V.3.2.1. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1	109
V.3.2.2. Déplacement L_c du ressaut hydraulique en fonction de ses caractéristiques.....	112
V.4. MODÉLISATION NUMÉRIQUE	115
V.4.1. Application.....	116
V.4.2. Analyse et résultats.....	117
V.5. CONCLUSION.....	120
CONCLUSION GÉNÉRALE	122
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	125
PRINCIPALES NOTATIONS.....	129

إهداء

أهدي هذا العمل إلى صاحبي الفضل عليّ، والديّ الكريمين، راجيا لهما طول العمر

و الصحة و العافية، آملا أن أكون قد حققت لهما و لو جزءا يسيرا من أمانيهما،

أهدي هذا العمل أيضا إلى زوجتي و أولادي : ملاك و آدم متمنيا لهما النجاح في

دراستهما و التوفيق في حياتهما، كما أهدي هذا العمل إلى كل إخوتي و أخواتي.

Remerciements

Je tiens tout d'abord à exprimer mes profonds remerciements à mon directeur de thèse, Monsieur DEBABECHE Mahmoud, professeur à l'université de Biskra, pour ses conseils, sa patience et son aide durant toute la période de la réalisation de la thèse. Je tiens également à remercier chaleureusement ma co-encadrante, Madame Rita CARVALHO, professeur à l'université de Coimbra, pour son accueil, ses orientations, sa disponibilité ainsi que pour son encouragement me donnant un grand soutien pour finaliser ma thèse.

Mes remerciements vont également au président du jury, Monsieur OUAMANE Ahmed, professeur à l'université de Biskra, pour m'avoir fait l'honneur d'accepter de présider ce jury.

Je remercie aussi tous les membres du jury, Monsieur BOUZIANE Mohamed Toufik, professeur à l'université de Biskra, Monsieur REMINI Boualem, professeur à l'université de Blida et Monsieur GHOMRI Ali, maître de conférences à l'université d'El-Oued, qui m'ont fait l'honneur d'accepter de juger cette thèse.

ملخص

في هذا العمل سوف يتم عرض نموذج رقمي لدراسة القفزة الهيدروليكية في بعض القنوات المنشورية، هذا النموذج يعتمد أساسا على حل معادلات باري سانت فنون التي تستعمل في النمذجة الرقمية للجريان السطحي. إنجاز هذا النموذج الرقمي تم باستعمال مخطط ماك كورماك الكلاسيكي ثم تم تطويره بإضافة التمدد TVD عالي الدقة، تم التحقق من صحة هذا النموذج عن طريق تجارب عملية أنجزت في المخبر.

عدة علاقات رياضية تم إيجادها انطلاقا من التجارب العملية، هذه العلاقات تمت مقارنتها مع النموذج الرقمي المطور بهدف تحديد مكان و كذا تنقل القفزة المائية في القنوات المنشورية مستطيلة و مثلثية الشكل.

بالموازاة مع ذلك، تم إنجاز برنامج بلغة الفورتران لحساب خصائص القفزة المائية في القناة مثلثية الشكل.

كلمات مفتاحية

القفزة المائية، النمذجة الرقمية، معادلات باري سانت فنون، مخطط ماك كورماك، تمدد TVD

Résumé

Dans ce travail, il sera présenté un modèle numérique pour étudier le ressaut hydraulique dans quelques types des canaux prismatiques. Ce modèle numérique se base essentiellement sur la résolution numérique des équations de Barré Saint-Venant, qui sont utilisées pour la modélisation numérique des écoulements à surface libre. La réalisation de ce modèle numérique a été faite par l'utilisation du schéma classique de MacCormack, il l'a été développé par l'ajout de l'extension TVD de haute résolution. La validation de ce modèle numérique a été faite à partir des essais expérimentaux réalisés au laboratoire.

Plusieurs formules ont été trouvées, à partir d'essais expérimentaux. Celles si ont fait l'objet de comparaison avec le modèle numérique pour l'objectif de déterminer la localisation et le déplacement du ressaut hydraulique dans des canaux prismatiques de forme rectangulaire et triangulaire.

On outre, un programme en langage FORTRAN a été réalisé pour calculer les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire.

Mots clés

Ressaut hydraulique, modélisation numérique, les équations de Barré Saint-Venant, schéma de MacCormack, extension TVD.

Abstract

In this work, a numerical model will be presented to study the hydraulic jump in some types of prismatic channels. This numerical model is based essentially on the numerical resolution of the shallow water equations, that they are used for the numerical modeling of free-surface flows. The realization of this numerical model was made by the use of the classical MacCormack scheme; it was developed by the addition of the high-resolution TVD extension. The validation of this numerical model was made through the experimental tests achieved in the laboratory.

Several formulas have been found from the experimental tests, these formulas are compared with the numerical model for the purpose of determining the location and the displacement of the hydraulic jump in prismatic channels of rectangular and triangular shape.

In addition, a program in FORTRAN language was realized to calculate the characteristics of the hydraulic jump in the triangular channel.

Keywords

Hydraulic jump, numerical modeling, shallow water equations, MacCormack scheme, TVD extension.

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1	Types de canaux.....	05
Figure 1.2	Variabilité des écoulements dans le temps.....	07
Figure 1.3	Schéma des écoulements permanents, uniformes et variés.....	08
Figure 1.4	Volume et système de contrôle dans les instants t_0 et $t_0+\Delta t$	10
Figure 1.5	Schéma de Lax.....	17
Figure 1.6	Schéma de Lax-Wendroff.....	18
Figure 1.7	Schéma de McCormack (type progressive régressive).....	20
Figure 1.8	Schéma de McCormack pour (type régressive progressive).....	21
Figure 2.1	Ressaut hydraulique classique.....	26
Figure 2.2	Forme du ressaut classique.....	28
Figure 2.3	Ressaut hydraulique avec rouleau développé et non développé.....	29
Figure 2.4	Données expérimentales de Bakhmeteff et Matzke (1936).....	32
Figure 2.5	Schéma d'illustration.....	35
Figure 2.6	Modèle des essais expérimentaux.....	37
Figure 2.7	Profils de la surface d'eau à différents temps pour $F_1 = 7$	38
Figure 2.8	Profil du ressaut hydraulique pour $F_1 = 2,3$	39
Figure 2.9	Profil du ressaut hydraulique pour $F_1 = 7$	39
Figure 2.10	Géométrie du canal et les profondeurs d'écoulement	40
Figure 2.11	Canal de mesure	41
Figure 2.12	Détails de la surface libre et du champ de vitesse du ressaut hydraulique pour ($Fr = 6$)	43
Figure 2.13	Champ de vitesse et configuration de la surface libre	43
Figure 2.14	Partie détaillée du rouleau.....	43
Figure 2.15	Comparaison des profils de surface.....	44
Figure 2.16	Comparaison des profils de vitesse.....	45
Figure 2.17	Comparaison des valeurs de pression au fond du canal.....	45
Figure 3.1	Structure générale du programme	59
Figure 3.2	Interface du programme.....	60
Figure 3.3	Présentation des données.....	61
Figure 3.4	Présentation des résultats.....	62
Figure 3.5	Message d'erreurs pour la valeur de nombre Froude.....	63

Figure 3.6	Message d'erreurs pour l'angle d'inclinaison du canal.....	63
Figure 3.7	Message d'erreurs pour la rugosité absolue des parois du canal.....	64
Figure 4.1	Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial (F)	69
Figure 4.2	Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial - Torrentiel (F-T).....	72
Figure 4.3	Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial-Torrentiel-Fluvial (F-T-F).....	75
Figure 4.4	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $F_1 = 4,23$	77
Figure 4.5	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,15$ (m).....	78
Figure 4.6	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,3$ (m).....	78
Figure 4.7	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,5$ (m).....	79
Figure 4.8	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,15$ (m).....	80
Figure 4.9	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,3$ (m).....	80
Figure 4.10	Profil du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,5$ (m).....	80
Figure 4.11	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $n = 0,008$	81
Figure 4.12	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $n = 0,009$	82
Figure 4.13	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $n = 0,01$	82
Figure 4.14	Variation du profil de surface du ressaut hydraulique en fonction du temps.....	83
Figure 4.15	Variation du Débit.....	84
Figure 4.16	Variation de la vitesse.....	84
Figure 4.17	Variation du nombre de Froude.....	84
Figure 4.18	Photographie du canal de mesure utilisé.....	85
Figure 4.19	Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire (pente = 0).....	86
Figure 4.20	déplacement du ressaut hydraulique.....	87
Figure 4.21	Schéma simplifié du canal de mesure de section droite triangulaire, ayant servi à l'expérimentation.....	88
Figure 4.22	Photographie du canal de mesure utilisé.....	89
Figure 4.23	Ressaut hydraulique contrôlé à pente positive.....	89
Figure 4.24	Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0$).....	91
Figure 4.25	Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0,01$).....	92
Figure 4.26	Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0,02$).....	93

Figure 4.27	Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0,03$).....	94
Figure 4.28	Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0,04$).....	95
Figure 4.29	Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0,05$).....	96
Figure 4.30	Simulation numérique d'un ressaut hydraulique dans un canal triangulaire pour les pentes ($s = 0 ; 0,02 ; 0,05$).....	98
Figure 4.31	Variation des hauteurs conjuguées simulées en fonction du nombre de Froude et la pente s	99
Figure 4.32	Variation des hauteurs conjuguées expérimentales en fonction du nombre de Froude et la pente s	100
Figure 4.33	Relation entre les hauteurs conjuguées simulées en fonction du nombre de Froude F_1 et la pente s	101
Figure 4.34	Relation entre les hauteurs conjuguées expérimentales en fonction du nombre de Froude F_1 et la pente s	101
Figure 4.35	Variation entre la localisation du ressaut hydraulique L_c/h_1 en fonction de la différence h_d/h_1 et la pente s	102
Figure 4.36	Relation entre la localisation du ressaut hydraulique L_c/h_1 en fonction de la différence h_d/h_1 et la pente s	102
Figure 5.1	Photographie du canal de mesure utilisé (vu latérale).....	105
Figure 5.2	Photographie du canal de mesure utilisé (vu en plan).....	105
Figure 5.3	Photographie de la boîte en charge et vanne de manipulation.....	105
Figure 5.4	Déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale.....	105
Figure 5.5	Pompe centrifuge.....	105
Figure 5.6	Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....	107
Figure 5.7	Photographie d'un ressaut hydraulique pour $F_1 = 4,9$	108
Figure 5.8	Photographie d'un ressaut hydraulique pour $F_1 = 5,3$ (vu en plan).....	108
Figure 5.9	Variation du $Y-H_s$ en fonction du F_1	110
Figure 5.10	Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction du rapport des hauteurs conjuguées de la formule Y_{form} calculée selon la relation (5.2).....	111
Figure 5.11	Variation du $(L - L_c)/(Y_{exp} * h_s)$ en fonction du nombre de Froude F_1	112

Figure 5.12	Variation du $(L - L_{c_{form}})/(Y_{form} * h_s)$ en fonction du nombre de Froude F_1	114
Figure 5.13	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x=0,1$	116
Figure 5.14	Profil de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x=0,2$	117
Figure 5.15	Déplacement du ressaut hydraulique pour $h_1 = 0,037\text{m}$ et $h_s = 0,028\text{ m}$	118
Figure 5.16	Déplacement du ressaut hydraulique pour $h_1 = 0,0325\text{ m}$ et $h_s = 0,042\text{ m}$	119
Figure 5.17	Déplacement du ressaut hydraulique pour $h_1 = 0,0325\text{ m}$ et $h_s = 0,052\text{ m}$...	119
Figure 5.18	Déplacement du ressaut hydraulique pour $h_1 = 0,037\text{ m}$ et $h_s = 0,052\text{ m}$	120

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1	Éléments géométriques pour différentes section de canaux (Chow1959).....	06
Tableau 1.2	Coefficients de pondération des schémas aux différences finies.....	16
Tableau 3.1	Valeurs des constantes \bar{a} et \bar{b} de l'équation (3.7) pour les trois types de ressaut.....	51
Tableau 3.2	Valeurs des constantes \bar{a} et \bar{b} de l'équation (3.13) pour les deux types de ressaut.....	54
Tableau 4.1	Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial (F)...	67
Tableau 4.2	Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial-Torrentiel (F-T)	70
Tableau 4.3	Écoulement permanent en présence d'un obstacle en Régime Fluvial-Torrentiel-Fluvial (F-T-F).....	73
Tableau 4.4	Mesure de profil de surface du ressaut hydraulique pour $F_1 = 4,23$	76
Tableau 4.5	Caractéristiques de la simulation d'un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire.....	86
Tableau 4.6	Caractéristiques de la simulation d'un ressaut hydraulique dans un canal triangulaire.....	96
Tableau 5.1	Écarts relatifs en (%) entre Y_{exp} expérimentales et Y_{form} formule.....	111
Tableau 5.2	Écarts relatifs absolus en (%) entre Lc_{exp} expérimentaux et Lc_{form} formule.....	113
Tableau 5.3	Écarts relatifs absolus en (%) entre Lc_{exp} expérimentaux et Lc_{form} formule.....	115
Tableau 5.4	Caractéristiques et localisations du ressaut hydraulique.....	118

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La formation d'un ressaut hydraulique résulte de la transition rapide du régime d'écoulement torrentiel vers le régime fluvial, ce phénomène s'accompagne toujours d'une dissipation d'énergie.

Le bassin de dissipation d'énergie est la structure la plus utilisée pour la transformation d'un écoulement torrentiel à un écoulement fluvial. Le dimensionnement de ce bassin est basé essentiellement sur l'étude des caractéristiques du ressaut hydraulique.

Dans les dernières années le ressaut hydraulique a fait l'objet de plusieurs recherches expérimentales et numériques dans différents profils géométriques. Dans le domaine expérimental, nous citons les travaux de : Hager et Bretz (1987), Hager (1992), Ead et Rajaratnam (2002), Chanson (2009), qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal. Hager et Wanoschek (1987). Achour et Debabeche (2003) et Debabeche et Achour (2007), ont examiné le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire horizontal. Debabeche et al. (2009) ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire en pente. Dans le domaine numérique, nous citons aussi les travaux de: Chow (1959), Abbott et al. (1969), Mc-Corquodale et Khalifa (1983), ces derniers ont étudié la localisation du ressaut hydraulique. Gharangik et Chaudhry (1991) ont étudié l'effet du terme de Boussinesq sur l'emplacement du ressaut hydraulique. Garcia-Navarro et al. (1992) ont appliqué l'extension de haute résolution TVD du schéma de MacCormack pour simuler l'écoulement non permanent dans des canaux rectangulaires et trapézoïdaux. Carvalho et al. (2008), (2009), ainsi que Chanson et Carvalho (2015), ont étudié les caractéristiques du ressaut hydraulique à travers une comparaison entre deux modèles physique et numérique.

La modélisation numérique des écoulements à surface libre est importante pour connaître le comportement de l'écoulement à travers l'analyse de ses caractéristiques. Les équations Barré Saint-Venant comptent parmi les équations les plus utilisées dans ce domaine. La modélisation numérique des écoulements à surface est basée essentiellement sur la résolution numérique de ces équations à travers l'utilisation des méthodes numériques.

Le ressaut hydraulique fait partie des écoulements rapidement variés, cette propriété présente une difficulté pour le modéliser par des schémas numériques standards. Cela nous conduit à utiliser les schémas numériques de capture des chocs, ces derniers ont pour rôle de modéliser les écoulements graduellement et rapidement variés en même temps. L'un de ces

schémas utilisés est celui de MacCormack, ce schéma numérique est une partie de la méthode des différences finies, qui était utilisé dans plusieurs recherches. Parmi ces recherches on peut citer les travaux de : Gharangik et Chaudhry (1991) sur l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Berreksi et al. (2006) et (2011) sur l'analyse d'un écoulement torrentiel à surface libre en régime non permanent à travers un coursier à section transversale rectangulaire à forte pente. Le travail de Triki et al. (2010) sur l'étude d'un écoulement transitoire à surface libre provoqué par la superposition de deux régimes d'écoulements, l'un graduellement varié en amont et l'autre rapidement varié en aval.

La résolution des équations de Barré Saint-Venant par l'utilisation du schéma de MacCormack peut survenir des oscillations numériques le long des discontinuités. Pour minimiser ces oscillations, une extension de haute résolution du schéma de MacCormack classique basée sur la théorie de TVD (Total Variation Diminishing) est ajoutée. Cette théorie a été présentée la première fois par Garcia-Navarro et al. (1992), elle a été utilisée par Mendes (2001), Machalinska-Murawska et al. (2013), et elle a prouvé une efficacité pour diminuer les oscillations résultant par l'utilisation du schéma classique de MacCormack.

L'objectif de cette thèse est le développement d'un modèle numérique en MATLAB®, ce modèle se base sur la résolution des équations de Barré Saint-Venant 1D par l'utilisation du schéma classique de MacCormack ainsi que son extension TVD. A travers ce modèle nous pouvons déterminer la localisation, le déplacement et les caractéristiques du ressaut hydraulique dans quelques types de canaux prismatiques. La validation de ce modèle sera effectuée suite aux essais réalisés au laboratoire et les solutions analytiques trouvées. Les formules découvertes suite aux essais expérimentaux et les simulations numériques permettant la détermination du déplacement du ressaut hydraulique.

L'étude est composée de deux grandes parties :

- La première partie bibliographique et se divise en deux chapitres :

Dans le premier chapitre un aperçu général sur les équations de Barré Saint-Venant et les différentes méthodes numériques utilisées pour résoudre ces équations sera présenté.

Dans le deuxième chapitre on présentera les principaux travaux expérimentaux et numériques réalisés sur le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire.

- La deuxième partie concernera notre propre étude et se compose en trois chapitres :

Dans le premier chapitre on présentera un programme développé en langage Fortran qui permettra de calculer les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal

triangulaire, la réalisation de ce programme sera basée sur des formules développées à partir d'essais expérimentaux effectués au laboratoire.

Dans le deuxième chapitre on présentera un modèle numérique développé en MATLAB®. Dans ce modèle on utilisera au début le schéma classique de MacCormack, par la suite on lui ajoutera l'extension de haute résolution TVD. Dans un premier temps on présentera la validation du modèle numérique développé. Dans un deuxième temps une analyse sur l'effet de quelques paramètres numériques et hydrauliques sur la localisation du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire sera étudiée. Dans un troisième temps une étude sur le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente variable sera présentée.

Dans le troisième chapitre on présentera une étude sur le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle. Dans un premier lieu, une étude expérimentale sera présentée contenant la description des essais réalisés au laboratoire LARGHYDE. Dans un second lieu, des formules expérimentales découvertes à partir des essais expérimentaux seront présentées. En fin une comparaison entre les résultats expérimentaux obtenus et les formules théoriques trouvées avec le modèle numérique réalisé sera exposée.

Première Partie

SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION À LA PREMIÈRE PARTIE

Dans ces dernières années la modélisation numérique des écoulements à surface libre a connu un développement rapide et important en même temps, à travers différentes méthodes numériques utilisées pour résoudre les équations gouvernantes ce type d'écoulement. Les équations de Barré Saint-Venant sont parmi les équations les plus utilisées pour modéliser ce type d'écoulement.

Dans le premier chapitre, il sera présenté une description générale sur la formation de ces équations et les méthodes numériques utilisées pour les résoudre. La description sera orientée particulièrement sur les schémas numériques de la méthode des différences finie notamment le schéma de MacCormack et son extension TVD, qui sera utilisé pour la réalisation du modèle numérique dans la deuxième partie.

Il sera présenté, dans le deuxième chapitre, les recherches ayant abordé le ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire. Les travaux expérimentaux montrent particulièrement les caractéristiques et le profil de surface du ressaut hydraulique. D'un autre côté, il sera présenté des modèles numériques développés pour le ressaut hydraulique.

Chapitre I

REVUE DE LA LITTERATURE

I.1. INTRODUCTION

Dans ce chapitre il sera donné un aperçu général sur les écoulements à surface libre et les équations utilisées pour ce type d'écoulement avec leurs résolutions numériques, à partir des méthodes et schémas numériques. Dans un premier temps, seront décrits la géométrie des canaux et les types d'écoulements. Dans un second temps, seront présentées les équations de Barré Saint-Venant, composées par l'équation de la conservation de masse et l'équation de la quantité de mouvement. Enfin, il sera montré les méthodes numériques qui résolvent ces équations et pour cela on se basera sur le schéma classique de MacCormack et son extension TVD (Total Variation Diminishing).

I.2. GÉNÉRALITÉS SUR LES ÉCOULEMENTS À SURFACE LIBRE

I.2.1. La surface libre

La surface libre est habituellement soumise à la pression atmosphérique (Chaurdy 2008). On peut distinguer deux catégories de canaux: les canaux naturels et les canaux artificiels (Graf 2000). L'écoulement à surface libre se trouve dans les canaux naturels ou artificiels, couverts ou découverts. La figure (1.1) montre les différents types de canaux.

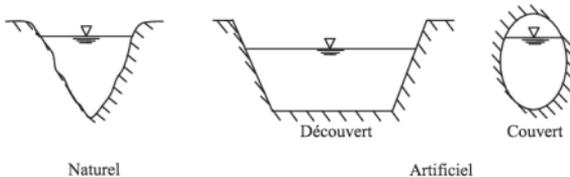


Figure 1.1. Types de canaux selon (Graf 2000).

I.2.2. Géométrie des canaux

Dans ce paragraphe, il sera défini les différents paramètres d'un écoulement dans une section. Les éléments géométriques d'une section, ou surface mouillée, A , sont les suivants (Graf 2000) :

- Le périmètre mouillé du canal P (m) formé par la longueur de la zone de contact entre l'eau et le canal de la surface mouillée.
- Le rayon hydraulique R_h (m), qui est le rapport de la surface mouillée A et le périmètre mouillé P. Il est écrit comme suit:

$$R_h = \frac{A}{P}$$

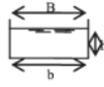
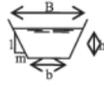
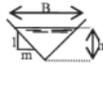
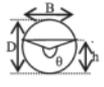
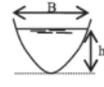
- La largeur au miroir ou la largeur superficielle B (m) du canal à sa surface libre.
- La profondeur hydraulique du canal D_h (m), qui est le rapport de la surface mouillée A et la largeur au miroir B. Il s'écrit comme suit:

$$D_h = \frac{A}{B}$$

- La profondeur h (m) ou la hauteur d'eau.

Le tableau (1.1) donne les formules des éléments géométriques pour cinq différents types de sections de canaux (Chow 1959).

Tableau 1.1. Eléments géométriques pour différentes sections de canaux (Chow 1959).

					
	Rectangle	Trapèze	Triangle	Cercle	Parabole
Surface A	bh	(b + mh)h	mh ²	$\frac{1}{8}(\theta - \sin\theta)D^2$	$\frac{2}{3}Bh$
Périmètre mouillé P	B + 2h	$b + 2h\sqrt{1 + m^2}$	$2h\sqrt{1 + m^2}$	$\frac{1}{2}\theta D$	$B + \frac{8h^2}{3}$
Rayon hydraulique R_h	$\frac{bh}{b + 2h}$	$\frac{(b + mh)h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}}$	$\frac{mh}{2\sqrt{1 + m^2}}$	$\frac{1}{4}\left[1 - \frac{\sin\theta}{\theta}\right]D$	$\frac{2B^2h}{3B^2 + 8h^2}$
Largeur B	b	b + 2mh	2mh	$\frac{(\sin\theta/2)D}{2\sqrt{h(D-h)}}$ ou $\frac{2S}{3h}$	$\frac{2S}{3h}$
Profondeur hydraulique D_h	h	$\frac{(b + mh)h}{b + 2mh}$	$\frac{1}{2}h$	$\left[\frac{\theta - \sin\theta}{\sin\theta/2}\right]\frac{D}{8}$	$\frac{2}{3}h$

* Valable pour $0 < \tau \leq 1$, avec $\tau = \frac{4h}{B}$. Si $\tau > 1$: $P = \left(\frac{B}{2}\right)\left[\sqrt{1 + \tau^2} + \frac{1}{\tau}\ln(\tau + \sqrt{1 + \tau^2})\right]$

1.2.3. Canal prismatique

Un canal est dit prismatique dans le cas où sa section transversale ne varie pas, la pente longitudinale et la rugosité restent constantes. Dans le cas contraire le canal est considéré comme non prismatique (Graf 2000).

1.2.4. Types d'écoulement

On peut classer les écoulements selon la variation de la profondeur h par rapport au temps et à l'espace.

1.2.4.1. Variabilité dans le temps

En réalité, l'écoulement dans les canaux est rarement permanent. Les variations temporelles sont souvent suffisamment lentes pour que l'écoulement puisse être considéré comme permanent, la figure (1.2) montre la variabilité des écoulements dans le temps (Graf 2000).

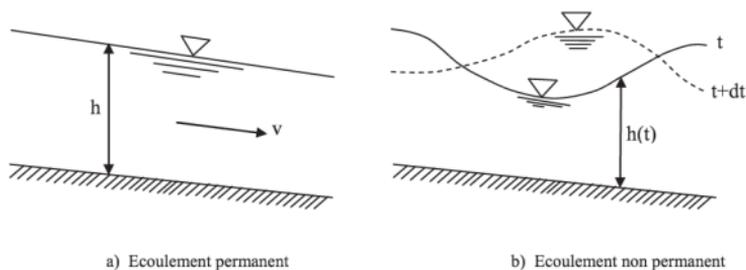


Figure 1.2. Variabilité des écoulements dans le temps selon (Graf 2000).

1.2.4.2. Variabilité dans l'espace

Pour un écoulement graduellement varié, accéléré ou décéléré, la profondeur h ainsi que les autres paramètres ne changent que très lentement d'une section à l'autre. Par contre, si l'écoulement est rapidement varié, la profondeur h ainsi que les autres paramètres changent brusquement, et parfois avec des discontinuités. On peut trouver cela dans les déversoirs, les rétrécissements, les ressauts hydrauliques ou dans les chutes brusques. La figure (1.3) montre la variabilité des écoulements dans l'espace. Un écoulement non uniforme peut être permanent ou non permanent (Graf 2000).

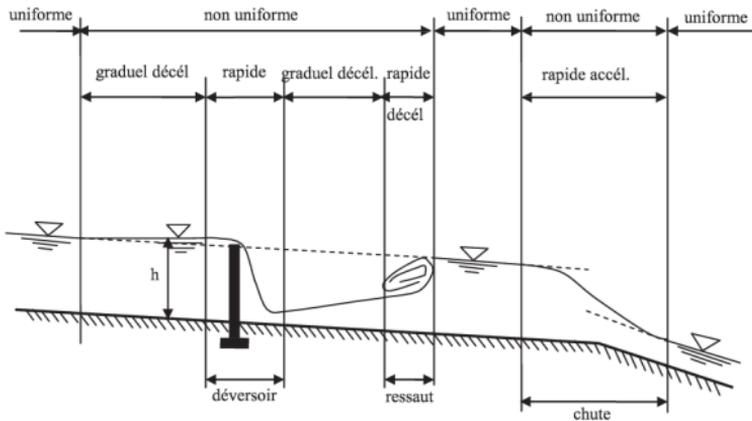


Figure 1.3. Schéma des écoulements permanents uniformes et variés selon (Graf 2000).

1.2.5. Ressaut hydraulique

Le ressaut hydraulique est défini comme le passage de l'écoulement torrentiel (supercritique) à l'écoulement fluvial (sous-critique). Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur L_r appelée longueur du rouleau (Hager 1990).

La condition d'écoulement est définie par le nombre de Froude

$$F_1 = v/c \quad (1)$$

Avec :

$v = Q/A$ est la vitesse moyenne de la section transversale et $c = \sqrt{gh}$ est la célérité de l'onde.

Les écoulements où $F_1 < 1$ sont référencés comme torrentiel, alors que l'écoulement est fluvial si $F > 1$. Pour $F = 1$ la vitesse d'écoulement est égale à la célérité de l'onde c , dans ce cas l'écoulement est dit critique (Hager 1990).

1.3. LES ÉQUATIONS DE BARRÉ SAINT-VENANT

Adhémar Jean-Claude Barré de Saint-Venant, ingénieur à l'école polytechnique en France, a présenté en 1871 des équations qui décrivent les écoulements à surface libre en eaux peu profondes qui portent son nom et elles sont connues aujourd'hui sous le nom d'équations de Saint-Venant, en anglais elles s'appellent "Shallow Water Equations". Ces équations sont obtenues à partir d'une intégration des équations de Navier-Stokes et elles occupent aujourd'hui une place très importante dans les études en hydraulique maritime ou fluviale (Shi Yu-e 2006).

Les équations de Barré Saint-Venant (1871) sont parmi les équations les plus utilisées pour modéliser les écoulements à surface libre graduellement et rapidement variés dans les canaux artificiels et naturels. Ces équations sont non linéaires et de type hyperbolique.

Les équations de Barré Saint-Venant sont composées de l'équation de la conservation de masse et l'équation de la quantité de mouvement.

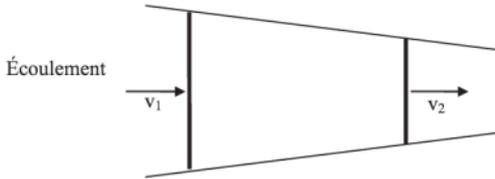
1.3.1. Volume et système de contrôle

Considérons, à un moment donné, un volume dans l'espace avec une forme arbitraire (volume de contrôle) traversé par un écoulement (système de contrôle). Toutes les lois basiques de la mécanique (conservation de la masse, conservation de la quantité de mouvement, etc.) s'appliquent au système de contrôle (Carmo 2004).

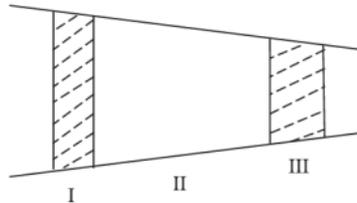
Dans un écoulement du fluide en général nous ne sommes pas intéressés à suivre le mouvement d'une particule isolée (utilisation des coordonnées lagrangiennes), mais l'écoulement global dans une région (utilisation de coordonnées eulériennes) (Carmo 2004).

Compte tenu de ces considérations, les lois basiques sont écrites pour les appliquer à des écoulements dans le système de contrôle.

Considérons un système de contrôle (sc) dans un écoulement. Posons un volume de contrôle (vc) qui coïncide avec le système de contrôle à l'instant t_0 (Fig.1.4). Un volume de contrôle est fixé par une limite dénommée surface de contrôle. Après le pas de temps Δt , c'est-à-dire au moment où le volume de contrôle reste à la même position, le système de contrôle (I+II) s'est déplacé pour occuper la position (II + III). On constate, pendant l'intervalle de temps que la masse contenue dans la zone (I) est entrée dans le volume de contrôle, et celle dans la zone (III) a quitté le volume de contrôle (Srinivas and Auld 2009).



a) Le volume et le système de contrôle coïncident au temps t_0



b) Au temps $t_0 + \Delta t$
 Le système de contrôle s'est déplacé à II+III.
 Le volume de contrôle reste au I+II.

Figure 1.4. Volume et système de contrôle dans les instants t_0 et $t_0 + \Delta t$ selon (Srinivas and Auld 2009).

La figure 1.4 montre la liaison entre le système et le volume de contrôle, cette liaison peut être présentée par une équation appelée l'équation de transport ou le théorème de Reynolds.

1.3.2. Équation de la conservation de masse (Carmo 2004)

Pour appliquer la loi de la conservation de masse, en considérant un système de masse fixe, la conservation de la masse du système de contrôle est donnée par la relation $\frac{dM_{sc}}{dt} = 0$. Le fluide est incompressible ($d\rho/dt = 0$), étant donné que $Q = Av$ avec $\partial A/\partial t = (\partial A/\partial h)(\partial h/\partial t)$ et $\partial A/\partial h = B(h)$.

La forme générale de l'équation de continuité ou de la conservation de masse peut être écrite comme suit :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0, \quad \text{ou} \quad \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1.2)$$

S'il existe un écoulement latéral q_1 , celui-ci est rajouté à la deuxième partie de l'équation de continuité :

$$\frac{\partial(A)}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = q_1 \quad (1.3)$$

1.3.3. Équation de conservation de la quantité de mouvement (Carmo 2004)

Par l'application de la seconde loi de Newton, la variation temporelle de la quantité de mouvement du système est égale à la somme de toutes les forces exercées sur le système de contrôle, à savoir $dM_{sc}/dt = \sum F$.

La forme générale de l'équation de conservation de la quantité de mouvement peut s'écrire comme suit :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(s - J) + gI_2 \quad (1.4)$$

Avec,

A: la surface de l'écoulement; Q: le débit ; t: temps ; x: abscisse dans l'espace ; I_1 : terme correspondant aux forces de pression agissant sur les sections aux extrémités amont et aval; I_2 : composante correspondant aux forces de pression agissant sur les parois latérales; J : perte de charge; g: accélération de la pesanteur; s: la pente du canal avec $s = -\frac{\partial \xi}{\partial x}$, où ξ est le niveau de l'élévation du canal.

La formule de Manning-Strickler est utilisée pour calculer la perte de charge J :

$$J = n^2 |Q| Q / (A^2 R_h^{4/3})$$

avec : n représente le coefficient de rugosité de Manning-Strickler.

Dans le cas des canaux à géométries simples, tels que les sections rectangulaire, triangulaire et trapézoïdale, en considérant que les parois sont symétriques, le terme I_1 peut être présenté comme suit (Mendes 2001) :

$$I_1 = \frac{b}{2} h^2 + \frac{m}{3} h^3$$

La composante I_2 peut être présentée sous la forme suivante :

$$I_2 = \int_0^{h(x,t)} [h(x,t) - \eta^*] \frac{\partial \sigma(x, \eta^*)}{\partial x} d\eta^*$$

Avec η^* est une variable d'intégration qui désigne la profondeur (l'élévation de la surface libre relativement à un niveau de référence) et σ est la largeur de la section variable.

Les équations (1.2) et (1.4) forment le système unidimensionnel des équations de Barré de Saint-Venant qui sont écrites sous certaines hypothèses qui sont les suivantes :

- L'écoulement est unidimensionnel, la masse volumique est constante, la distribution de vitesse est uniforme sur la section transversale et la surface libre est horizontale;
- La courbure des lignes de courant est très faible et les accélérations verticales sont négligeables ;
- La distribution des pressions est considérée comme hydrostatique dans une section ;
- La résistance à l'écoulement des lois dans les limites physiques sont analogues à l'écoulement uniforme;
- L'inclinaison de la pente est petite.

Le système d'équations de Barré Saint-Venant peut s'écrire sous la forme conservative comme suit :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0 \quad (1.5)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(s - J) + gI_2 \quad (1.6)$$

1.3.4. Forme conservative et non conservative

Les formes conservative et non conservative sont strictement équivalentes sur le plan mathématique tant que les solutions v et h sont continues. En revanche, dans le cas de solutions discontinues (formation d'un ressaut hydraulique par exemple), la forme non conservative fournit une solution fautive au niveau de la discontinuité. Pour la résolution numérique des équations, il est préférable d'employer la forme conservative lorsque des solutions discontinues sont possible (Ancy 2014).

Le système des équations de Barré Saint-Venant peut s'écrire sous la forme vectorielle comme suit :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{S} \quad (1.7)$$

où,

$$\mathbf{U} = \begin{Bmatrix} A \\ Q \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{Bmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A} + gI_1 \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{S} = \begin{Bmatrix} 0 \\ gA(s-1) + gI_2 \end{Bmatrix}; \quad (1.8)$$

Avec, \mathbf{U} : le vecteur écoulement ; \mathbf{F} : le vecteur flux et \mathbf{S} : vecteur source.

Une forme de conservation devrait être préférée, puisqu'elle conserve mieux les quantités et elle simule la célérité de la propagation des ondes plus précisément que la forme non conservative (Cunge et al. 1980 ; Miller et Chaudhry 1989).

1.4. RÉOLUTION NUMÉRIQUE DU SYSTÈME DE BARRÉ SAINT-VENANT

Les écoulements à surface libre sont régis par un système d'équations aux dérivées partielles du type hyperbolique non linéaire qui a rarement une solution théorique ; par conséquent et dans de tels cas, une solution numérique s'impose d'elle-même (Berreksi et al. 2011). Pour résoudre les équations du Barré Saint-Venant il existe plusieurs méthodes numériques qui sont utilisées pour traiter ces équations. On peut citer:

- La méthode des différences finies.
- La méthode des éléments finis;
- La méthode des volumes finis:
- La méthode des caractéristiques.

1.4.1. La méthode des différences finies

Les méthodes de résolution par différences finies sont les plus anciennes méthodes appliquées pour obtenir des solutions numériques d'équations différentielles. L'idée des méthodes de différences finies est simple puisqu'elle correspond à une estimation d'une dérivée par le rapport de deux différences selon la définition de la dérivée (Hirsch 1988).

Cette méthode est basée sur les propriétés des expansions de Taylor et sur l'application directe de la définition des dérivés.

I.4.2. la méthode des éléments finis

La méthode des éléments finis a été à l'origine du domaine de l'analyse de la structure, comme résultat pour de nombreuses années de recherche, principalement entre 1940 et 1960. Le concept des 'éléments' basé sur les techniques utilisés dans des calculs des contraintes, par lequel une structure a été subdivisée en petites sous-structures de diverses formes et réassemblées après que chaque 'élément' avait été analysé. Le développement de cette technique et son élaboration formelle ont conduit à l'introduction de ce que l'on appelle maintenant la méthode des éléments finis par Turner et al. (1956) dans un article traitant des propriétés d'un élément triangulaire dans des problèmes de contraintes planes. L'expression «éléments finis» a été présentée par Clough (1960).

L'application de la méthode des éléments finis pour les problèmes des écoulements des fluides a commencé par Temam en 1977 et Chung en 1978. (Hirsch 1988).

I.4.3. La méthode des volumes finis

La méthode des volumes finis a été présentée dans le domaine de la dynamique des fluides par McDonald (1971) et Mac-Cormack et Paullay (1972) pour la résolution des équations bidimensionnelles, et par la suite aux écoulements tridimensionnels par Rizzi et Inouye (1973). Elle consiste à la technique de la formulation intégrale des lois de conservation qui sont discrétisées directement dans l'espace physique. Elle peut être considérée comme une méthode de différences finies appliquée à la forme conservative différentielle des lois de conservation (Hirsch 1988).

I.4.4. La méthode des caractéristiques

Monge (1789) a développé une procédure graphique pour l'intégration des équations aux dérivées partielles. Il l'a appelé la méthode des caractéristiques. Elle a été utilisée pour étudier la propagation des ondes d'inondation et d'autres problèmes d'écoulement non permanent. Isaacson et al. (1954) ont élaboré et mis en œuvre un modèle numérique pour les profils d'inondations dans les rivières d'Ohio et Mississippi. Le concept de courbes caractéristiques est utile pour comprendre la propagation des ondes et le développement de conditions aux limites pour les méthodes de différences finies explicites (Chaurdy 2008).

1.4.5. Schémas par différences finies

La méthode des caractéristiques, la méthode des différences finies et la méthode des éléments finis ont été utilisées pour l'analyse du débit de canal ouvert non permanent. La méthode des éléments finis a été utilisée de façon limitée seulement pour l'analyse de canal ouvert (Katopodes 1984). Cette méthode n'offre aucun avantage significatif par rapport aux autres méthodes pour des problèmes d'écoulement unidimensionnel, et plusieurs difficultés apparaissent s'il existe un choc dans la solution (Chaurdy 2008). Pour cette raison on va concentrer notre recherche bibliographique sur la méthode des différences finies.

Il existe plusieurs schémas numériques de résolution par la méthode des différences finies. Cette méthode consiste à l'utilisation des opérateurs algébriques établis à partir de la série de Taylor et les remplacer par des opérateurs différentiels (Bertrand-Krajewski 2006).

On considère une fonction f de deux variables : une variable d'espace x et une variable de temps t : $f = f(x, t)$. Les dérivées partielles par rapport à x s'expriment de la manière suivante.

$$f(x + a) = f(x) + af'(x) + \frac{a^2}{2}f''(x) + \theta_1(a)$$

$$f(x - a) = f(x) - af'(x) + \frac{a^2}{2}f''(x) + \theta_2(a)$$

Avec a est le pas de discrétisation des schémas aux différences finies, en le remplaçant par Δx ; et $\theta_1(a)$, $\theta_2(a)$ indiquent des termes de troisième ordre ou d'ordre supérieur de a .

L'utilisation des schémas numériques explicites et implicites dépend du pas de temps Δt , calculé par rapport à x , si les valeurs de f sont calculées au pas de temps $k \Delta t$, on utilise des schémas explicites, lorsque les valeurs de f sont calculées au pas de temps $(k+1) \Delta t$ on utilise des schémas implicites (Bertrand-Krajewski, 2006).

Dans le cas le plus général, l'expression de la dérivée partielle f par rapport à x est donnée par Kovacs (1988) comme suit :

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \bar{\theta}_3 \frac{\bar{\theta}_1(f_{i+1}^{k+1} - f_i^{k+1}) + (1 - \bar{\theta}_1)(f_i^{k+1} - f_{i-1}^{k+1})}{\Delta x} + (1 - \bar{\theta}_3) \frac{(f_{i+1}^k - f_i^k) + (1 - \bar{\theta}_2)(f_i^k - f_{i-1}^k)}{\Delta x} \quad (1.9)$$

Avec i est l'indice relatif au pas d'espace Δx , k l'indice relatif au pas de temps Δt et $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2$ et $\bar{\theta}_3$ sont des coefficients de pondérations.

Le tableau (1.2) montre les différents schémas possibles selon les différents coefficients de pondérations effectués.

Tableau 1.2 : Coefficients de pondération des schémas aux différences finies selon (Kovacs 1988)

Pondération		Schéma
$\bar{\theta}_3 = 0$		explicite
$\bar{\theta}_3 = 0,5$		implicite centré dans le temps
$\bar{\theta}_3 = 1$		totalement implicite
$\bar{\theta}_1 = 1$, $\bar{\theta}_2 = 1$	progressif
$\bar{\theta}_1 = 0,5$, $\bar{\theta}_2 = 0,5$	centré
$\bar{\theta}_1 = 0$, $\bar{\theta}_2 = 0$	régressif
$\bar{\theta}_1 = 1$, $\bar{\theta}_2 = 0$	mixte décentré

L'expression de la relation générale de la dérivée partielle f par rapport à t est donnée comme suit :

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{\bar{\theta}_4(f_i^{k+1} - f_i^k) + (1 - \bar{\theta}_4)(f_{i+1}^{k+1} - f_{i-1}^k)}{\Delta t} \quad (1.10)$$

1.4.5.1. Stabilité

Pour la stabilité du schéma explicite, il est nécessaire que le nombre de Courant C_n soit inférieur ou égal à 1, le nombre de Courant C_n peut s'écrire comme suit :

$$C_n = \frac{|v| \pm c}{\Delta x / \Delta t}$$

où c représente la célérité de l'onde.

L'expression générale de la célérité peut s'écrire comme suit :

$$c^2 = gD_h \quad \text{Donc} \quad c = \pm \sqrt{gD_h}$$

Pour un canal à section rectangulaire, la célérité relative est donnée par :

$$c^2 = gh \quad \text{Donc} \quad c = \pm \sqrt{gh}$$

1.4.5.2. Résolution du système par schéma explicite

Les schémas aux différences finies sont explicites dans le cas où la dérivée partielle de f par rapport au temps t s'exprime en fonction des valeurs de f au pas de temps $k+1$, et que les différentielles de f par rapport à x s'expriment toutes en fonction des valeurs de f au pas de

temps précédent de calcul k (Kovacs, 1988). Le calcul des valeurs f_i^{k+1} basé sur la connaissance des valeurs f_i^k pour tous les pas d'espaces i-1, i, et i+1.

1.4.5.2.1. Schéma de Lax

Avec une petite modification, le schéma instable peut devenir stable dans le schéma de Lax. La figure (1.5) représente la procédure de calcul des variables pour le schéma de Lax qui se base sur le calcul de la valeur moyenne des points adjacents f_{i-1}^k, f_{i+1}^k et les remplacer dans f_i^k avec le même pas du temps k (Sturm 2001).

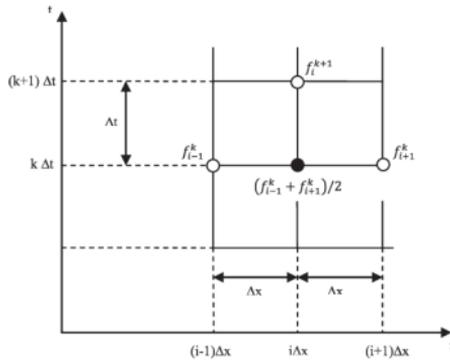


Figure 1.5. Schéma de Lax selon (Sturm 2001).

Le schéma de Lax sous la forme conservative pour un canal prismatique peut s'écrire à travers les équations de la conservation de masse et l'équation de la quantité de mouvement comme suit :

$$A_i^{k+1} = \frac{1}{2}(A_{i-1}^k + A_{i+1}^k) - \frac{\Delta t}{2\Delta x}(Q_{i+1}^k - Q_{i-1}^k) \quad (1.11)$$

$$Q_i^{k+1} = \frac{1}{2}(Q_{i-1}^k + Q_{i+1}^k) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[\left(\frac{Q^2}{A} + gA\bar{h} \right)_{i+1}^k - \left(\frac{Q^2}{A} + gA\bar{h} \right)_{i-1}^k \right] + \Delta t \left(\frac{\phi_{i+1}^k + \phi_{i-1}^k}{2} \right) \quad (1.12)$$

$$\text{Avec, } \phi = gA(S_0 - S_f)$$

Le schéma de Lax est stable lorsque la condition de Courant soit $(\Delta x)^2 / \Delta t$ est petite pour que les termes diffusifs n'influencent pas la solution (Sturm 2001).

1.4.5.2.2. Schéma de Lax-Wendroff

Le schéma de Lax-Wendroff est développé directement à partir d'une expansion de la série de Taylor dans la direction du temps t avec la combinaison des équations de la conservation de masse et l'équation de la quantité de mouvement (Sturm 2001).

Le schéma de Lax-Wendroff est appliqué en deux pas de temps, comme il est montré dans la figure (1.6).

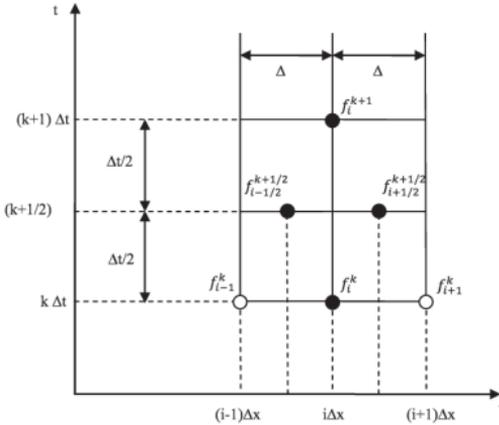


Figure 1.6. Schéma de Lax-Wendroff selon (Sturm 2001).

Avec l'application du schéma de Lax-Wendroff aux équations de la conservation de masse et la quantité de mouvement sous forme conservative dans la première étape, les équations s'écrivent comme suit (Sturm 2001):

$$A_{i+1/2}^{k+1/2} = \frac{1}{2}(A_{i+1}^k + A_i^k) - \frac{\Delta t}{2\Delta x}(Q_{i+1}^k - Q_i^k) \quad (1.13)$$

$$Q_{i+1/2}^{k+1/2} = \frac{1}{2}(Q_{i+1}^k + Q_i^k) - \frac{\Delta t}{2\Delta x} \left[\left(\frac{Q^2}{A} + gAh_c \right)_{i+1}^k - \left(\frac{Q^2}{A} + gAh_c \right)_i^k \right] + \frac{\Delta t}{2} \frac{(\phi_{i-1}^k + \phi_i^k)}{2} \quad (1.14)$$

Les équations (1.13) et (1.14) sont appliquées une deuxième fois pour obtenir les valeurs de A et Q au point de maille $(i - \frac{1}{2}, k + \frac{1}{2})$ comme il a été montré dans la figure (1.6). Dans la deuxième étape du schéma, les valeurs déterminées à l'étape de demi-temps sont utilisées pour le calcul de la deuxième étape comme suit (Sturm 2001):

$$A_i^{k+1} = A_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} (Q_{i+1/2}^{k+1/2} - Q_{i-1/2}^{k+1/2}) \quad (1.15)$$

$$Q_i^{k+1} = Q_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} \left[\left(\frac{Q^2}{A} + gAh_c \right)_{i+1/2}^{k+1/2} - \left(\frac{Q^2}{A} + gAh_c \right)_{i-1/2}^{k+1/2} \right] + \Delta t \frac{(\phi_{i+1/2}^{k+1/2} + \phi_{i-1/2}^{k+1/2})}{2} \quad (1.16)$$

1.4.5.2.3. Schéma de McCormack

Le schéma de MacCormack fait partie de la méthode des différences finies, il est basé sur le schéma de Lax-Wendroff qui résulte de l'expansion de second ordre de la série de Taylor dans le temps, la combinaison entre les discrétisations temporelles et spatiales assurant la précision du second ordre dans l'espace et le temps.

Les schémas de Lax-Wendroff et MacCormack ont fait partie des schémas de capture de choc. Leur principal avantage est la capacité à traiter simultanément des calculs des écoulements graduellement et rapidement variés, contenant des chocs ou des discontinuités.

Plusieurs auteurs ont utilisé ce schéma pour étudier l'écoulement à surface libre, on peut citer ; le travail de Gharangik et Chaudhry (1991), qui ont étudié l'effet du terme de Boussinesq sur l'emplacement du ressaut hydraulique. L'étude de Berreksi et al. (2006) et (2011), qui ont développé un modèle numérique 2D, pour l'objectif de traiter un écoulement torrentiel à surface libre en régime non permanent, à travers un coursier à section transversale rectangulaire et à forte pente. La validation de ce modèle a été faite à partir des mesures expérimentales et les résultats obtenus montrent une assez bonne concordance. L'étude de Triki et al. (2010), qui ont développé un modèle numérique permettant de décrire les écoulements non permanents à surface libre, l'application concerne le cas d'un écoulement transitoire à surface libre provoqué par la superposition de deux régimes d'écoulement, un écoulement graduellement varié à l'amont, et un écoulement rapidement varié à l'aval, afin d'examiner la superposition de ces deux régimes sur l'évolution des profondeurs en différentes sections du canal.

Le schéma de MacCormack est un schéma de deux-étapes de calcul explicite, qui est, initialement un calcul basé sur les valeurs des variables dans l'instant précédent (prédiction), ensuite une étape de correction basée sur les valeurs prédites (correction).

Une précision de sécurité plus élevée peut être obtenue par l'utilisation alternative progressive et régressive en deux étapes.

Pour l'application de la méthode MacCormack les équations de Barré Saint-Venant doivent être représentées sous forme conservative (Mendes 2001).

Les étapes de calcul Prédiction et Correction pour les différences progressives et régressives (figure 1.7) s'écrivent comme suit (Pinto 2004):

- Prédiction progressive

$$U_i^{(1)} = U_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{i+1}^k - F_i^k] + \Delta t S_i^k$$

- Correction régressive

$$U_i^{k+1} = \frac{1}{2} \left[U_i^k + U_i^{(1)} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_i^{(1)} - F_{i-1}^{(1)}) + \Delta t S_i^{(1)} \right] \quad (1.17)$$

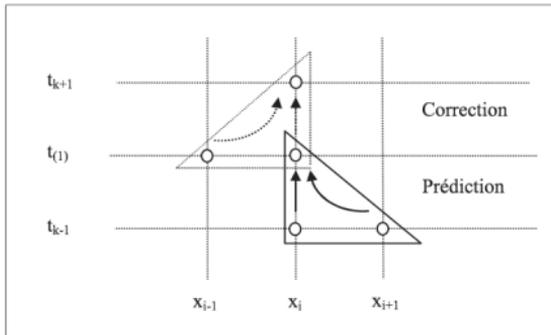


Figure 1.7. Schéma de MacCormack (type progressive régressive) selon (Pinto 2004).

L'exposant (1) représente les résultats obtenus dans l'étape intermédiaire (l'étape de prédiction), dans l'instant suivant on continue l'alternance,

Les étapes de calcul Prédiction et Correction pour les différences régressives et progressives (équations 1.8) s'écrivent comme suit :

- Prédiction régressive

$$U_i^{(1)} = U_i^k - \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_i^k - F_{i-1}^k] + \Delta t S_i^k$$

- Correction progressive:

$$U_i^{k+1} = \frac{1}{2} \left[U_i^k + U_i^{(1)} - \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i+1}^{(1)} - F_i^{(1)}) + \Delta t S_i^{(1)} \right] \quad (1.18)$$

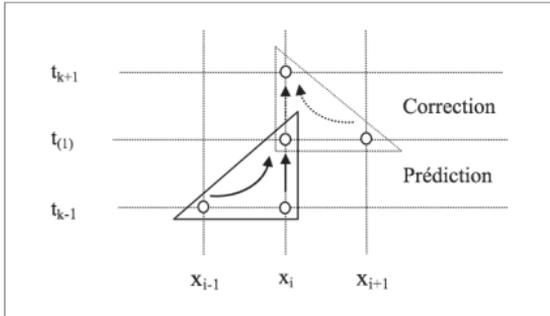


Figure 1.8. Schéma de McCormack pour (type régressive progressive) selon (Pinto 2004).

Cette méthodologie est cohérente et stable, et par conséquent convergente, la vérification des conditions de Courant-Friedrichs-Lewy (CFL) peut conduire à la formule suivante :

$$\frac{\Delta x}{\Delta t} \geq \max(|V| + \sqrt{gD_h})$$

1.4.5.3. Résolution du système par un schéma implicite

Dans les schémas des différences finies implicites, les dérivées partielles spatiales sont remplacées par des termes des valeurs au niveau de temps inconnu $k+1$. Les variables inconnues apparaissent donc implicitement dans les équations algébriques et les méthodes sont appelées méthodes implicites. Les équations algébriques pour l'ensemble du système doivent être résolues simultanément dans ces méthodes (Chaudry 2008).

1.4.5.3.1. Schéma de Preissmann

Le schéma de Preissmann a été largement utilisé en hydraulique pour les écoulements à surface libre depuis le début des années 1960. Les fronts d'ondes raides peuvent être correctement simulés en variant le coefficient de pondération. Le schéma donne une solution exacte d'une forme linéaire des équations gouvernantes pour une valeur particulière de Δx et Δt (Chaudry 2008).

Les dérivées partielles et les autres coefficients sont approximés comme suit:

$$\frac{\partial f}{\partial t} = \frac{(f_i^{k+1} + f_{i+1}^{k+1}) - (f_i^k + f_{i+1}^k)}{2\Delta t}$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\bar{\theta}(f_{i+1}^{k+1} - f_i^{k+1})}{\Delta x} + \frac{(1 - \bar{\theta})(f_{i+1}^k - f_i^k)}{\Delta x}$$

$$f = \frac{1}{2}\bar{\theta}(f_{i+1}^{k+1} - f_i^{k+1}) + \frac{1}{2}(1 - \bar{\theta})(f_{i+1}^k - f_i^k)$$

Le schéma peut devenir totalement explicite si $\bar{\theta} = 0$ ou implicite si $\bar{\theta} = 1$. Le schéma est stable si $0,55 < \bar{\theta} \leq 1$. Pour des applications typiques, on peut utiliser $\bar{\theta} = 0,6 - 0,7$.

1.4.6. Schémas à haute résolution

La résolution des équations de Barré Saint-Venant par la méthode de MacCormack peut faire apparaître des oscillations numériques le long des discontinuités. La discrétisation de ces équations a conduit à l'introduction des termes d'ordre supérieur aux équations, et donc introduit à des schémas numériques de haute fréquence. Pour la diminution de ces oscillations il a été proposé des schémas basés sur l'utilisation d'une viscosité artificielle. L'un de ces schémas est le schéma de Jameson, cette méthodologie est présentée par Chaudhry et Fennema (1986). Ce schéma facilite la solution aux points où il y a de fortes variations de la surface libre. Essentiellement, le schéma de Jameson consiste à incorporer des termes supplémentaires après les séquences de prévision et correction de la méthode classique de MacCormack (Carmo 2004).

En considérant les corrections U_i^{k+1} obtenues par (1.17) et (1.18) comme des approximations \tilde{U}_i^{k+1} , ensuite en introduisant des variables de calcul comme suit:

$$U_i^{k+1} = \tilde{U}_i^{k+1} + \varepsilon_{i+1/2} (\tilde{U}_{i+1}^{k+1} - \tilde{U}_i^{k+1}) - \varepsilon_{i-1/2} (\tilde{U}_i^{k+1} - \tilde{U}_{i-1}^{k+1}) \quad (1.19)$$

où,

$$\varepsilon_{i+1/2} = \varepsilon_d \max(\varepsilon_{i+1}, \varepsilon_i)$$

$$\varepsilon_{i-1/2} = \varepsilon_d \max(\varepsilon_i, \varepsilon_{i-1})$$

avec,

$$\varepsilon_i = \frac{\Delta x |h_{i+1} - 2h_i + h_{i-1}|}{\Delta t (h_{i+1} - 2h_i + h_{i-1})}$$

où, ε_d est un coefficient qui contrôle l'addition de viscosité numérique, avec des valeurs dépendantes des conditions spécifiques de chaque problème ($\varepsilon_d \approx 0,10 - 0,50$).

1.4.6.1. Extension TVD du schéma de MacCormack

L'extension de haute résolution du schéma de MacCormack basée sur la théorie de TVD (Total Variation Diminishing) est aussi utilisée pour la diminution des oscillations résultant de la méthode de MacCormack classique ou les mettre lisse (Carmo 2004), cette théorie a été présentée la première fois par Garcia-Navarro et al. (1992), pour l'objectif de faire une comparaison entre un schéma classique de MacCormack et l'extension TVD de ce schéma pour des canaux rectangulaires et trapézoïdaux avec pente et présence d'un ressaut hydraulique. Après une comparaison entre les deux schémas, les résultats ont montré une efficacité pour minimiser les oscillations par l'extension TVD du schéma de MacCormack. Mendes (2001), a utilisé le schéma de MacCormack avec l'extension TVD et le schéma de Roe, pour simuler les écoulements graduellement et rapidement variés. Les résultats ont montré la capacité de ces deux schémas à modéliser ces types des écoulements. Aussi, Machalinska-Murawska et al. (2013), ont fait une comparaison entre des simulations numériques des schémas de Lax-Wendroff, MacCormack classique et l'extension TVD du schéma de MacCormack pour des écoulements graduellement et rapidement variés dans un canal ouvert horizontal et sans frottement. Les résultats ont montré que pour l'écoulement graduellement varié les trois schémas donnent un bon accord avec la solution analytique, avec une précision plus élevée pour le schéma de MacCormack et son extension TVD. Pour l'écoulement rapidement varié les schémas de Lax-Wendroff et MacCormack n'ont pas donné de bons résultats à cause des oscillations qui apparaissent au niveau de la discontinuité, par contre le schéma TVD de MacCormack a donné un bon accord avec la solution analytique. Des simulations par la méthode des éléments finis ont été présentées dans cette étude, ont montré un bon accord avec la solution analytique pour l'écoulement graduellement varié. Il est noté que la méthode des éléments finis n'est pas efficace pour modéliser l'écoulement rapidement varié.

Pour écrire la forme générale de L'extension TVD du schéma de MacCormack, en considérant les corrections U_i^{k+1} obtenues par les équations (1.17) et (1.18) comme des approximations \tilde{U}_i^{k+1} . L'extension TVD du schéma de MacCormack peut s'écrire comme suit (Carmo 2004):

$$U_i^{k+1} = \tilde{U}_i^{k+1} + (\bar{R}_{i+1/2} \bar{D}_{i+1/2} - \bar{R}_{i-1/2} \bar{D}_{i-1/2}) \quad (1.20)$$

Dans laquelle \tilde{R} est une matrice correspondant à la matrice jacobéenne approchée, et \tilde{D} est une fonction de vecteur.

Les valeurs de $\tilde{R}_{i+\frac{1}{2}}$ $\tilde{D}_{i+\frac{1}{2}}$ peuvent être calculées en utilisant les valeurs de l'instant précédent ou les valeurs obtenues par l'étape de correction de la méthode classique de MacCormack.

1.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons donné un aperçu général sur la modélisation numérique des écoulements à surface libre, dans un premier temps il a été expliqué la géométrie des canaux et les types d'écoulements. Dans un deuxième temps, il a été abordé la formation des équations de Barré Saint-Venant. Dans un troisième temps, il a été présenté la résolution numérique de ces équations à traves des schémas numériques basés sur la méthode des différences finies. Une explication des schémas à haute résolution tel que l'extension TVD du schéma de MacCormack a été enfin donnée.

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

II.1. INTRODUCTION

Le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire a fait l'objet de plusieurs recherches, en raison de sa simplicité géométrique et la facilité de sa mise en œuvre. Dans ce chapitre nous allons donner un bref aperçu sur les travaux expérimentaux et numériques relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire. On va présenter quatre travaux qui sont les suivants :

- Le travail de Hager et al. (1990), concernant l'étude des caractéristiques du ressaut hydraulique classique.
- Le travail de Hager (1992), s'intéressant au développement d'une formule permettant de calculer le profil de surface du ressaut hydraulique classique.
- Le travail de Gharangik et Chaudhry (1991), concernant l'utilisation des équations de Boussinesq pour étudier numériquement le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire.
- Le travail de Carvalho et al. (2008), portant sur l'étude numérique du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire et la comparaison entre le modèle numérique développé avec les essais expérimentaux réalisés au laboratoire ainsi que la formule du profil de surface du ressaut présentée par Hager (1992).

II.2. ÉTUDE DE HAGER ET AL. (1990)

II.2.1. Ressaut hydraulique classique

Hager et al. (1990) ont étudié les caractéristiques du 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. L'étude du ressaut hydraulique que ce soit théorique ou expérimentale se base sur la détermination de ses caractéristiques et sa capacité de dissipation d'énergie.

La figure (2.1) montre un ressaut hydraulique classique, l'écoulement est caractérisé par la hauteur initiale h_1 et la vitesse moyenne $v_1 = Q/bh_1$.

tel que, le nombre de Froude $F_1 = v_1 / (gh_1)^{1/2} > 1$. Q représente le débit et b la largeur du canal rectangulaire.

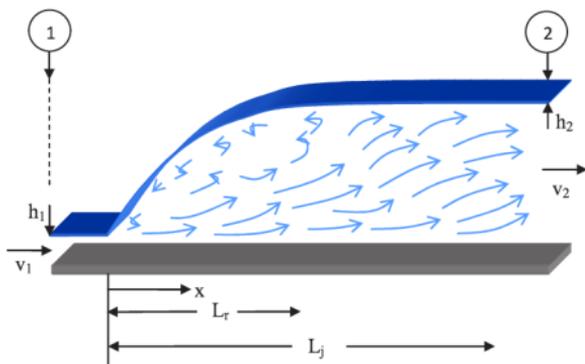


Figure 2 .1. Ressaut hydraulique classique.

Les caractéristiques du ressaut hydraulique sont :

- Les hauteurs conjuguées h_1 et h_2 : la hauteur initiale h_1 est mesurée au pied du ressaut hydraulique et la hauteur finale h_2 est mesurée à la fin du ressaut hydraulique où la surface libre d'écoulement prend une valeur maximale par rapport au fond du canal. Le rapport $Y = h_2/h_1$ est défini comme le rapport des hauteurs conjuguées.
- Les longueurs qui caractérisent le ressaut hydraulique sont : la longueur du rouleau L_r mesurée dans la zone où il y a un tourbillon d'eau au fond du canal, et la longueur du ressaut L_j mesurée entre les hauteurs initiale h_1 et finale h_2 du ressaut.

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge occasionnée entre les sections initiale et finale et la charge totale dans sa section initiale.

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un nombre de Froude $F_1 > 1$ étroitement lié au débit volume, à la hauteur initiale h_1 ainsi qu'à la forme géométrique du canal.

II.2.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation liant le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude F_1 .

En considérant un canal lisse et horizontal, l'application de l'équation de quantité de mouvement entre les sections initiale 1 et finale 2 du ressaut hydraulique mène à l'équation suivante :

$$\frac{1}{2} \rho g b h_1^2 + \rho Q v_1 = \frac{1}{2} \rho g b h_2^2 + \rho Q v_2 \quad (2.1)$$

Dans cette équation, on suppose que la distribution de la pression est hydrostatique, la distribution de la vitesse est uniforme et le frottement sur les parois est négligeable.

Le nombre de Froude caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut peut s'écrire comme suit :

$$F_1^2 = Q^2 / (g \cdot b^2 \cdot h_1^3) \quad (2.2)$$

La division de l'équation (2.1) par $(\frac{2}{\rho g b h_1^2})$ conduit à la relation suivante :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = 0.5 \left[\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (2.3)$$

Cette relation (2.3) permet de calculer le rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 . Elle est connue sous le nom d'équation de Bélanger. Pour des valeurs relativement grandes de nombre de Froude $F_1 > 2$, Hager et Sinniger (1985) ont développé une relation à partir de l'équation (2.3).

La relation approchée par Hager et Sinniger (1985) peut s'écrire comme suit :

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} * F_1 - \frac{1}{2} \quad (2.4)$$

II.2.3. Formes du ressaut hydraulique

Un ressaut hydraulique peut se produire sous quatre formes différentes. La classification du ressaut classique peut être donnée seulement en fonction du nombre de Froude F_1 .

Selon la classification de Bradley et Peterka (1957) les quatre types du ressaut classique sont :

a) Pour le nombre de Froude $1,7 < F_1 < 2,5$ (figure 2.2.a). Une série de petits rouleaux se développe sur la surface pour $F_1 = 1,7$, qui s'intensifient légèrement avec l'augmentation du nombre de Froude F_1 , ce type de ressaut appelé *Pré-ressaut*. Les pré-ressauts n'impliquent pas des problèmes particuliers pour les bassins de dissipations d'énergie, car la surface d'eau est

relativement lisse et la distribution de la vitesse est uniforme. Cependant, l'efficacité du ressaut est faible.

b) Pour le nombre de Froude $2,5 < F_1 < 4,5$ (figure 2.2.b). L'écoulement entrant oscille fortement du fond du canal à la surface sans période régulière. Chaque oscillation produit une grande vague de période irrégulière, ce qui peut provoquer une érosion des berges indésirable. Ce type de ressaut appelé *ressaut de transition*.

c) Pour le nombre de Froude $4,5 < F_1 < 9$ (figure 2.2.c). Le ressaut est caractérisé par une meilleure performance, car il a une dissipation d'énergie relativement élevée et une grande stabilité. Ce type de ressaut appelé *ressaut stable*, des efficacités comprises entre 45% et 70% peuvent être obtenues dans ce type de ressaut.

d) pour un nombre de Froude $F_1 > 9$ (figure 2.2.d). le jet à grande vitesse n'arrive plus à demeurer au fond du canal. La surface du ressaut est généralement très rugueuse, des ondes d'eau supplémentaires apparaissent à cause de la vitesse d'écoulement élevée et l'instabilité du ressaut. Ce type de ressaut appelé *ressaut agité ou clapoteux*.

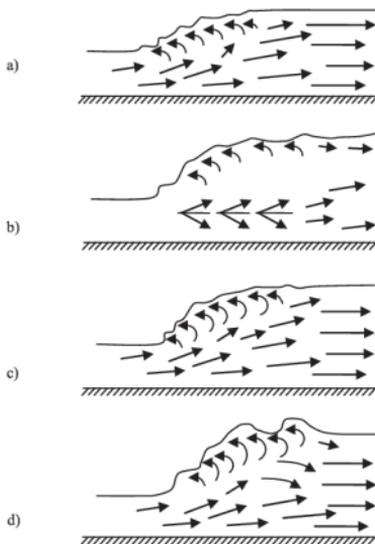


Figure 2.2: Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957).
a) Pré-ressaut, b) Ressaut de transition, c) Ressaut stable, d) Ressaut agité.

II.2.4. Longueurs caractéristiques du ressaut

Le ressaut hydraulique est caractérisé par la longueur L_r de son rouleau ainsi que par la longueur L_j sur laquelle il s'étend. Ces caractéristiques n'ont pu être évaluées que par la voie de l'expérimentation.

II.2.4.1. Longueur du rouleau

Hager et al. (1990) ont distingué deux longueurs de rouleau: rouleau développé et non développé selon le type du ressaut étudié, La figure (2.3) montre ces deux types des longueurs de rouleau L_r .

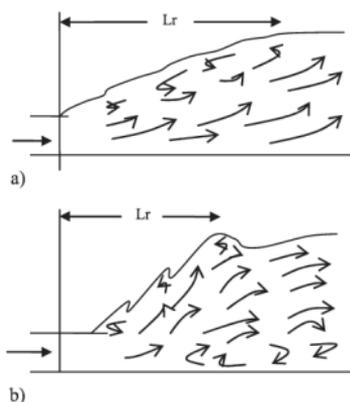


Figure 2.3 : ressaut hydraulique avec :
a) rouleau développé. b) rouleau non développé.

Les ressauts avec un rouleau développé sont relativement lisses et quasi-stables, se localisant au pied du ressaut. L'écoulement en amont reste près du fond puis se diverge en aval. À la fin du rouleau, le point de stagnation est clairement déterminé.

Le rouleau non-développé est beaucoup plus dynamique, il se déplace loin de pied du ressaut, une zone de rouleau se forme au fond de la masse liquide en mouvement. Des ondes de surface se sont produites à l'aval avec une réduction considérable de la longueur du rouleau par rapport à celle du rouleau développé.

Hager et al. (1990) ont découvert que le rapport $\lambda_r = L_r/h_1$ dépend principalement au nombre de Froude F_1 et le rapport $w = h_1/b$. D'après les essais effectués par Hager et al. (1990) les auteurs proposent les relations suivantes :

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = -12 + 160 \operatorname{Tgh} \left(\frac{F_1}{20} \right) \quad \text{pour } w = h_1/b < 0,1 \quad (2.5)$$

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = -12 + 160 \operatorname{Tgh} \left(\frac{F_1}{12,5} \right) \quad \text{pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (2.6)$$

telle que, « Tgh » désigne la tangente hyperbolique.

II.2.4.2. Longueur du ressaut

Plusieurs définitions ont été abordées pour la détermination de la longueur du ressaut L_j , d'une manière générale la longueur du ressaut L_j doit être mesurée dans la section finale à l'aval du ressaut en tenant compte de:

- La surface libre est pratiquement horizontale ;
- Une grande diminution de la surface de turbulence ;
- L'inexistence des grosses bulles d'air dues à la présence du rouleau de surface.
- L'apparition des conditions d'écoulement graduellement varié.

Toutes ces définitions ont pour but de spécifier la limite aval du ressaut et la turbulence d'écoulement, pour protéger le fond du canal contre l'érosion.

En pratique, une approche plus simple est généralement utilisée. La longueur du ressaut hydraulique est considérée comme distance nécessaire pour la protection du fond.

Selon les essais de Bradley et Peterka (1957), Hager et al. (1990) ont déterminé une relation permettant d'évaluer la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 . Cette relation peut s'écrire comme suit:

$$\frac{L_j}{h_1} = 220. \operatorname{Tgh} \left[\frac{F_1 - 1}{22} \right] \quad (2.7)$$

Une autre formule qui représente la longueur L_j du ressaut en fonction de la hauteur finale h_2 peut s'écrire comme suit:

$$L_j = 6h_2 \quad (2.8)$$

La gamme de nombre de Froude pour ces formules varie entre : $4 < F_1 < 12$.

II.2.5. Rendement du ressaut

Une perte de charge ΔH considérable s'est produite dans le ressaut hydraulique. Cette quantité peut être mesurée avec la charge totale par rapport au fond du canal.

$$H = h + \frac{Q^2}{2gA^2} \quad (2.9)$$

Les charges totales initiale et finale du ressaut peuvent s'écrire respectivement :

$$H_1 = h_1[1+F_1^2/2] \quad (2.10)$$

$$H_2 = h_1[Y+F_1^2/(2Y^2)] \quad (2.11)$$

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

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad (2.12)$$

On exprime souvent la capacité de dissipation du ressaut par le rapport $\eta = \Delta H/H_1$, qui représente en fait son rendement. Le rendement η s'écrit :

$$\begin{aligned} \eta &= \Delta H/H_1 = (H_1 - H_2)/H_1 \\ \eta &= 1 - [Y + F_1^2/(2Y^2)]/(1+F_1^2/2) \end{aligned} \quad (2.13)$$

Hager et Sinniger (1986) proposent une expression approchée pour calculer le rendement du ressaut hydraulique applicable pour $F_1 > 2$:

$$\eta = \left[1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right]^2 \quad (2.14)$$

L'équation (2.14) indique une petite efficacité pour les ressauts avec $F_1 < 3$. Pour $F_1 > 5$, plus de 50% d'énergie peut être dissipée.

II.3. ÉTUDE DE HAGER (1992)

Hager (1992) a développé une formule permettant de présenter le profil de surface libre pour un ressaut hydraulique classique, le développement de cette formule basé sur des données des essais expérimentaux réalisés par Hager et d'autres auteurs. Cette approche tient compte de la longueur de roulement et basée sur la formule (2.5) présentée précédemment.

II.3.1. Procédure expérimentale

Les essais expérimentaux ont été réalisés dans un canal rectangulaire lisse de 0,50 m de largeur et une hauteur de 0,70 m, placé en aval d'un déversoir d'une pente de 30°. Une gamme de nombres de Froude obtenue varie entre 2 et 10.

II.3.2. Analyse des données

La représentation des données est basée sur les coordonnées longitudinale X et verticale y qui sont présentées comme suit:

$$X = \frac{x}{L_r} \quad , \quad y = \frac{h-h_1}{h_2-h_1} \quad (2.15)$$

où x est la coordonnée horizontale prend pour origine le pied du ressaut

Le profil de surface libre du ressaut hydraulique classique présenté dans la figure (2.4), selon l'équation (2.15).

Les données des essais expérimentaux réalisés par Bakhmeteff et Matzke (1936) pour $4 < F_1 < 9$ s'adaptent à la relation suivante :

$$y = \tanh(1,5X) \quad (2.16)$$

La figure (2.4) montre que les données présentées pour les nombres de Froude donnent un raisonnable accord avec l'équation (2.16).

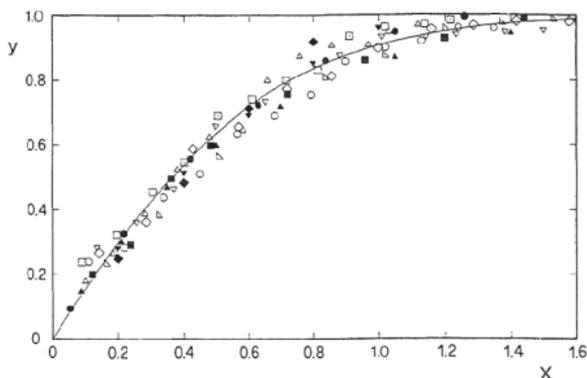


Figure 2.4. Données expérimentales de Bakhmeteff et Matzke (1936); $F_1 = 1.99$ (\blacktriangle), 2.92 (\blacksquare), 4.10 (\bullet), 5.52 (\blacktriangledown) et 8.64 (\blacklozenge); et pour Schröder (1963), $F_1 = 3.85$ (\triangle), 4.25 (\square), 4.8 (\circ), 5.41 (∇) et 6.06 (\diamond); (—) équation (2.16) selon (Hager 1992).

La relation (2.16) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{h-h_1}{h_2-h_1} = \tanh\left(1,5 \frac{x}{L_r}\right) \quad (2.17)$$

La comparaison des données de Bakhmeteff et Matzke (1936), de Schröder (1963) avec l'équation (2.17), présentée dans La figure (2.4) montre un accord global entre les données et l'équation (2.17).

La relation (2.17) développée par Hager nous permet de tracer le profil de surface libre d'un ressaut hydraulique classique, Le profil de surface obtenu à partir de cette équation correspond bien aux données expérimentales pour un intervalle des nombres de Froude entre 2 et 10. L'équation (2.17) peut être considérée comme un profil de ressaut classique universel.

II.4. ÉTUDE DE GHARANGIK ET CHAUDHRY (1991)

Gharangik et Chaudhry (1991) ont étudié numériquement le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, ils ont utilisé les équations de Boussinesq pour le but de déterminer l'effet du terme de Boussinesq sur l'emplacement du ressaut hydraulique. Pour résoudre ces équations les auteurs ont utilisé les schémas numériques de MacCormack et deux-quatre (two-four). Les équations de Boussinesq décrivent les écoulements unidimensionnels non permanent. Les écoulements rapidement variés sont intégrés numériquement pour simuler à la fois les écoulements fluviaux et torrentiels ainsi que la formation d'un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente faible.

II.4.1. Équations de Boussinesq

Les équations de Boussinesq basées sur les équations de Barré de Saint-Venant, un terme ajouté à ces équations permettant de prendre en considération les vitesses verticales résultant du changement rapide de l'écoulement dans le ressaut hydraulique. Ce terme est appelé le terme de Boussinesq.

Les équations de Boussinesq écrites sous certaines hypothèses qui sont les suivantes :

- La vitesse d'écoulement dans la direction verticale varie de zéro au fond du canal à une valeur maximale à la surface libre d'écoulement;
- Le canal est prismatique et la section transversale est rectangulaire;
- Le fluide est incompressible ;
- La vitesse d'écoulement dans la direction latérale est nulle;
- La pente du canal est faible.

- La vitesse d'écoulement dans la direction x est uniforme à la profondeur d'écoulement;
- Les pertes par frottement dans un écoulement non permanent peuvent être calculées en utilisant les formules de l'écoulement permanent.

Les équations de Boussinesq pour un écoulement unidimensionnel en forme vectorielle peuvent être écrites comme suit :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{S}$$

où

$$\mathbf{U} = \begin{Bmatrix} h \\ v h \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{F} = \begin{Bmatrix} v h \\ v^2 h + \frac{1}{2} g h^2 - \beta \end{Bmatrix}; \quad \mathbf{S} = \begin{Bmatrix} 0 \\ g h (s - j) \end{Bmatrix} \quad (2.18)$$

et

$$\beta = \frac{1}{3} h^3 \left[\frac{\partial^2 v}{\partial x \partial t} + u \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} - \left(\frac{\partial v}{\partial x} \right)^2 \right]$$

Dans cette équation, β est le terme de Boussinesq. Il est présenté par le terme de deuxième ordre de la distribution de pression le long de la profondeur d'eau. Il est clair que les équations (2.18) sont réduites à des équations de Barré Saint-Venant si le terme de Boussinesq β est supprimé dans ces équations.

II.4.2. Solution numérique

Gharangik et Chaudhry (1991) ont utilisé deux schémas numériques pour résoudre les équations de Boussinesq, le schéma de MacCormack et le schéma de deux-quatre (two-four). Le schéma explicite de MacCormack (MacCormack 1969) est de second ordre dans l'espace et dans le temps. Gottlieb et Turkel (1976) ont étendu ce schéma pour développer un schéma de deux-quatre (two-four), qui est de quatrième ordre dans l'espace et de second ordre dans le temps.

Les schémas numériques du premier et second ordre donnent des résultats satisfaisants pour la résolution des équations de Barré Saint-Venant. Cependant, les équations de Boussinesq décrivant l'écoulement rapidement varié ont des termes de troisième ordre.

Il est nécessaire d'utiliser des méthodes précises de troisième ou d'ordre supérieur pour résoudre ces équations numériquement. Pour cette raison, le schéma de deux-quatre développé par Gottlieb Turkel (1976) est utilisé pour résoudre ces équations à l'intérieur des nœuds de calcul.

Les approximations de différences finies suivantes sont utilisées dans le schéma de deux-quatre.

Prédiction

$$U_i^* = U_i^k + \frac{1}{6} \frac{\Delta t}{\Delta x} [F_{i+2}^k - 8F_{i+1}^k + 7F_i^k] + \Delta t S_i^k \quad (2.19)$$

Correction

$$U_i^{**} = \frac{1}{2} (U_i^* + U_i^k) + \frac{1}{12} \frac{\Delta t}{\Delta x} [-7F_i^* + 8F_{i-1}^* - F_{i-2}^*] + \frac{1}{2} \Delta t S_i^* \quad (2.20)$$

Le terme $\partial^2 v / \partial x^2$ est approximé par l'utilisation de la méthode des différences finies de trois-points central dans les deux parties prédiction et correction. Pour estimer le terme $(\partial v / \partial x)^2$, une approximation des différences finies vers l'avant dans la partie prédiction et une autre vers l'arrière dans la partie correction sont utilisées.

Pour minimiser les oscillations causées par les schémas numériques d'ordre supérieur Gharangik et Chaudhry (1991) ont introduit le paramètre de la viscosité artificielle.

II.4.3. Conditions initiales et aux limites :

Pour les conditions initiales, le débit à l'instant $t = 0$ est supposé supercritique dans la totalité du canal. Les mesures initiales commencent par la profondeur d'écoulement indiquée et la vitesse de la section 1 (figure 2.5), la profondeur et la vitesse d'écoulement initiale dans tous les nœuds de calcul sont déterminées par l'intégration numérique de l'équation décrivant l'écoulement graduellement varié.

$$\frac{dh}{dx} = \frac{s-j}{1 - \frac{v^2}{gh}} \quad (2.21)$$

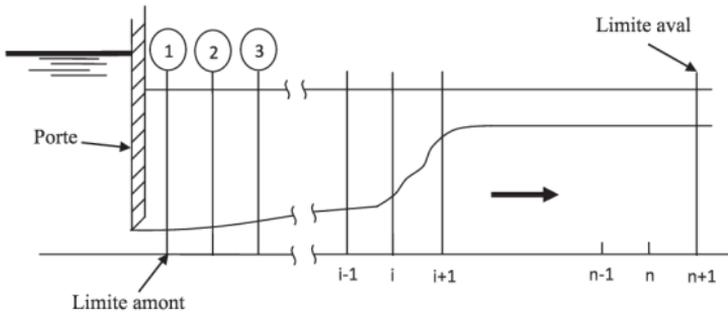


Figure 2.5. Schéma d'illustration selon (Gharangik et Chaudhry 1991).

Les conditions aux limites d'écoulement sont calculées comme suit :

À la limite amont la profondeur d'eau h et la vitesse v , sont égales à leurs valeurs initiales et elles restent inchangées pendant les calculs.

À la limite aval une profondeur d'eau constante est spécifiée et la vitesse d'écoulement est calculée à partir de la forme caractéristique, la vitesse v_{i+1}^{k+1} au pas du temps inconnu $k + 1$ est déterminé à partir de l'équation suivante: (Chaudhry, 1987)

$$v_{i+1}^{k+1} = v_i^k - \left(\frac{g}{c}\right)_i^k (h_{i+1}^{k+1} - h_i^k) + g\Delta t(s - f) \quad (2.22)$$

II.4.4. Conditions de Stabilité

Les schémas de MacCormack et deux-quatre sont stables si la condition CFL est satisfaite:

$$\Delta t = C_n \frac{\Delta x}{|v| + \sqrt{gh}} \quad (2.23)$$

Dans cette équation, le nombre de Courant C_n doit être inférieur ou égale à 1 pour le schéma de MacCormack et 2/3 pour le schéma de deux-quatre (Gottlieb et Turkel, 1976).

II.4.5. Procédure expérimental

Gharangik et Chaudhry (1991) ont utilisé pour les essais expérimentaux, un canal rectangulaire horizontal en métal de longueur de 14 m, une largeur de 0,46 m et une hauteur de 0,915 m (figure 2.6). Le canal est alimenté par un réservoir. Le ressaut a été formé à l'amont du canal dans une partie caractérisée par des parois vitrées de 3,05 m du long du canal, la profondeur d'eau est contrôlée par une porte en aval réglable. L'emplacement du ressaut varie en fonction du nombre de Froude et de la profondeur d'eau en aval.

Les essais ont été effectués avec un nombre de Froude varie entre 2,30 et 7,0. La distance $x = 0,305$ m représente la limite amont et elle est considérée comme un point de référence pour les mesures expérimentales.

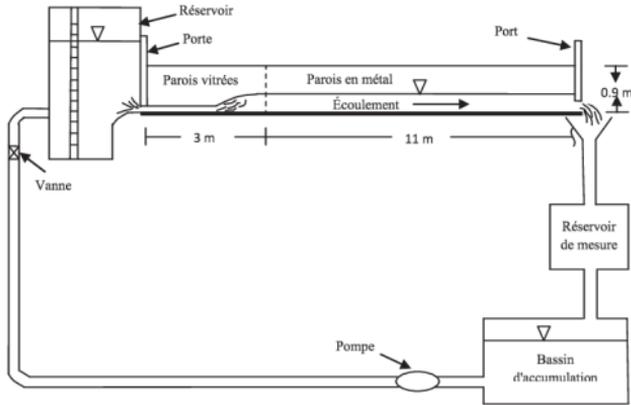


Figure 2.6. Modèle des essais expérimentaux selon (Gharangik et Chaudhry 1991).

II.4.6. Modèle Numérique

Gharangik et Chaudhry (1991) ont utilisé trois modèles pour résoudre les équations de Boussinesq; dans le premier modèle ils ont utilisé le schéma de MacCormack de second ordre sans le terme de Boussinesq. Dans le second modèle, le schéma de deux-quatre est utilisé pour résoudre les équations gouvernantes y compris le terme de Boussinesq. Dans le troisième modèle ils ont utilisé le schéma deux-quarts mais le terme Boussinesq a été négligé.

Le pas de temps a été limité par la condition de stabilité de Courant et le pas d'espace. Le nombre de Courant est fixé à 0,65. Le coefficient de dissipation ϵ_d , a été déterminé par une procédure d'essai. Les valeurs d'essais sont comprises entre 0,01 et 0,05 et la valeur de 0,03 donne les meilleurs résultats.

II.4.7. Procédure de calcul

Les valeurs de la profondeur d'eau en amont, la vitesse, le nombre de Froude et la profondeur d'eau en aval ont subi par plusieurs essais expérimentaux. Les valeurs du coefficient de Manning n varient entre 0,008 et 0,011 par rapport à la profondeur d'eau, puisque le fond du canal est composé de métal et les parois de verre. La profondeur et la vitesse initiale à chaque nœud de calcul ont été calculées considérant que l'écoulement doit être torrentiel à travers le long canal. Ensuite, les calculs débutent avec l'augmentation de la

profondeur aval. Les calculs continuent jusqu'à la convergence de l'état d'équilibre final. Le temps d'essai final est estimé à 150 secondes. Le pas d'espace Δx varie de 0,15 m à 0,6 m.

La figure (2.7) montre la formation du profil de surface d'eau à différents temps, le ressaut se déplace de l'extrémité aval vers l'extrémité amont, puis il revient à l'aval et se stabilise dans un seul endroit. Pour cet essai le nombre de Froude $F_1 = 7$.

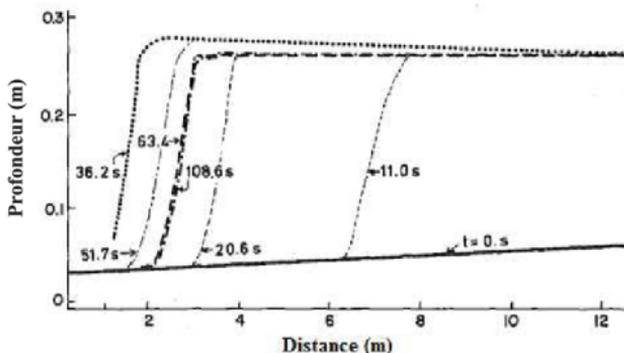


Figure 2.7. Profils de la surface d'eau à différents temps pour $F_1 = 7$, selon (Gharangik et Chaudhry 1991).

Quand la solution numérique converge vers un état stable, le terme de Boussinesq est minime et presque négligeable dans les régions loin de ressaut, puisque la surface d'écoulement dans ces régions est plus ou moins lisse. La distribution de la pression dans ces écoulements est hydrostatique, donc le terme de Boussinesq est négligeable.

II.4.8. Résultats

Gharangik et Chaudhry (1991) ont fait une comparaison entre les résultats de la simulation numérique avec les mesures expérimentales. Les figures (2.8) et (2.9) montrent les profils des ressauts hydrauliques des essais expérimentaux et les profils des ressauts hydrauliques simulés, pour les nombres de Froude $F_1 = 2,3$ et 7.

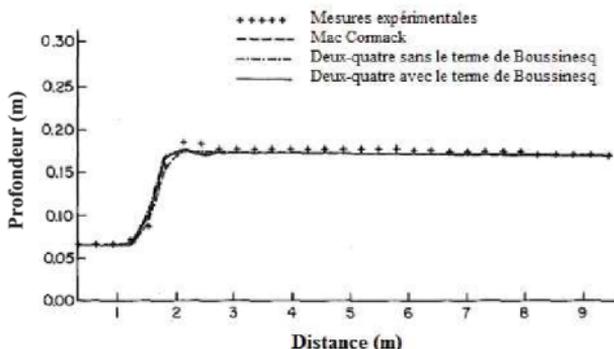


Figure 2.8. Profile du ressaut hydraulique pour $F_1 = 2,3$, selon (Gharangik et Chaudhry 1991).

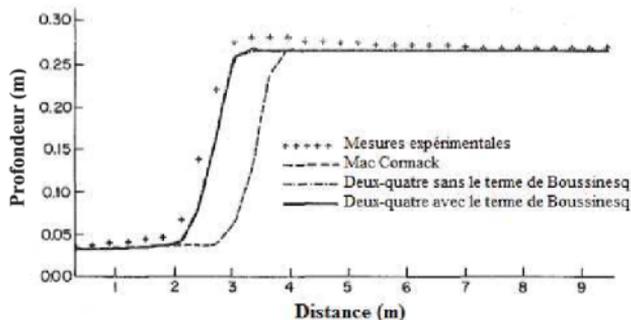


Figure 2.9. Profile du ressaut hydraulique pour $F_1 = 7$, selon (Gharangik et Chaudhry 1991).

Les résultats obtenus à partir de la simulation des trois modèles numériques comparés avec les données expérimentales, montrent que la précision des modèles numériques de quatrième ordre avec ou sans le terme de Boussinesq, donne à peu près les mêmes résultats pour tous les nombres de Froude testés.

Pour le nombre de Froude $F_1 = 2,3$, les trois modèles ont prédit de façon satisfaisante l'emplacement du ressaut hydraulique.

Pour le nombre de Froude $F_1 = 7$, Les deux modèles de quatrième ordre déterminent l'emplacement de ressaut hydraulique d'une manière satisfaisante par rapport au modèle de second ordre, pour ce dernier, le ressaut se forme en aval de l'emplacement obtenu à partir des essais expérimentaux.

II.5. ÉTUDE DE CARVALHO ET AL. (2008)

Carvalho et al. (2008) ont étudié la formation et le développement d'un ressaut hydraulique dans un bassin de dissipation d'énergie à travers des essais expérimentaux et un modèle numérique développé. Les essais expérimentaux ont pour but de former un ressaut hydraulique et obtenir les mesures de la hauteur, la vitesse et la pression. L'objectif de cette étude est de faire une comparaison entre les mesures des essais expérimentaux réalisés au laboratoire avec le modèle numérique développé et la formule présentée par Hager (1992).

II.5.1. Procédure expérimentale

Les essais expérimentaux réalisés dans un canal rectangulaire composé d'un déversoir de 4,5 m de longueur et d'un bassin de dissipation d'énergie horizontal d'une longueur de 3 m et une hauteur de 0.44 m, la largeur du canal est 1.2 m. La figure (2.10) montre la géométrie et les profondeurs d'écoulement, et la figure (2.11) représente le canal de mesure.

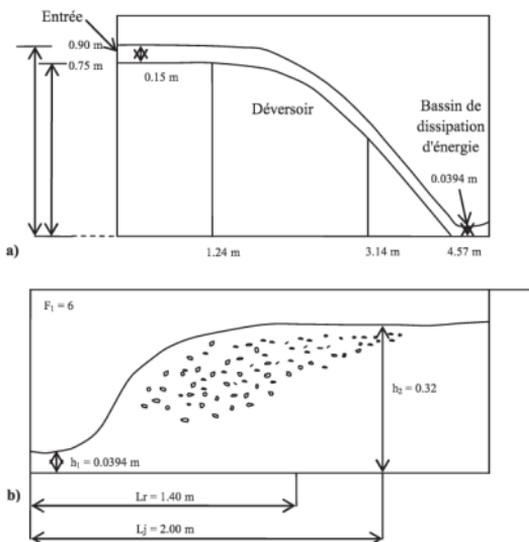


Figure 2.10. Géométrie du canal et les profondeurs d'écoulement selon (Carvalho et al. 2008).



Figure 2.11. Canal de mesure selon (Carvalho et al. 2008).

Le ressaut hydraulique est formé au pied du déversoir d'un débit $Q = 0,181 \text{ m}^3/\text{s}$, la hauteur initiale $h_1 = 0,0394 \text{ m}$, la hauteur finale $h_2 = 0,32 \text{ m}$, la longueur du ressaut $L_j = 2 \text{ m}$, le coefficient de la viscosité cinématique $\vartheta = 1,15 \times 10^6 \text{ m}^2/\text{s}$ et le nombre de Froude $F_1 = 6$. Les débits d'entrée et de sortie sont contrôlés par deux portes indépendantes.

La pression est mesurée au fond du bassin et les vitesses moyennes mesurées à l'intérieur du ressaut hydraulique.

II.5.2. Modèle Mathématique

Pour décrire l'écoulement du ressaut hydraulique dans le bassin de dissipation d'énergie, le modèle mathématique doit être capable de représenter la forme instable et arbitraire de la surface libre, les frontières et la dynamique de turbulence. Le modèle numérique est basé sur les équations 2D de Navier-Stokes qui régissent le mouvement des écoulements incompressibles dans le plan x - z , la méthode de volume de fluide (VOF) est utilisée pour représenter la surface libre. Les équations de conservation de masse et de la quantité de mouvement (équations de Navier-Stokes) peuvent s'écrire comme suit:

$$\nabla \cdot (\theta \vec{v}) = 0 \quad (2.24)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \frac{1}{\theta} \nabla \cdot (\theta \vec{v} \otimes \vec{v}) = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \frac{1}{\theta} \nabla \cdot [\theta(\vartheta + \vartheta_T) \{ \nabla \vec{v} + (\nabla \vec{v})^T \}] + \vec{g} \quad (2.25)$$

Avec ;

\vec{v} est le vecteur de la vitesse, p est la pression, ν est le coefficient de viscosité cinématique, ν_T est la viscosité de la turbulence, g est le terme de la force de gravité, ∇ est un vecteur de dérivation et θ est la fonction de porosité, θ prend la valeur 0 pour un point situé à l'intérieur d'un obstacle et prendra la valeur 1 pour un point occupé par le fluide.

Si $\theta = 1$ pour tous les points du domaine, les équations (2.24) et (2.25) se réduisent aux équations de Navier-Stokes habituelles.

II.5.3. Simulations numériques et résultats

Le domaine de calcul de l'écoulement dans le bassin de dissipation d'énergie du ressaut hydraulique a été défini par un rectangle 2D de 3 m de long et 0,44 m de haut, le pas d'espace dans la direction x , $\Delta x = 0,01$ m et dans la direction z , $\Delta z = 0,005$ m.

Pour les conditions initiales ils ont considéré que la vitesse v dans toutes les mailles de calcul est égale à la vitesse moyenne à la sortie d'écoulement, la hauteur d'écoulement h varie entre $h_2/3$ à h_2 . La détermination des conditions aux limites est définie suite aux essais expérimentaux réalisés au laboratoire.

Dans cette simulation, l'évolution du ressaut hydraulique a été reproduite de manière réaliste telle que les ondulations au niveau de la surface libre. Les tourbillons se forment en aval puis se déplacent en amont, en raison de l'augmentation de la vitesse en amont et la hauteur en aval.

La figure (2.12) représente les détails du champ de vitesse et la configuration de la surface libre dans la partie amont du domaine de calcul.

La figure (2.13) montre une superposition de la solution numérique obtenue et une photographie prise pendant les essais expérimentaux.

La figure (2.14) montre une partie détaillée du rouleau.

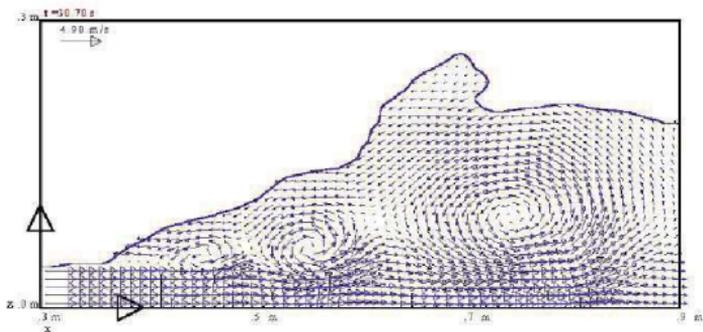


Figure 2.12. Détails de la surface libre et du champ de vitesse du ressaut hydraulique pour ($Fr = 6$): simulation numérique sans modèle de turbulence selon (Carvalho et al. 2008).

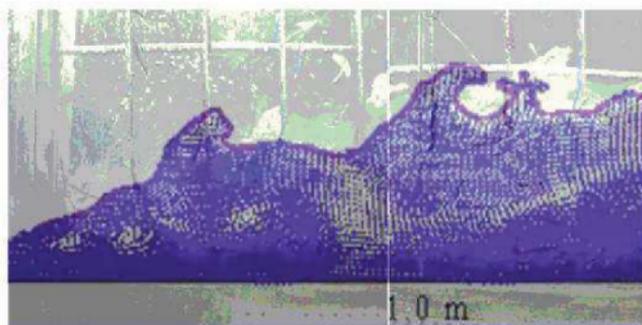


Figure 2.13. Champ de vitesse et configuration de la surface libre pour tout le domaine de calcul superposé sur une photographie du ressaut hydraulique prise aux essais expérimentaux ($Fr = 6$), selon (Carvalho et al. 2008).

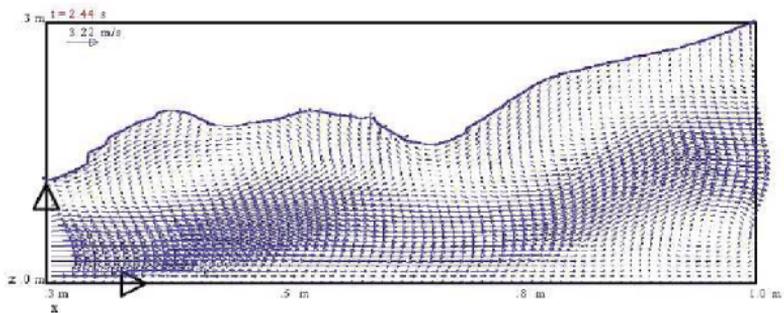


Figure 2.14. Partie détaillée du rouleau selon (Carvalho et al. 2008).

Dans cette simulation, l'écoulement a été créé du fond du canal vers la surface libre, puis un rouleau de surface a été formé. Les ondes de surface ont été formées et déplacées vers l'aval. En outre, un petit rouleau a été formé près du fond du canal dans sa partie amont.

La comparaison de l'étape finale de la simulation numérique avec les résultats obtenus suite aux essais expérimentaux et la relation des hauteurs conjuguées, présente une homogénéité entre le profil longitudinal du ressaut hydraulique et la longueur du rouleau, mais qui est absent au niveau des profils verticaux dans la zone de rouleau.

La figure (2.15) reflète la comparaison entre ; les profils de surface d'eau obtenus par le modèle numérique, la formule présentée par Hager (1992) et les mesures expérimentales.

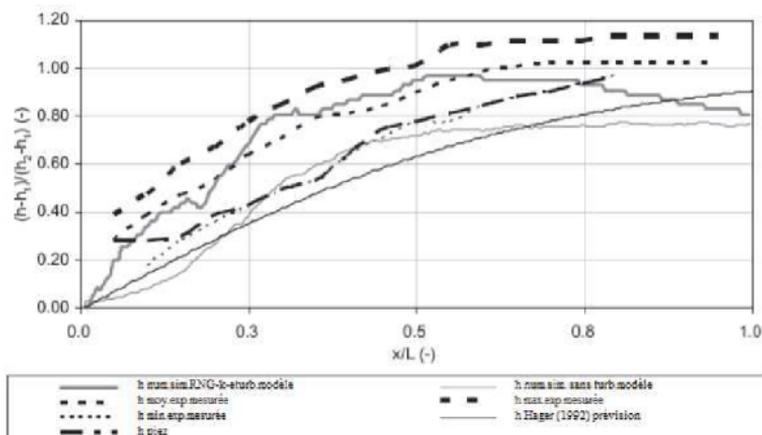


Figure 2.15. Comparaison des profils de surface selon (Carvalho et al. 2008).

Le profil de surface simulé par le modèle numérique et celui mesuré expérimentalement sont presque similaires dans tous les points sauf à l'aval, la hauteur est plus haute dans le modèle physique.

La figure (2.16) reflète la comparaison entre les profils de vitesse moyenne obtenus à partir : des simulations numériques, des essais expérimentaux, la formule présentée par Hager (1992) et les expériences de Resch et Leutheusser (1972).

Les profils de vitesse ont été représentés dans cinq sections différentes dans le bassin de dissipation d'énergie ($X = x / L = 0; X = 0,1; X = 0,2; X = 0,3$ et $X = 0,5$) par rapport au pied du ressaut hydraulique.

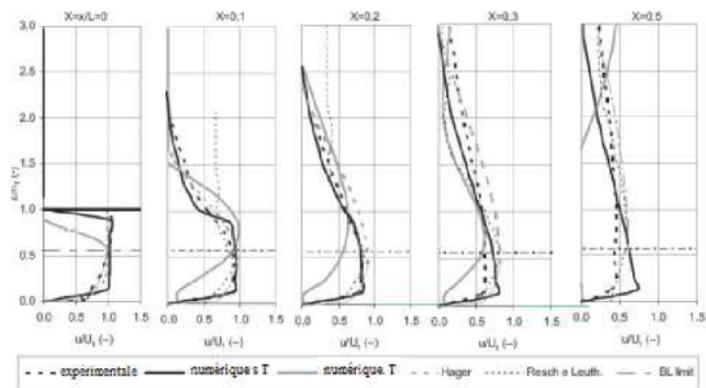


Figure 2.16. Comparaison des profils de vitesse selon (Carvalho et al. 2008).

La formule proposée par Hager (1992) donne un bon accord avec les valeurs mesurées dans le modèle physique.

Les profils de vitesse du modèle numérique présentent une cohésion avec la formule présentée par Hager (1992) et les valeurs mesurées dans le modèle physique, pour la partie amont du ressaut hydraulique où ($x / L = 1/3$).

La figure (2.17) montre la comparaison entre les valeurs de pression obtenues dans les simulations numériques et les valeurs de pression mesurées (moyenne, minimale et maximale) au fond du modèle physique.

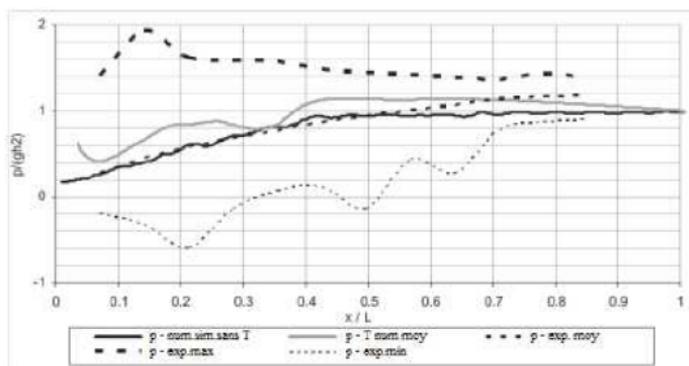


Figure 2.17. Comparaison des valeurs de pression au fond du canal selon (Carvalho et al. 2008).

Les simulations numériques de la pression présentent un rapprochement avec les profils de la pression moyenne mesurée.

Le modèle numérique développé par Carvalho et al. (2008) présente une précision satisfaisante. Les simulations numériques des ressauts hydrauliques obtenus par le modèle numérique ont été validées par les mesures expérimentales et la formule présentée par Hager (1992).

II.6. CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons abordé des travaux expérimentaux et numériques réalisés pour l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Quatre travaux ont été présentés.

Dans un premier temps, nous avons présenté les travaux de Hager et al. (1990) qui ont développé des formules expérimentales afin de calculer les caractéristiques du ressaut hydraulique telles que : le rapport des hauteurs conjuguées Y , la longueur du rouleau L_r , la longueur du ressaut L_j , et le rendement du ressaut η .

Dans un deuxième temps, nous avons présenté la formule obtenue par Hager (1992) concernant le calcul du profil de surface du ressaut hydraulique classique.

Le troisième travail présenté, illustre l'étude de Gharangik et Chaudhry (1991), ce travail est basé sur la modélisation numérique du ressaut hydraulique utilisant les équations de Boussinesq, pour le but d'étudier l'effet du terme de Boussinesq sur l'emplacement du ressaut hydraulique. Les résultats trouvés ont montré qu'il n'y a pas une grande influence de ce terme sur l'emplacement du ressaut hydraulique.

Le dernier travail est de Carvalho et al. (2008), ce travail a pour but de faire une comparaison entre des essais expérimentaux réalisés au laboratoire avec un modèle numérique développé et la formule présentée par Hager (1992). Les résultats obtenus ont montré une homogénéité entre le modèle physique, le modèle numérique et la formule présentée par Hager (1992).

Deuxième Partie

**CONTRIBUTION À LA
MODÉLISATION NUMÉRIQUE
DU RESSAUT
HYDRAULIQUE DANS
QUELQUES TYPES DE CANAUX
PRISMATIQUES**

INTRODUCTION À LA DEUXIÈME PARTIE

Le calcul et la modélisation numérique sont devenus indispensables dans les dernières années à cause de leurs contributions dans le développement accéléré dans la plupart des domaines scientifiques. La vitesse de calcul, le traitement numérique, la représentation graphique et la simulation des phénomènes physiques réels sont parmi les caractéristiques qui distinguent le calcul et la modélisation numérique.

Dans cette partie trois chapitres seront présentés:

Dans le premier chapitre nous allons développer un programme en langage Fortran qui serve à la détermination des caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire.

Dans le deuxième et le troisième chapitre, nous allons présenter un modèle numérique en MATLAB qui consiste à la résolution numérique des équations de Barré Saint-Venant, basé sur le schéma classique de MacCormack qui permet de simuler les caractéristiques du ressaut hydraulique dans des canaux prismatiques. L'extension de haute résolution TVD sera ajoutée à ce schéma numérique pour minimiser les oscillations résultant du schéma classique de MacCormack et qui donnera plus de rigidité à ce modèle.

Chapitre III

PROGRAMMATION DU RESSAUT

HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ

DANS UN CANAL

TRIANGULAIRE

**PROGRAMMATION DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ
DANS UN CANAL TRIANGULAIRE**

III.1. INTRODUCTION

Dans les dernières années, plusieurs chercheurs ont abordé l'étude du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire, notamment au niveau du laboratoire d'hydraulique de l'université de Biskra. Parmi ces travaux on peut citer; les travaux de Achour et Debabeche (2003), Debabeche et Achour (2007) et Debabeche et al. (2006), (2008), (2009), et (2010).

Des formules théoriques et expérimentales ont été développées pour le but de calculer les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire tels que ; le rapport des hauteurs conjuguées, la longueur du ressaut, la longueur du rouleau, la hauteur relative du seuil ou de la marche ainsi que le rendement du ressaut.

Dans ce chapitre, on va présenter dans un premier temps toutes les formules développées à partir des essais expérimentaux effectués dans le laboratoire d'hydraulique de l'université de Biskra pour tous les types des ressauts étudiés dans un canal triangulaire. Dans un deuxième temps, on va présenter un programme en langage Fortran qui permet de calculer les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire pour tous les types des ressauts hydrauliques étudiés dans le laboratoire.

III.2. TRAVAUX EXPÉRIMENTAUX

III.2.1. ÉTUDE DE ACHOUR ET DEBABECHE (2003)

Dans cette étude Achour et Debabeche (2003) ont montré que la mise en place du seuil à l'aval, n'a théoriquement aucun effet réducteur sur le rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut classique dans le cas du contrôle du ressaut.

Sous les mêmes conditions de l'écoulement en amont, la hauteur finale du ressaut classique est théoriquement égale à celle du ressaut contrôlé par un seuil.

III.2.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Achour et Debabeche (2003) ont développé une relation qui présente le rapport des hauteurs conjuguées Y_s , en fonction de la hauteur relative $H_s = h_s/h_1$ du seuil pour un ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° , la relation trouvée peut s'écrire comme suit :

$$Y_s = 1 + 0,96 H_s \quad (3.1)$$

Cette relation est valide pour des nombres de Froude supérieur à 7,5.

III.2.1.2. Hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude

Achour et Debabeche (2003) ont trouvé également une relation entre la hauteur relative $H_s = h_s/h_1$ du seuil et le rapport Y_s des hauteurs conjuguées du ressaut. Cette dernière laisse les auteurs penser qu'une relation peut être obtenue entre la hauteur relative $H_s = h_s/h_1$ du seuil et le nombre de Froude F_1 .

Cette relation est de type logarithmique et elle peut s'écrire comme suit :

$$H_s = h_s/h_1 = 4,125 \cdot \text{Ln} [(F_1 + 4)/5] \quad (3.2)$$

Avec, Ln désigne le logarithme népérien.

III.2.1.3. Relation générale régissant le contrôle du ressaut

D'après une analyse des mesures expérimentales, Achour et Debabeche (2003) ont montré, qu'une relation générale peut exprimer les paramètres F_1 , h_s/h_1 et x/h_1 . Cette relation peut s'écrire sous la forme $f(h_s/h_1, F_1, x/h_1) = 0$.

La relation générale régissant le contrôle du ressaut triangulaire en présence d'un seuil à paroi mince s'écrit :

$$H_s + F_1^{0,4} = 0,127(x/h_1) + 1,269, \text{ avec } x/h_1 \geq 4 \quad (3.3)$$

avec x est la position du seuil par rapport au début du ressaut.

III.2.2. ÉTUDE DE DEBABECHE ET ACHOUR (2007)

L'étude de Debabeche et Achour (2007) a pour objectif de faire une comparaison entre les caractéristiques du ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par seuil épais et le ressaut forcé de type B-min, dans canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° .

III.2.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Une relation de type logarithmique a été trouvée à partir des essais expérimentaux réalisés au laboratoire qui montre la variation des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 pour les trois types des ressauts hydrauliques étudiés. La gamme des nombres de Froude F_1 testés varient entre 1,6 et 11. Cette relation peut s'écrire comme suit :

$$Y = 1 + \bar{\alpha} \text{Ln} [(F_1 + 4)/5] \quad (3.4)$$

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= 3,96 \text{ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince} \\ \bar{\alpha} &= 3,78 \text{ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse} \\ \bar{\alpha} &= 3,33 \text{ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince} \end{aligned}$$

A partir de l'analyse des mesures expérimentales une autre relation a été développée, qui permet de présenter le rapport Y des hauteurs conjuguées des ressauts contrôlé et forcé par seuil et la hauteur relative H_s pour la gamme des nombres de Froude $1,60 \leq F_1 \leq 11$, cette relation peut s'écrire comme suit :

$$Y = 1 + \bar{\beta} H_s \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \bar{\beta} &= 0,96 \text{ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince} \\ \bar{\beta} &= 1,02 \text{ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse} \\ \bar{\beta} &= 0,82 \text{ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince} \end{aligned}$$

III.2.2.2. Hauteur relative du seuil

La comparaison des relations (3.4) et (3.5) a permis de découvrir une nouvelle relation qui montre la variation de la hauteur relative H_s du seuil en fonction du nombre de Froude pour les trois cas du ressaut, cette relation peut s'écrire comme suit :

$$H_s = \bar{\gamma} \text{Ln} [(F_1 + 4)/5] \quad (3.6)$$

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} &= 4,13 \text{ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince} \\ \bar{\gamma} &= 3,71 \text{ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse} \\ \bar{\gamma} &= 4,06 \text{ pour le ressaut forcé par seuil à paroi mince} \end{aligned}$$

III.2.2.3. Longueur relative du bassin

Pour calculer la longueur de bassin on peut distinguer deux notations. La première pour les ressauts contrôlés par seuil mince ou épais et la deuxième pour le ressaut forcé de type B-min.

Pour le ressaut contrôlé par seuil mince ou épais, la longueur de bassin correspond à la position x du seuil par rapport au début du ressaut. Pour ce type de ressaut, cette longueur est caractérisée par un rouleau de surface.

Tandis que pour le ressaut forcé, la longueur L_B du bassin est la somme de la longueur de la position x du seuil et la longueur du rouleau de fond L_{RF} à l'aval du seuil, par rapport au pied du ressaut ($L_B = x + L_{RF}$).

Les analyses expérimentales de la variation de la longueur relative $X=x/h_1$ du bassin du ressaut contrôlé par seuil mince, par seuil épais et $X = L_B/h_1$ du ressaut forcé par seuil mince en fonction du nombre de Froude F_1 , ont permis d'aboutir pour les trois types de ressaut, à une équation de type puissance de la forme :

$$H_s + F_1^{0,4} = \bar{a} X + \bar{b}, \quad X \geq 4 \quad (3.7)$$

La hauteur relative $H_s = h_2/h_1$ de seuil résulte de l'équation (3.6).

Les constantes \bar{a} et \bar{b} pour chaque type de ressaut, sont présentées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 3.1 : Valeurs des constantes \bar{a} et \bar{b} de l'équation (3.7) pour les trois types de ressaut

	Ressaut Contrôlé		Ressaut Forcé de type B-min
	Seuil mince	Seuil épais	
\bar{a}	0,127	0,125	0,161
\bar{b}	1,278	1,410	1,000
R^2	0,999	0,986	0,993

III.2.3. LES TRAVAUX DE DEBABECHE ET AL.

Debabeche et al. (2006), (2008), (2009), et (2010) ont fait plusieurs recherches sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° , on peut citer, l'étude expérimentale du ressaut hydraulique à parois rugueuses en 2006, l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique forcé par marche positive en 2008, l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique à pente positive en 2009 et à contre pente en 2010. Tous ces travaux seront présentés dans les prochains paragraphes.

III.2.3.1. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses (2006)

Debabeche et al. (2006) ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° à parois rugueuses pour le but d'analyser expérimentalement l'effet de la rugosité absolue des parois du canal aux caractéristiques du ressaut hydraulique.

L'expérimentation a été menée sous sept hauteurs initiales de l'écoulement : $h_1(\text{mm}) = 18 ; 25 ; 30 ; 34 ; 40 ; 44 ; 51$. Quatre valeurs de la rugosité absolues ont été testées : $n_e(\text{mm}) = 4,53 ; 6,04 ; 7,11 ; 8,73$ et une large gamme du nombre de Froude a été ainsi obtenue qui correspond à $4 < F_1 < 24$.

III.2.3.1.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 a été examinée sous l'effet de chacune des rugosités absolues testées. Debabeche et al. (2006) ont trouvé une relation qui montre cette variation, cette relation est de type logarithmique et elle peut s'écrire comme suit :

$$Y = \left(7,14 - \frac{1}{2}n_e\right) \text{Ln} \left(\frac{F_1+4}{5}\right) - \frac{3}{5} \quad (3.8)$$

avec , n_e est la rugosité absolue.

La relation (3.8) est applicable dans la gamme : $4,53\text{mm} \leq n_e \leq 8,73 \text{ mm}$.

III.2.3.1.2. Longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

l'analyse statistique des points de mesures a montré que pour chacune des rugosités absolues testées, la longueur relative L_j/h_1 est liée au nombre de Froude F_1 par une loi de type linéaire, l'équation qui représente cette liaison peut s'écrire comme suit :

$$\frac{L_j}{h_1} = (3,53 - 0,26n_e)(F_1 - 1) \quad (3.9)$$

La relation (3.9) est applicable pour la même gamme de la rugosité absolue.

III.2.3.1.3. Rendement du ressaut hydraulique

Le rendement η du ressaut est défini par le rapport de la perte de charge ΔH qu'il occasionne à la charge totale dans sa section initiale, la relation du rendement du ressaut hydraulique peut s'écrire comme suit :

$$\eta = 1 - \frac{Y+F_1^2/4Y^4}{1+F_1^2/4} \quad (3.10)$$

III.2.3.2. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire forcé par marche positive (2008)

Debabeche et al. (2008) ont étudié expérimentalement les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par marche positive et celles du ressaut hydraulique de type A forcé, par marche positive. L'expérimentation, pour les deux types des ressauts, a été effectuée dans un canal triangulaire d'angle d'ouverture de 90°.

Le ressaut hydraulique est dit contrôlé par marche positive lorsque le rouleau de surface et la hauteur conjuguée se mesurent à l'amont de la marche positive. Le ressaut hydraulique est considéré de type A, forcé par marche positive, lorsque l'extrémité aval du rouleau de surface coïncide verticalement avec l'extrémité amont de la marche positive.

Debabeche et al. (2008) ont trouvé des relations fonctionnelles, exprimées en termes adimensionnels les caractéristiques du ressaut hydraulique pour les deux types des ressauts étudiés.

A fin d'établir des relations générales qui représentent les caractéristiques des types des ressauts hydrauliques étudiés dans un canal triangulaire, Debabeche et al. (2008) ont fait une étude comparative entre le ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par seuil épais, le ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut de type A, forcé par marche positive.

III.2.3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

A partir de l'ajustement des valeurs des essais expérimentaux. Une relation générale a été trouvée par Debabeche et al. (2008) montre la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les quatre configurations citées précédemment, cette relation est valable pour une gamme de nombre de Froude F_1 ($2 \leq F_1 \leq 15$). La relation trouvée est de type logarithmique, elle est la même que celle développée par Debabeche et Achour (2007). Debabeche et al. (2008) ont ajouté de nouvelles valeurs du coefficient caractérisant le type du ressaut, la relation (3.4) peut s'écrire avec les nouvelles constantes comme suit :

$$Y - 1 = \bar{\alpha} \ln [(F_1 + 4)/5] \quad (3.11)$$

$$\bar{\alpha} = 3,96 \text{ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince}$$

$$\bar{\alpha} = 3,78 \text{ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse}$$

$$\bar{\alpha} = 3,71 \text{ pour le ressaut contrôlé par marche positive}$$

$$\bar{\alpha} = 3,41 \text{ pour le ressaut de type A, forcé par marche positive}$$

III.2.3.2.2. Hauteur relative du seuil et de la marche

La relation développée par Debabeche et al. (2008) montre la variation de la hauteur relative $H_s = h_s/h_1$ du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les quatre configurations du ressaut.

L'ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de $H_s = f(F_1)$ est de type logarithmique pour les quatre types de ressaut, la relation développée est une extension de celle découverte par Debabeche et Achour (2007), cette dernière s'écrit avec les nouvelles constantes comme suit :

$$H_s = \bar{\gamma} \ln [(F_1 + 4)/5] \quad (3.12)$$

$$\begin{aligned} \bar{\gamma} &= 4,130 \text{ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi mince} \\ \bar{\gamma} &= 3,710 \text{ pour le ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse} \\ \bar{\gamma} &= 3,016 \text{ pour le ressaut contrôlé par marche positive} \\ \bar{\gamma} &= 2,940 \text{ pour le ressaut de type A, forcé par marche positive} \end{aligned}$$

III.2.3.2.3. Longueur relative du bassin

Afin de calculer la longueur du bassin, Debabeche et al. (2008) ont étudié la variation de la longueur relative $X = x/h_1$ du bassin en fonction du nombre de Froude F_1 , pour les quatre configurations du ressaut.

La relation trouvée qui représente la variation $X = f(F_1)$ peut s'écrire comme suit :

$$H_s + F_1^{0,4} = \bar{a} X + \bar{b}, \quad X \geq 4 \quad (3.13)$$

Cette relation est une extension de la relation (3.7) développée par Debabeche et Achour (2007), avec de nouvelles constantes pour les deux types des ressauts étudiés, les paramètres \bar{a} et \bar{b} de l'équation (3.13) figurent sur le tableau (3.2) :

Tableau 3.2 : Valeurs des constantes \bar{a} et \bar{b} de l'équation (3.13) pour les deux types de ressaut

	Ressaut Contrôlé			Ressaut de type A, forcé par Marche positive
	Seuil mince	Seuil épais	Marche positive	
\bar{a}	0,127	0,125	0,123	0,14
\bar{b}	1,278	1,410	0,561	0,82

III.2.3.2.4. Rendement du ressaut hydraulique

La relation qui représente le rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire s'écrit comme suit :

$$\eta = 1 - \frac{Y + F_1^2/4Y^4}{1 + F_1^2/4}$$

III.2.3.3. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente positive (2009)

L'étude expérimentale de Debabeche et al. (2009) a pour objectif de déterminer expérimentalement l'effet de la pente positive du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique, à savoir la hauteur h_s du seuil, la longueur L_r du rouleau, la longueur L_j du ressaut. Dans cette étude expérimentale cinq pentes positives ont été testées : 0,01 ; 0,02 ; 0,03 ; 0,04 ; 0,05. Une large gamme de nombre de Froude a été obtenue et qui varie entre 3,5 et 13,3.

III.2.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Debabeche et al. (2009) ont trouvé une relation générale permettant la détermination du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison positive du canal α . Cette relation s'écrit comme suit :

$$Y = [9,146 \tan(\alpha) + 1,073] F_1^{(0,688 - 1,389 \tan(\alpha))} \quad (3.14)$$

avec $3,5 < F_1 < 13,3$; $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$

III.2.3.3.2. hauteur relative du seuil h_s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport h_s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les cinq pentes positives testées, suit une loi de type logarithmique de la forme $h_s/h_1 = a \ln(F_1) + b$. la relation générale obtenue peut s'écrire comme suit :

$$\frac{h_s}{h_1} = 2,45 \ln(F_1) + 67,36 \tan(\alpha) - 2,075 \quad (3.15)$$

avec $3,5 < F_1 < 13,3$; $0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,05$

III.2.3.3.3. Longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

L'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à une relation linéaire qui montre la variation de la longueur relative du ressaut L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude

F_1 de l'écoulement incident. La représentation de la relation $L_j/h_1 = f(F_1)$, a montré que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative du ressaut.

Cette relation s'écrit comme suit :

$$\frac{L_j}{h_1} = 2,68 F_1 + 16 \quad (3.16)$$

Pour $2 < F_1 < 14$

III.2.3.3.4. Longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1

L'ajustement des points expérimentaux a permis également d'aboutir à une relation linéaire qui montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. L'analyse de la relation $L_r/h_1 = f(F_1)$, a montré également que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative du rouleau.

Cette relation s'écrit comme suit :

$$\frac{L_r}{h_1} = 2,53 F_1 + 8,86 \quad (3.17)$$

Pour $2 < F_1 < 14$

III.2.3.3.5. Rendement du ressaut hydraulique

La relation du rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente positive, s'écrit comme suit :

$$\eta = 1 - \frac{Y + F_1^2/4Y^4 \cos \alpha}{1 + F_1^2/4 \cos \alpha} \quad (3.18)$$

III.2.3.4. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente négative (2010)

Debabeche et al. (2010) ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente négative pour le but de déterminer expérimentalement l'effet de la contre pente du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique. Dans cette étude expérimentale quatre pentes négatives ont été testées : $\tan(\alpha) = -0,005; -0,01; -0,015; -0,02$. Une large gamme de nombre de Froude a été obtenue varie entre 2 et 11.

III.2.3.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

Debabeche et al. (2010) ont trouvé une équation générale permettant la détermination du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison négative du canal α . Cette relation peut s'écrire comme suit :

$$Y = [7,24 \tan(\alpha) + 1,03] F_1^{0,72} \quad (3.19)$$

Avec $2 < F_1 < 8$; $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq -0,02$

III.2.3.4.2. Hauteur relative du seuil h_s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1

Une relation générale a été obtenue à partir de l'ajustement des mesures expérimentales montrant la variation du rapport de la hauteur relative du seuil $H_s = h_s/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, pour les quatre pentes négatives testées. Cette relation s'écrit comme suit :

$$\frac{h_s}{h_1} = [-149,21 \tan(\alpha) + 1,36] \ln(F_1) + [384,21 \tan(\alpha) + 0,80] \quad (3.20)$$

Avec $2 < F_1 < 8$; $-0,005 \leq \tan(\alpha) \leq -0,02$

III.2.3.4.3. Longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

L'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir à une relation de type logarithmique qui montre la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. La représentation de la relation $L_j/h_1 = f(F_1)$, a montré que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative L_j/h_1 du ressaut.

L'équation obtenue peut s'écrire comme suit :

$$\frac{L_j}{h_1} = 23,43 \ln(F_1) - 5,76 \quad (3.21)$$

Pour $2 < F_1 < 8$ et $-0,05 \leq \tan(\alpha) \leq -0,02$.

III.2.3.4.4. Longueur relative L_r/h_1 du rouleau en fonction du nombre de Froude F_1

L'ajustement des points expérimentaux a permis également d'aboutir à une équation de type logarithmique qui montre la variation de la longueur relative L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. L'analyse de la relation $L_r/h_1 = f(F_1)$, a montré également, que l'inclinaison du canal n'a pas d'influence sur la hauteur relative du rouleau.

L'équation obtenue peut s'écrire comme suit :

$$\frac{L_r}{h_1} = 20,10 \ln(F_1) - 7,67 \quad (3.22)$$

Pour $2 < F_1 < 8$ et $-0,05 \leq \tan(\alpha) \leq -0,02$

III.2.3.4.5. Rendement du ressaut hydraulique

La relation du rendement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente négative, s'écrit comme suit :

$$\eta = 1 - \frac{Y + F_1^2/4Y^4 \cos\alpha}{1 + F_1^2/4\cos\alpha}$$

III.3. PROGRAMMATION EN LANGAGE FORTRAN

Pour faciliter les calculs des caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire, nous avons élaboré un programme en langage Fortran 95 permettant de calculer ces caractéristiques.

Le langage de programmation Fortran (Formula Translating System) a été créé en 1954 par John Backus, il est considéré comme le premier langage informatique de haut niveau, il est utilisé principalement dans le domaine du calcul numérique. Le développement du langage Fortran a connu plusieurs versions, on peut citer : Fortran II en 1958, Fortran IV en 1966, Fortran 77 en 1977, Fortran 90 en 1994, Fortran 95 en 1997, Fortran 2003 en 2004 et Fortran 2008 en 2010 ; les dernières versions ont connues beaucoup d'évolution à travers les changements effectués pour chaque version.

Dans ce programme, nous allons présenter tous les travaux effectués au laboratoire sur le ressaut hydraulique dans canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° , qui sont les suivants :

- Le travail de Achour et Debabeche (2003) pour le ressaut hydraulique classique dans un canal triangulaire.
- Le travail de Debabeche et Achour (2007) pour les ressauts hydrauliques contrôlés : par seuil à paroi mince, par seuil à paroi épaisse et forcé par seuil à paroi mince.
- Le travail de Debabeche et al. (2006) pour le ressaut hydraulique contrôlé à parois rugueuses.
- Le travail de Debabeche et al. (2008) pour le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive.
- Le travail de Debabeche et al. (2008) pour le ressaut hydraulique de type A, forcé par marche positive.
- Le travail de Debabeche et al. (2009) pour le ressaut hydraulique contrôlé à pente positive.
- Le travail de Debabeche et al. (2010) pour le ressaut hydraulique contrôlé à pente négative.

III.3.1. Structure générale du programme

Le programme réalisé est structuré comme suit :

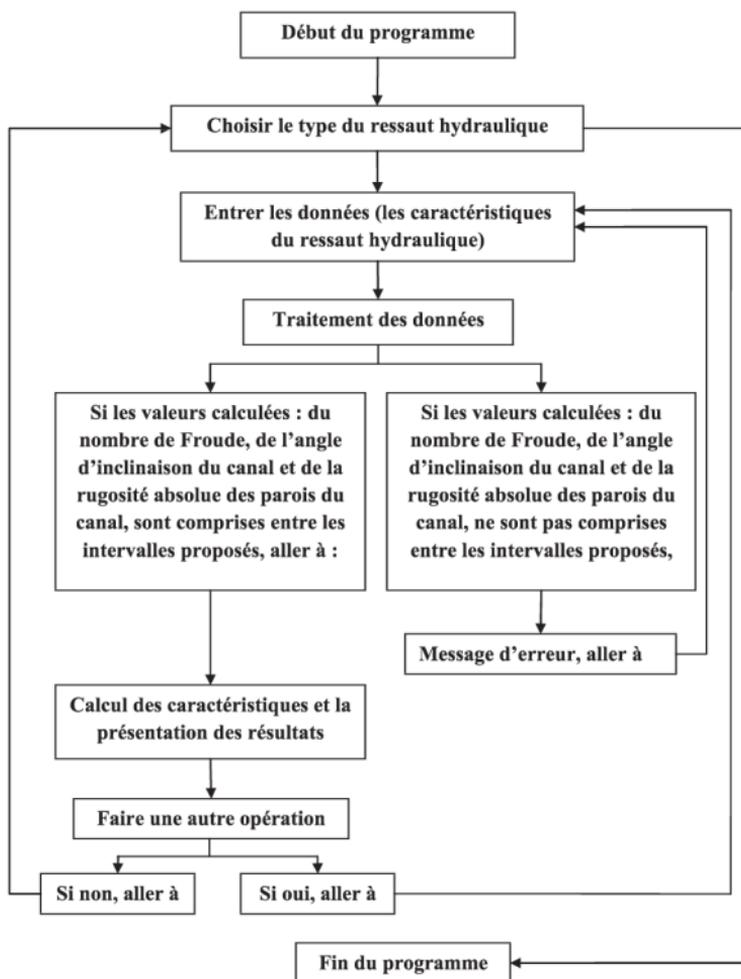


Figure 3.1. Structure générale du programme.

III.3.2. Interface du programme

Une interface du programme réalisé pour titre ressaut hydraulique contrôlé dans un canal triangulaire comprenant tous les types des ressauts expliqués précédemment. Dans le bas de l'interface, une instruction à travers laquelle on peut choisir le type du ressaut par la sélection du numéro figurant dans la liste.

La figure (3.2) montre l'interface du programme.

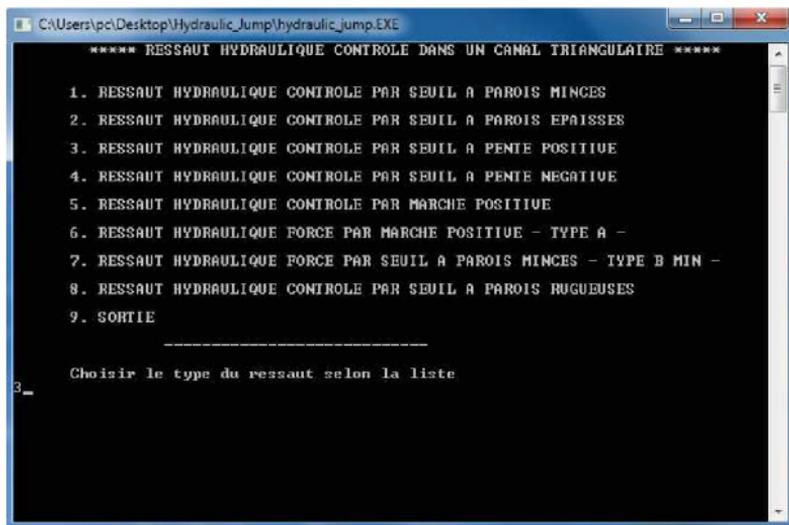


Figure 3.2. Interface du programme.

III.3.3. Introduction des données

Après le choix du type de ressaut montré dans le menu principal du programme, la deuxième étape consiste à l'introduction des données afin de calculer les caractéristiques du ressaut.

Les données principales sont : la hauteur initiale du ressaut hydraulique h_1 (m) ; le débit Q (m^3/s) ; la rugosité absolue n_e dans le cas où les parois du canal sont rugueuses ; l'angle d'inclinaison du canal α par rapport à l'horizontale, α prend des valeurs positives ou négatives.

Pour illustrer cette procédure on prend pour exemple la figure (3.3) qui présente les données principales d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire à pente positive.

Les données sont :

- la hauteur initiale du ressaut hydraulique h_1 (m).
- le débit Q (m^3/s).
- l'angle d'inclinaison du canal α par rapport à l'horizontale

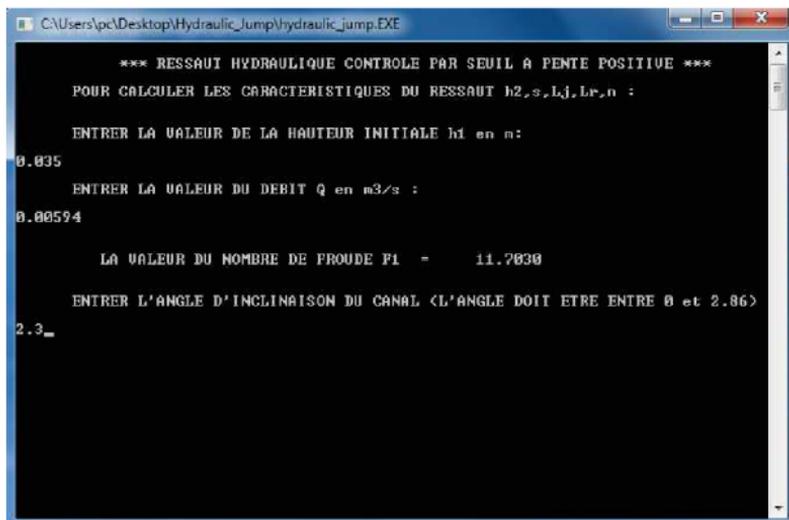


Figure 3.3. Introduction des données.

III.3.4. Les résultats

Les résultats représentent les caractéristiques du ressaut hydraulique calculées à partir des équations développées pour chaque type du ressaut.

La figure (3.4) montre les résultats des caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à pente positive, qui sont les suivants :

- la hauteur finale du ressaut hydraulique h_2 (m).
- la hauteur du seuil h_s (m).
- la longueur du ressaut L_j (m).

- la longueur du rouleau L_r (m).
- le rendement du ressaut η (%).

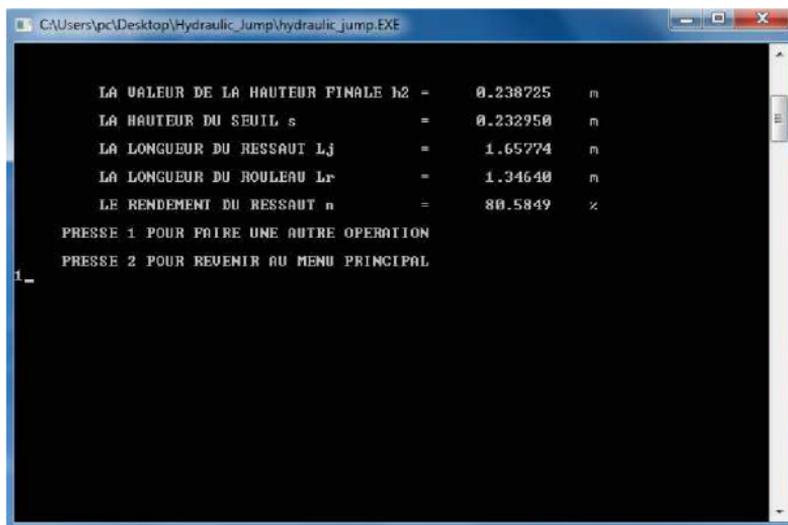


Figure 3.4. Présentation des résultats.

Pour faire une autre opération on clique sur 1, pour revenir au menu principal on clique sur 2.

III.3.5. Les messages d'erreurs

Pendant la programmation de ces différents types des ressauts hydrauliques nous avons respecté les conditions des essais expérimentaux proposés, telles que, la gamme de nombre de Froude obtenu, l'intervalle de l'angle d'inclinaison du canal et l'intervalle de la rugosité absolue des parois du canal.

Des messages d'erreurs apparaissent si l'une de ces conditions n'a pas été respectée. Les figures (3.5), (3.6), (3.7) montrent quelques exemples sur ces messages d'erreurs.

Les figures (3.5), (3.6), (3.7) montrent respectivement des messages d'erreurs correspondant à l'intervalle de la gamme du nombre de Froude F_1 obtenu, l'intervalle de l'angle d'inclinaison du canal α proposé et l'intervalle de la rugosité absolue n_c des parois du canal mentionnée.

```
*** RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL A PAROIS MINCES ***
POUR CALCULER LES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT h2,s,L,n :
ENTRER LA VALEUR DE LA HAUTEUR INITIALE h1 en m:
ENTRER LA VALEUR DU DEBIT Q en m3/s :

LA VALEUR DU NOMBRE DE FROUDE F1 = 0.239457
LA VALEUR DU NOMBRE DE FROUDE DOIT ETRE ENTRE 1.6 et 11
*** RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL A PAROIS MINCES ***
POUR CALCULER LES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT h2,s,L,n :
ENTRER LA VALEUR DE LA HAUTEUR INITIALE h1 en m:
```

Figure 3.5. Message d'erreurs pour la valeur de nombre Froude F_1 .

```
*** RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL A PENTE NEGATIVE ***
POUR CALCULER LES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT h2,s,Lj,Lr,n :
ENTRER LA VALEUR DE LA HAUTEUR INITIALE h1 en m:
ENTRER LA VALEUR DU DEBIT Q en m3/s :

LA VALEUR DU NOMBRE DE FROUDE F1 = 7.28643
ENTRER L'ANGLE D'INCLINAISON DU CANAL <L'ANGLE DOIT ETRE ENTRE 0 et -1.14>

L'ANGLE D'INCLINAISON DU CANAL DOIT ETRE ENTRE 0 et -1.14
ENTRER L'ANGLE D'INCLINAISON DU CANAL <L'ANGLE DOIT ETRE ENTRE 0 et -1.14>
```

Figure 3.6. Message d'erreurs pour l'angle d'inclinaison du canal α .

```

CAUsers\pc\Desktop\Hydraulic_Jump\hydraulic_jump.EXE
*** RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL A PAROIS RUGUEUSES ***
POUR CALCULER LES CARACTERISTIQUES DU RESSAUT h2, Lj, n :
0.13 ENTRE LA VALEUR DE LA HAUTEUR INITIALE h1 en m :
0.12 ENTRE LA VALEUR DU DEBIT Q en m3/s :
LA VALEUR DU NOMBRE DE FROUDE F1 = 8.89288
ENTRE LA VALEUR DE LA RUGOSITE ABSOLUE EN m (LA RUGOSITE ABSOLUE DOIT
10 ETRE ENTRE 4.53 et 8.73)
LA VALEUR DE LA RUGOSITE ABSOLUE DOIT ETRE ENTRE 4.53 et 8.73
ENTRE LA VALEUR DE LA RUGOSITE ABSOLUE EN m (LA RUGOSITE ABSOLUE DOIT
ETRE ENTRE 4.53 et 8.73)

```

Figure 3.7. Message d'erreurs pour la rugosité absolue n , des parois du canal.

III.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un programme en langage Fortran 95, qui a pour objectif le calcul des caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à angle d'ouverture de 90° .

Nous avons présenté dans un premier lieu tous les travaux réalisés au laboratoire concernant le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire, pour le but de rassembler et présenter toutes les formules trouvées qui nous aide à calculer les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Les travaux présentés sont : le travail de Achour et Debabeche (2003) qui ont étudié expérimentalement le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince ; l'étude de Debabeche et Achour (2007) relative à l'analyse de l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique en canal triangulaire ; l'étude de Debabeche et al. (2006) qui s'intéresse à l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses ; l'étude de Debabeche et al. (2008) concernant le ressaut contrôlé et forcé par marche positive dans un canal triangulaire ; les travaux de Debabeche et al. (2009) et (2010) qui ont étudié l'effet de la pente du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à des pentes positives et négatives.

Dans un second lieu nous avons développé un programme en langage Fortran 95, ce programme a été réalisé pour faciliter les calculs des caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire, à travers des formules obtenues à partir des essais expérimentaux effectués au laboratoire.

Des explications sur l'utilisation de ce programme ont été présentées à travers des exemples des ressauts hydrauliques étudiés.

Ce programme est un outil d'aide aux chercheurs et ingénieurs pour faciliter les calculs des caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire.

Chapitre IV

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE

MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE

IV.1. INTRODUCTION

La modélisation numérique des écoulements à surface libre basée sur la résolution des équations de Barré Saint-Venant, qui sont parmi les équations les plus utilisées dans ce domaine. Pour résoudre ces équations nous avons développé deux modèles numériques en MATLAB®, dans le premier modèle nous avons utilisé le schéma classique de MacCormack et dans le second nous avons ajouté l'extension de haute résolution TVD.

Dans ce chapitre, on commence par la validation du modèle numérique à travers une comparaison entre des simulations numériques effectuées par ce modèle et des solutions analytiques calculées par des formules développées. Cette comparaison sera effectuée sur trois types des régimes d'écoulements ; écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial, écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial-torrentiel et écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial-torrentiel-fluvial. En suite on passe à l'étude de l'effet du changement de quelques paramètres sur la localisation du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire tels que, le pas d'espace Δx , le coefficient de la quantité de mouvement β et le coefficient de la rugosité de Manning n . En fin, on termine par l'analyse du déplacement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente variable afin de proposer une relation qui peut servir à la détermination du déplacement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire.

IV.2. APPLICATION

La validation du modèle numérique a été faite à partir des résultats des solutions analytiques présentés dans la littérature de (Mendes 2001) proposées par Ritter et Stoker pour un écoulement permanent dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle.

Pour la validation du modèle numérique trois cas seront présentés :

- Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial ;
- Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial-torrentiel ;
- Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial-torrentiel-fluvial.

Les profils de surfaces obtenus à travers les simulations numériques seront comparés avec les solutions analytiques proposées. Le modèle numérique utilisé est basé sur le schéma classique de MacCormack.

Les solutions analytiques proposées, basées sur la résolution de l'équation de Bernoulli, le canal utilisé pour cette étude est de section rectangulaire horizontal de 25 m de longueur et d'une largeur unitaire, le frottement est nul sur le fond ainsi que sur les parois du canal.

Le canal contient un obstacle de forme parabolique entre les sections $x = 8 \text{ m}$ et $x = 12 \text{ m}$, l'équation qui présente le fond du canal s'écrit comme suit :

$$\xi(x) = \begin{cases} 0 & \text{si } x \leq 8\text{m} \\ 0,2 - 0,05(x - 10)^2 & \text{si } 8 < x < 12\text{m} \\ 0 & \text{si } x \geq 12\text{m} \end{cases}$$

Les solutions analytiques, les conditions initiales et aux limites seront présentées pour chaque type de régime d'écoulement.

IV.2.1. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial

Pour le cas d'un écoulement permanent en régime fluvial sur toute la longueur du canal, le débit $Q = 4,42 \text{ m}^3/\text{s}$ est considéré comme une condition limite en amont et la profondeur d'eau $h = 2 \text{ m}$ est considérée comme une condition limite en aval, le débit $Q = 4,42 \text{ m}^3/\text{s}$ et la profondeur d'eau $h = 2 \text{ m}$ sont considérées comme des conditions initiales en amont.

Les valeurs de la solution analytique qui représentent les caractéristiques de l'écoulement telles que ; la profondeur d'eau, la section parabolique du fond du canal, la vitesse d'écoulement et le nombre de Froude sont présentées dans le tableau (4.1).

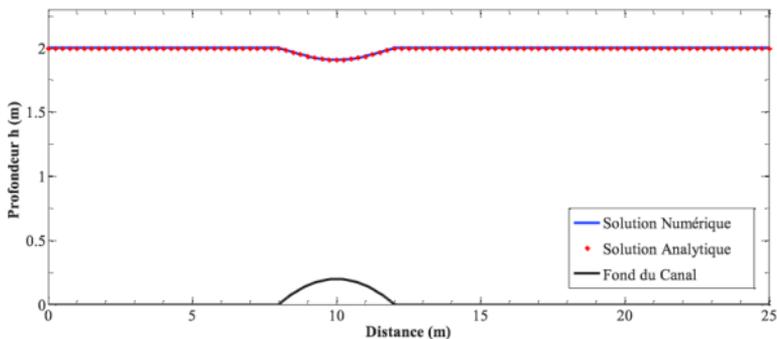
Tableau 4.1. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial (F).

x(m)	ξ (m)	h(m)	z(m)	Q(m ³ /s)	v(m/s)	F ₁
0,00	0,0000	2,0000	2,0000	4,42	2,210	0,499
.
.
.
8,00	0,0000	2,0000	2,0000	4,42	2,210	0,499
8,25	0,0469	1,9365	1,9834	4,42	2,283	0,524
8,50	0,0875	1,8795	1,9670	4,42	2,352	0,548
8,75	0,1219	1,8295	1,9514	4,42	2,416	0,571

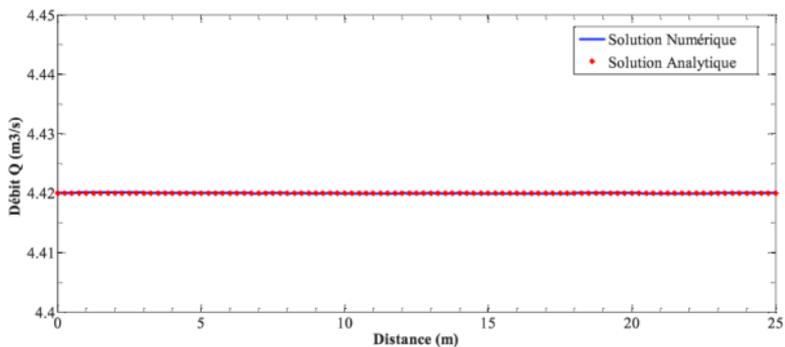
9,00	0,1500	1,7871	1,9371	4,42	2,473	0,591
9,25	0,1719	1,7529	1,9248	4,42	2,522	0,608
9,50	0,1875	1,7278	1,9153	4,42	2,558	0,622
9,75	0,1969	1,7123	1,9092	4,42	2,581	0,630
10,00	0,2000	1,7072	1,9072	4,42	2,589	0,633
10,25	0,1969	1,7123	1,9092	4,42	2,581	0,630
10,50	0,1875	1,7278	1,9153	4,42	2,558	0,622
10,75	0,1719	1,7529	1,9248	4,42	2,522	0,608
11,00	0,1500	1,7871	1,9371	4,42	2,473	0,591
11,25	0,1219	1,8295	1,9514	4,42	2,416	0,571
11,50	0,0875	1,8795	1,9670	4,42	2,352	0,548
11,75	0,0469	1,9365	1,9834	4,42	2,283	0,524
12,00	0,0000	2,0000	2,0000	4,42	2,210	0,499
.
.
.
25,00	0,0000	2,0000	2,0000	4,42	2,210	0,499

La figure (4.1) montre les simulations numériques ainsi que les solutions analytiques : du profil de surface de la profondeur d'eau h , du débit Q , de la vitesse v et du nombre de Froude F_1 pour un écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial.

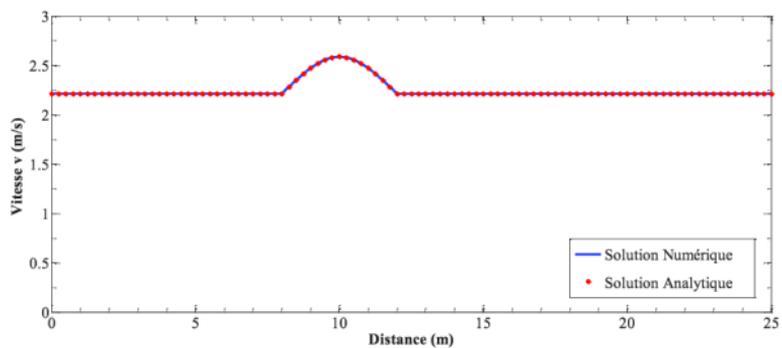
Le pas d'espace de ces simulations $\Delta x = 0,1$ m et le temps de test $t = 50$ s.



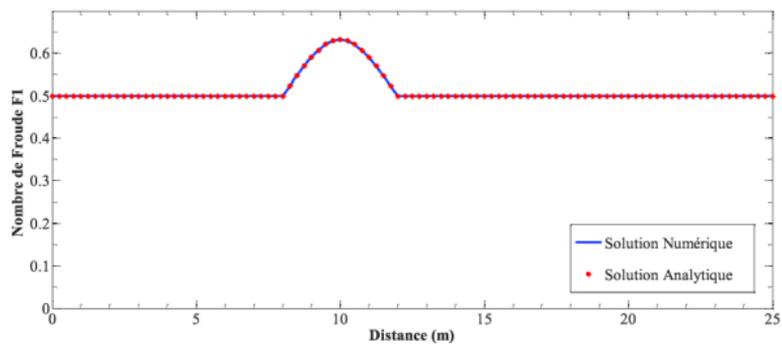
a) La profondeur h



b) Le débit Q



c) La vitesse v



d) Le nombre de Froude F_1

Figure 4.1. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial (F).

Le résultat de la comparaison entre la solution numérique et la solution analytique pour le profil de surface de la profondeur h , le débit Q , la vitesse v et le nombre de Froude F_1 est similaire et identique pour les différents profils. La valeur du nombre de Courant $C_n = 0,97$.

IV.2.2. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial-Torrentiel

Pour le deuxième cas, la géométrie du canal a été conservé mais les conditions initiales et aux limites ont changé, le régime d'écoulement est devenu Fluvial-Torrentiel, le débit $Q = 1,53 \text{ m}^3/\text{s}$ est considéré comme une condition aux limites amont et aval, la profondeur d'eau $h = 0,66 \text{ m}$ est une condition initiale.

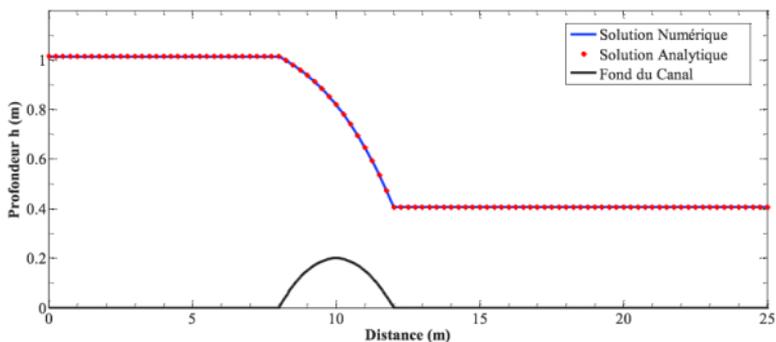
Les valeurs de la solution analytique représentant les caractéristiques de ce régime d'écoulement sont présentées dans le tableau (4.2).

Tableau 4.2. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial-Torrentiel (F-T).

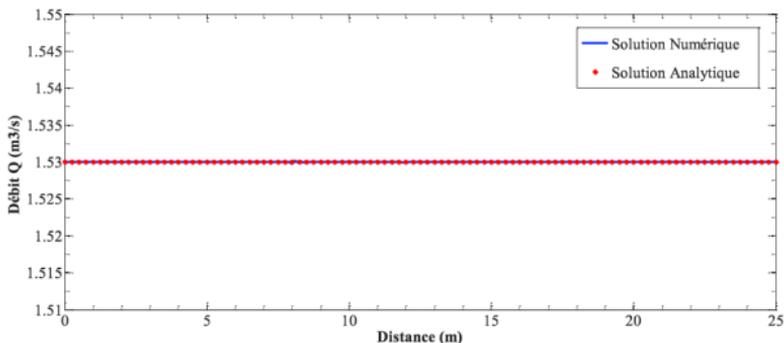
x(m)	ξ (m)	h(m)	z(m)	Q(m ³ /s)	v(m/s)	F ₁
0,00	0,0000	1,0147	1,0147	1,53	1,508	0,478
.
.
.
8,00	0,0000	1,0147	1,0147	1,53	1,508	0,478
8,25	0,0469	0,9520	0,9989	1,53	1,607	0,526
8,50	0,0875	0,8936	0,9811	1,53	1,712	0,579
8,75	0,1219	0,8392	0,9611	1,53	1,823	0,636
9,00	0,1500	0,7887	0,9387	1,53	1,940	0,698
9,25	0,1719	0,7417	0,9136	1,53	2,063	0,765
9,50	0,1875	0,6982	0,8857	1,53	2,191	0,838
9,75	0,1969	0,6577	0,8546	1,53	2,326	0,916
10,00	0,2000	0,6205	0,8205	1,53	2,466	1,000
10,25	0,1969	0,5860	0,7829	1,53	2,611	1,090
10,50	0,1875	0,5539	0,7414	1,53	2,763	1,186
10,75	0,1719	0,5243	0,6962	1,53	2,913	1,288
11,00	0,1500	0,4968	0,6468	1,53	3,080	1,396
11,25	0,1219	0,4714	0,5933	1,53	3,245	1,510
11,50	0,0875	0,4479	0,5354	1,53	3,416	1,630
11,75	0,0469	0,4262	0,4731	1,53	3,590	1,757
12,00	0,0000	0,4059	0,4059	1,53	3,769	1,890
.
.
.
25,00	0,0000	0,4059	0,4059	1,53	3,769	1,890

La figure (4.2) montre les simulations numériques et aussi les solutions analytiques : du profil de surface de la profondeur d'eau h , du débit Q , de la vitesse v d'écoulement et du nombre de Froude F_1 pour un écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial-Torrentiel.

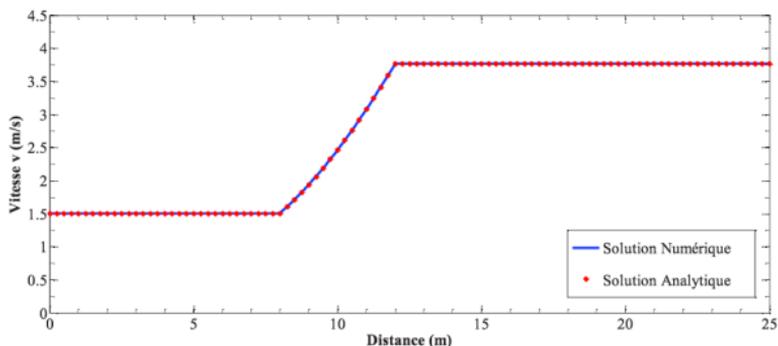
Le pas d'espace de ces simulations $\Delta x = 0,1$ m et le temps de test $t = 50$ s.



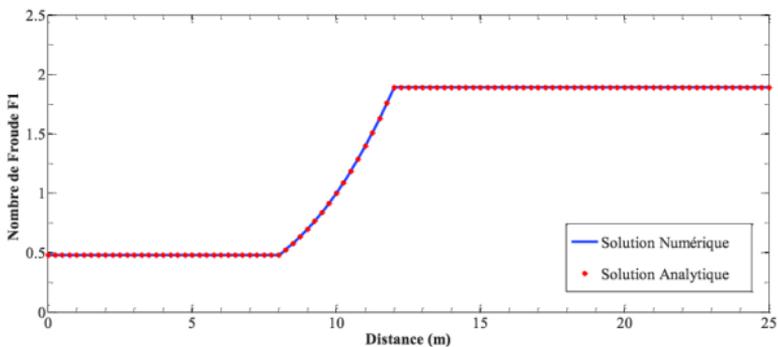
a) La profondeur h



b) Le débit Q



c) La vitesse v



d) Le nombre de Froude F_1

Figure 4.2. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial -Torrentiel (F-T).

Le résultat de la comparaison entre les solutions numériques et les solutions analytiques pour le profil de surface de la profondeur h , le débit Q , la vitesse v et le nombre de Froude F_1 est similaire et identique par rapport aux différents profils. La valeur du nombre de Courant $C_n = 0,82$.

IV.2.3. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial-Torrentiel-Fluvial

Dans le troisième cas, la géométrie du canal est maintenue mais les conditions initiales et aux limites ont changé, dans ce cas on constate qu'un changement du régime d'écoulement

du régime fluvial au régime torrentiel puis revient au régime fluvial, le passage du régime torrentiel au régime fluvial a conduit à la formation d'un ressaut hydraulique.

Le débit $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ est considéré comme une condition limite en amont et la profondeur d'eau $h = 0,33 \text{ m}$ est considéré comme une condition limite en aval, le débit $Q = 0,18 \text{ m}^3/\text{s}$ et la profondeur d'eau $h = 0,33 \text{ m}$ sont considérées aussi comme des conditions initiales.

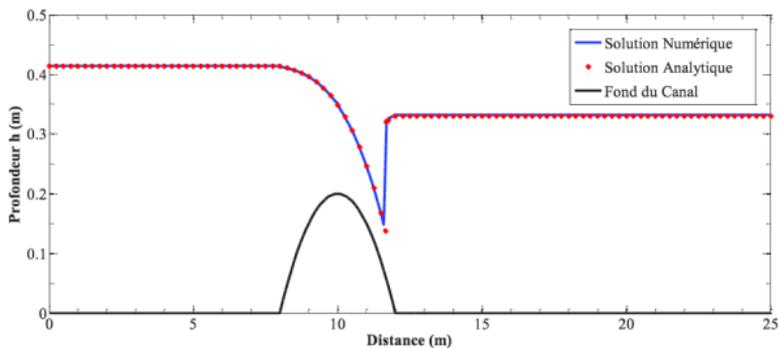
Les valeurs de la solution analytique représentant les caractéristiques de ce régime d'écoulement sont présentées dans le tableau (4.3).

Tableau 4.3. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en Régime Fluvial-Torrentiel-Fluvial (F-T-F).

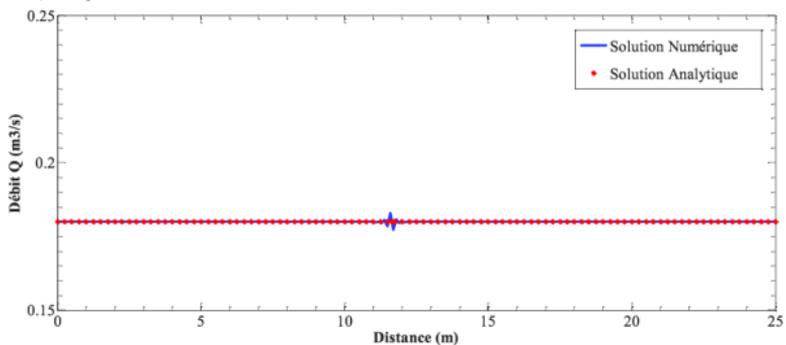
x(m)	ξ (m)	h(m)	z(m)	Q(m ³ /s)	v(m/s)	F ₁
0,00	0,0000	0,4138	0,4138	0,1800	0,435	0,216
.
.
.
8,00	0,0000	0,4138	0,4138	0,1800	0,435	0,216
8,25	0,0469	0,3641	0,4110	0,1800	0,494	0,262
8,50	0,0875	0,3198	0,4073	0,1800	0,563	0,318
8,75	0,1219	0,2806	0,4025	0,1800	0,642	0,387
9,00	0,1500	0,2462	0,3962	0,1800	0,731	0,471
9,25	0,1719	0,2162	0,3881	0,1800	0,833	0,572
9,50	0,1875	0,1903	0,3778	0,1800	0,946	0,693
9,75	0,1969	0,1680	0,3649	0,1800	1,072	0,835
10,00	0,2000	0,1490	0,3490	0,1800	1,208	1,000
10,25	0,1969	0,1327	0,3296	0,1800	1,356	1,189
10,50	0,1875	0,1188	0,3063	0,1800	1,516	1,405
10,75	0,1719	0,1069	0,2788	0,1800	1,684	1,645
11,00	0,1500	0,0967	0,2467	0,1800	1,861	1,912
11,25	0,1219	0,0880	0,2099	0,1800	2,046	2,204
11,50	0,0875	0,0804	0,1679	0,1800	2,238	2,521
11,75	0,0469	0,2767	0,3236	0,1800	0,651	0,395
12,00	0,0000	0,3300	0,3300	0,1800	0,546	0,303
.
.
.
25,00	0,0000	0,3300	0,3300	0,1800	0,546	0,303

La figure (4.3) montre les simulations numériques et les solutions analytiques : du profil de surface de la profondeur d'eau h, du débit, de la vitesse et du nombre de Froude pour un écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial-torrentiel-fluvial.

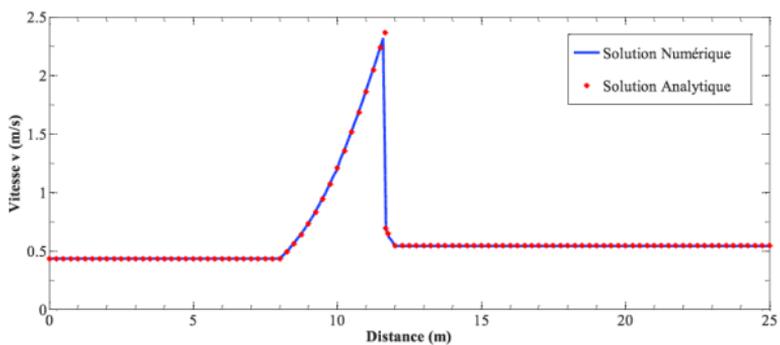
Le pas d'espace de ces simulations $\Delta x = 0,1 \text{ m}$ et le temps de test $t = 50 \text{ s}$.



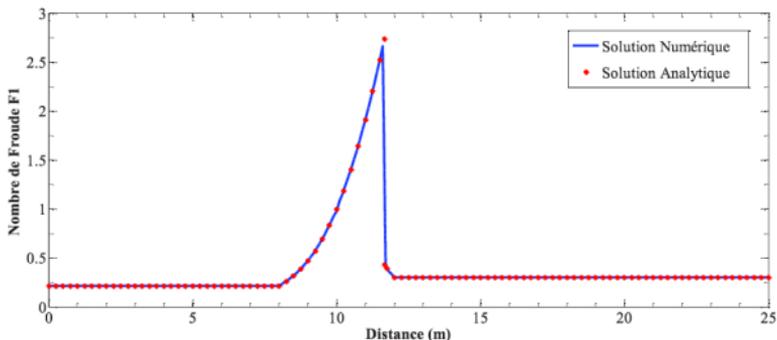
a) La profondeur h



b) Le débit Q



c) La vitesse v



d) Le nombre de Froude F_1

Figure 4.3. Écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime Fluvial-Torrentiel-Fluvial (F-T-F).

La comparaison entre la solution numérique et la solution analytique pour le profil de surface de la profondeur h , le débit Q , la vitesse v et le nombre de Froude F_1 montre qu'une petite modification au niveau la formation du ressaut hydraulique qui représente le changement de régime d'écoulement torrentiel au régime fluvial, généralement les profils sont d'une grande homogénéité et presque identiques. La valeur du nombre de Courant $C_n = 0,7$.

IV.3. RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE

La modélisation numérique du ressaut hydraulique a été étudiée par plusieurs chercheurs. La détermination de la localisation du ressaut hydraulique soumise à plusieurs paramètres hydrauliques et numériques, dans cette partie on va consacrer notre travail dans un premier temps, sur l'impact de ces paramètres hydrauliques et numériques sur la localisation du ressaut hydraulique, on se basant sur les données de Gharangik et Chaudhry (1991). Dans un deuxième temps notre analyse portera sur la localisation du ressaut hydraulique à travers des essais expérimentaux réalisés au laboratoire par Debabeche (2003).

IV.3.1. Impact des paramètres hydrauliques et numériques sur la localisation du ressaut hydraulique

Gharangik et Chaudhry (1991) ont étudié numériquement le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire pour le but de déterminer l'effet du terme de Boussinesq sur la localisation du ressaut hydraulique.

Les essais expérimentaux ont été faits dans un canal rectangulaire horizontal en métal d'une longueur de 14 m, une hauteur de 0,915 m et d'une largeur de 0,46 m. La distance $x = 0,305$ m représente un point de référence pour les mesures expérimentales. Les valeurs du coefficient de rugosité n varient de 0,008 à 0,011. Le pas d'espace Δx utilisé pour les simulations numériques des profils de surfaces varie entre 0,15 m et 0,6 m. Le temps d'essai final est estimé à 150 s et la gamme de nombre de Froude obtenu varie entre 2,30 et 7,0.

Dans cette étude on va analyser l'effet de quelques paramètres sur la localisation du ressaut hydraulique à travers les données expérimentales de Gharangik et Chaudhry (1991).

Les paramètres sont :

- L'effet du changement du pas d'espace Δx ;
- L'effet du changement du coefficient de la quantité de mouvement ou le coefficient de Boussinesq β ;
- L'effet du changement du coefficient de la rugosité de Manning n .

Pour cette analyse on utilise, dans un premier temps, le schéma classique de MacCormack, et dans un deuxième temps, le schéma de MacCormack avec l'extension de haute résolution TVD.

Nous avons choisi l'un des essais expérimentaux effectués dans le laboratoire par Gharangik et Chaudhry (1991) pour un nombre de Froude $F_1 = 4,23$. Les mesures expérimentales du profil de surface du ressaut hydraulique sont représentées dans le tableau (4.4).

Tableau 4.4. Mesure de profil de surface du ressaut hydraulique pour $F_1 = 4,23$ selon (Gharangik et Chaudhry 1991).

Distance x (m)	Profondeur h (m)	Distance x (m)	Profondeur h (m)
0,30	0,043	2,44	0,232
0,61	0,043	2,74	0,229
0,91	0,046	3,05	0,226
1,22	0,049	3,35	0,223
1,52	0,055	3,66	0,223
1,83	0,152	3,96	0,223
2,13	0,207	4,27	0,223

Dans cette étude, le débit $Q = 0,054 \text{ m}^3/\text{s}$ et la profondeur d'eau $h_1 = 0,043$ m sont considérés comme des conditions initiales et aux limites en amont, et la profondeur d'eau $h_2 = 0,223$ m comme une condition limite en aval.

IV.3.1.1. L'effet du changement du pas d'espace Δx

Gharangik et Chaudhry (1991) ont proposé un pas d'espace Δx qui varie entre 0,15 m et 0,6 m. Pour étudier l'effet du changement du pas d'espace Δx sur la localisation du ressaut hydraulique, nous avons opté trois pas d'espace; $\Delta x = 0,15$ m, $\Delta x = 0,3$ m et $\Delta x = 0,5$ m. La figure (4.4) montre les profils de surface du ressaut hydraulique pour les trois pas d'espace proposés ainsi que le profil de l'essai expérimental.

Dans cette simulation nous avons utilisé le schéma de MacCormack classique, le coefficient de Manning $n = 0,008$ et le temps final du test $t = 150$ s.

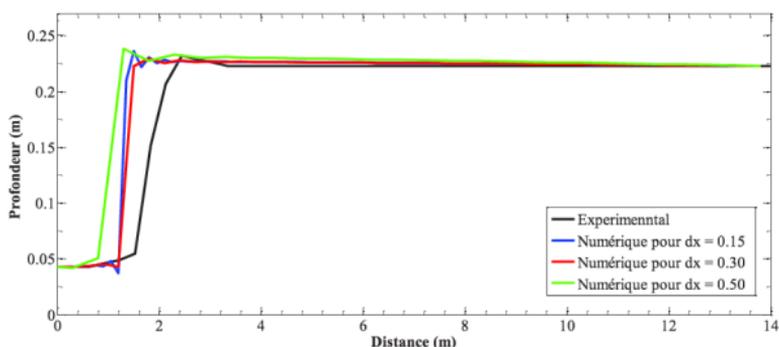


Figure 4.4. Profils de surface du ressaut hydraulique pour $F_1 = 4,23$.

On remarque que pour tous les pas d'espace proposés le ressaut hydraulique se forme à l'amont du profil de l'essai expérimental, la simulation numérique pour le pas d'espace $\Delta x = 0,3$ m est plus stable.

La mauvaise localisation des profils de surface du ressaut hydraulique par rapport au profil des mesures expérimentales nous a conduit à tester d'autres paramètres, tel que le coefficient de la quantité de mouvement β . Les valeurs du nombre de Courant C_n pour ces simulations varient entre 0,45 et 0,56.

IV.3.1.2. L'effet du changement du coefficient de la quantité de mouvement β

Le système des équations de Barré Saint-Venant s'écrit sous sa forme conservative comme suit :

$$\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\beta Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(s - J) + gI_2$$

Avec, β est le coefficient de la quantité de mouvement ou le coefficient de Boussinesq. Pour un écoulement idéal, habituellement la valeur de $\beta = 1$. Le coefficient de la quantité de mouvement varie entre 1,03 et 1,07 pour les canaux prismatiques. Pour étudier l'effet du changement du coefficient de la quantité de mouvement sur la localisation du ressaut hydraulique, nous avons testé trois valeurs de ce coefficient; $\beta = 1,03, 1,05$ et $1,07$; les figures (4.5), (4.6) et (4.7) montrent respectivement les profils de surface du ressaut hydraulique pour les pas d'espace $\Delta x = 0,15 \text{ m}$; $0,3 \text{ m}$ et $0,5 \text{ m}$, le coefficient de Manning $n = 0,008$ et le temps final du test $t = 150 \text{ s}$.

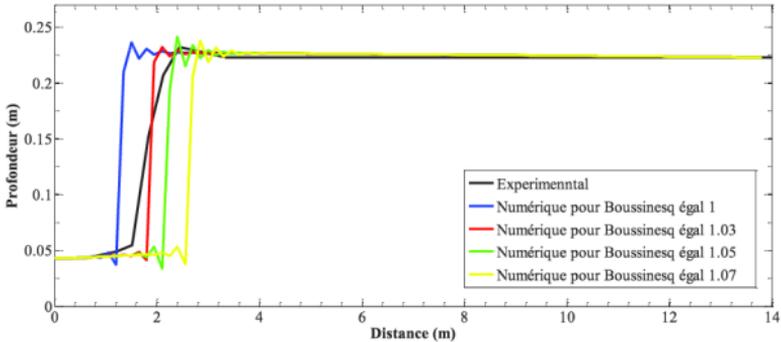


Figure 4.5. Profils de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,15 \text{ m}$.

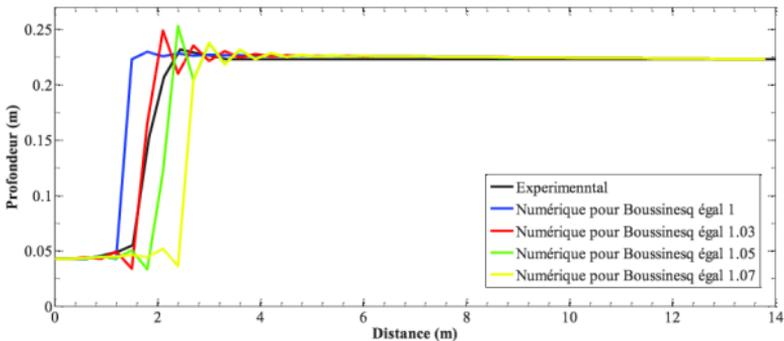


Figure 4.6. Profils de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,3 \text{ m}$.

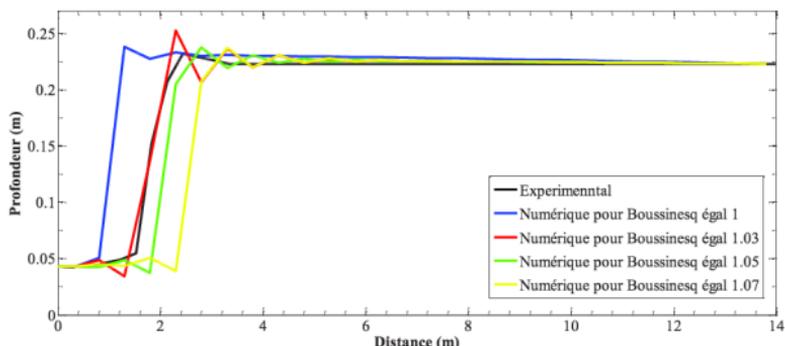


Figure 4.7. Profils de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,5$ m.

On remarque qu'il y a un déplacement du ressaut hydraulique vers l'aval à chaque fois qu'on augmente la valeur du coefficient de Boussinesq, les profils de surface pour le coefficient de Boussinesq $\beta = 1,03$ donnent des bonnes localisations du ressaut hydraulique par rapport au profil de l'essai expérimental. On remarque aussi que les profils de surface du ressaut hydraulique pour le pas d'espace $\Delta x = 0,15$ m sont plus stables par rapport aux autres pas d'espace. Les valeurs du nombre de Courant C_n pour ces simulations varient entre 0,45 et 0,56.

IV.3.1.3. L'effet du changement du coefficient de la rugosité n

Pour étudier l'effet du changement de la rugosité n sur la localisation du ressaut hydraulique, nous avons changé la valeur du coefficient de Manning n de 0,008 à 0,009 pour tous les pas d'espace Δx et les valeurs du coefficient de Boussinesq β proposés, les figures (4.8), (4.9) et (4.10) montrent respectivement les profils de surface du ressaut hydraulique pour les pas d'espace $\Delta x = 0,15$ m ; 0,3 m et 0,5 m. Le temps final du test $t = 150$ s.

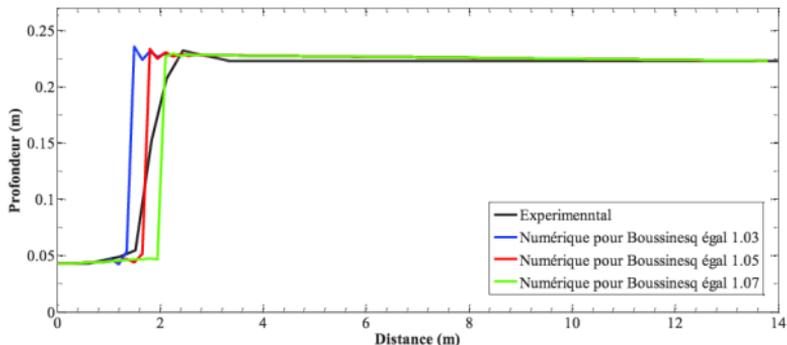


Figure 4.8. Profils de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,15$ m.

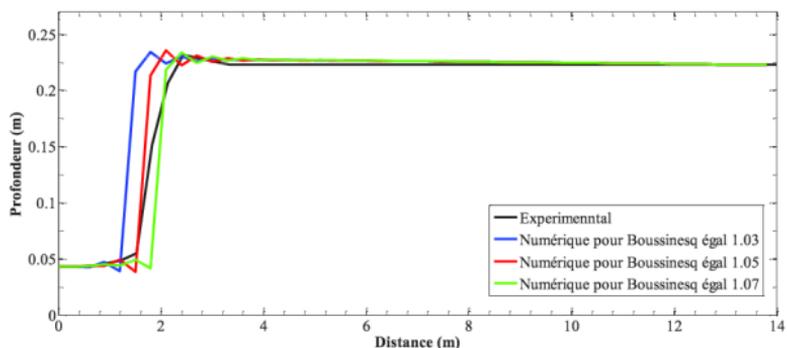


Figure 4.9. Profils de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,3$ m.

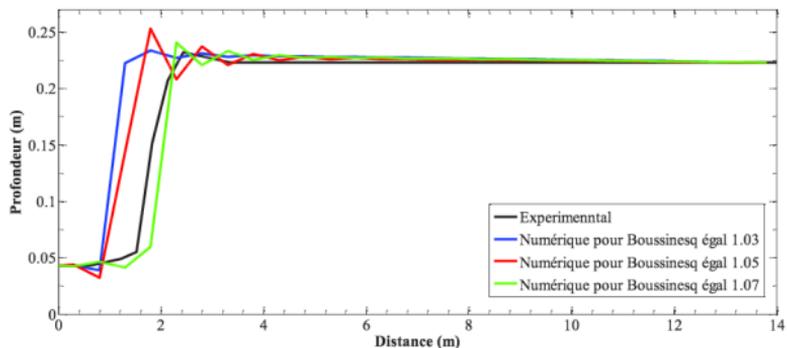


Figure 4.10. Profils de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,5$ m.

On remarque qu'il y a un déplacement du ressaut hydraulique vers l'amont avec l'augmentation de la valeur du coefficient de Manning n , le profil de surface pour le pas d'espace $\Delta x = 0,5$ m et le coefficient de Boussinesq $\beta = 1,07$ donne une bonne localisation du ressaut hydraulique par rapport au profil de l'essai expérimental. Les valeurs du nombre de Courant C_n pour ces simulations varient entre 0,45 et 0,53.

IV.3.1.4. Utilisation de l'extension de haute résolution TVD du schéma de MacCormack

L'extension TVD du schéma de MacCormack joue un rôle important pour minimiser les oscillations de la simulation numérique au niveau de la surface d'écoulement, nous avons ajouté l'extension TVD au schéma classique de MacCormack pour voir l'effet de ce schéma sur la formation du profil de surface du ressaut hydraulique, pour cette étude nous avons utilisé trois pas d'espace $\Delta x = 0,15$ m, $\Delta x = 0,3$ m et $\Delta x = 0,5$ m dans un premier temps. Dans un deuxième temps nous avons changé le coefficient la rugosité de Manning n de 0,008 à 0,01, le coefficient de Boussinesq égal à l'unité $\beta = 1$. Les valeurs du nombre de Courant C_n varient entre 0,23 et 0,33 et le temps final du test $t = 150$ s. les figures (4.11), (4.12) et (4.13) montrent respectivement les profils de surface du ressaut hydraulique des pas d'espace $\Delta x = 0,15$ m ; 0,3 m et 0,5 m pour les coefficients de Manning $n = 0,008$; 0,009 et 0,01.

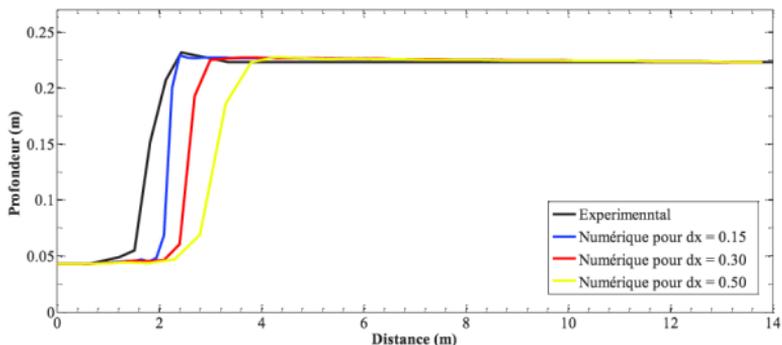


Figure 4.11. Profils de surface du ressaut hydraulique pour $n = 0,008$.

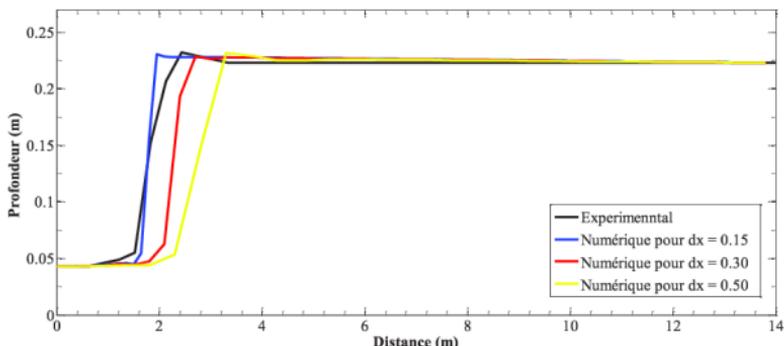


Figure 4.12. Profils de surface du ressaut hydraulique pour $n = 0,009$.

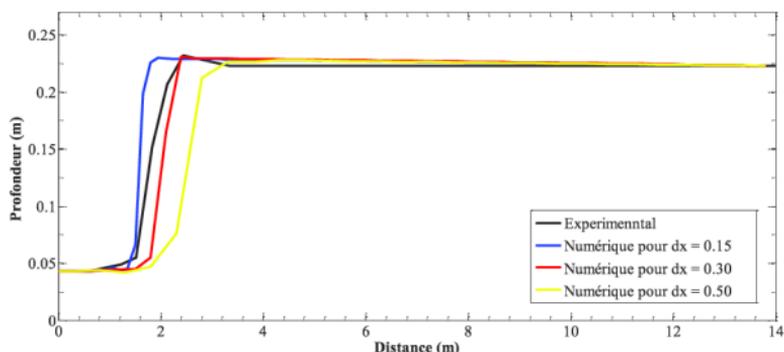


Figure 4.13. Profils de surface du ressaut hydraulique pour $n = 0,01$.

On remarque qu'il y a une stabilité dans les profils de surface du ressaut hydraulique, les oscillations au niveau de la surface découlement sont minimisées. On remarque aussi que pour le coefficient de Manning $n = 0,008$ tous les profils du ressaut hydraulique se déplacent vers l'aval du profil de l'essai expérimental, avec l'augmentation du coefficient de la rugosité n les profils du ressaut hydraulique se déplacent vers l'amont.

Les profils de surface du ressaut hydraulique pour le pas d'espace $\Delta x = 0,15$ m et le coefficient de Manning $n = 0,009$; et pour le pas d'espace $\Delta x = 0,3$ m et le coefficient de Manning $n = 0,01$ donnent une meilleure localisation par rapport au profil de l'essai expérimental.

IV.3.1.5. Variation du profil de surface en fonction du temps

Pour voir la formation du profil de surface du ressaut hydraulique avec le temps du test t , nous avons choisi la simulation numérique du pas d'espace $\Delta x = 0,3$ m, le coefficient de Manning $n = 0,01$, le coefficient de Boussinesq $\beta = 1$, la valeur du nombre de Courant $C_n = 0,27$ et le temps final du test $t = 150$ s, du schéma de MacCormack de haute résolution TVD.

La figure (4.14) montre la formation du profil de surface du ressaut hydraulique à différents temps du test t pour le nombre de Froude $F_1 = 4,23$. Le ressaut se déplace de l'extrémité aval vers l'extrémité amont, puis revient à l'aval et se stabilise dans un seul endroit.

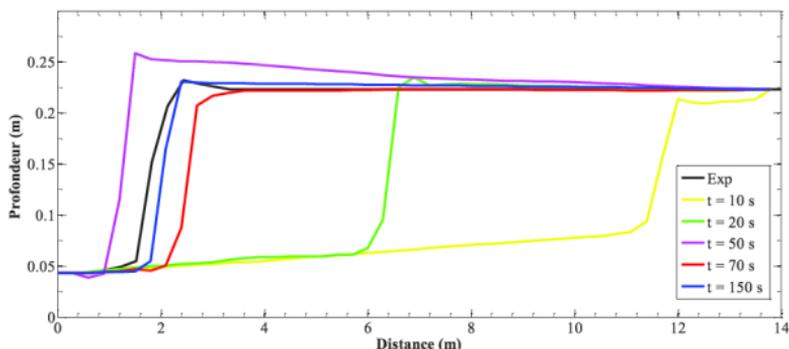


Figure 4.14. Variation du profil de surface du ressaut hydraulique en fonction du temps.

IV.3.1.6. Variation du débit, la Vitesse et le Nombre de Froude

Pour la même simulation choisie, les figures (4.15), (4.16) et (4.17) montrent successivement la variation du débit, la vitesse et le nombre de Froude sur le long du canal.

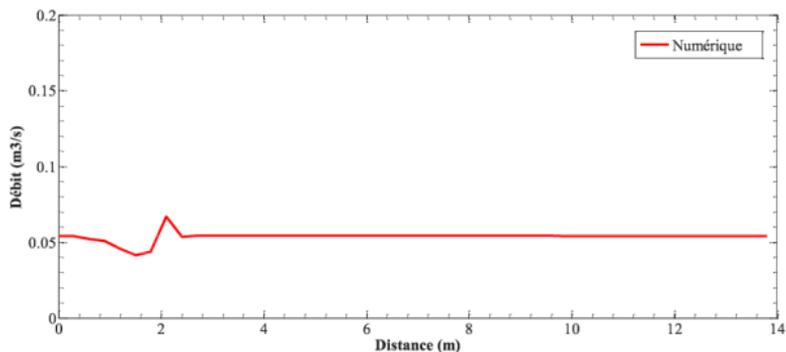


Figure 4.15. Variation du Débit Q .

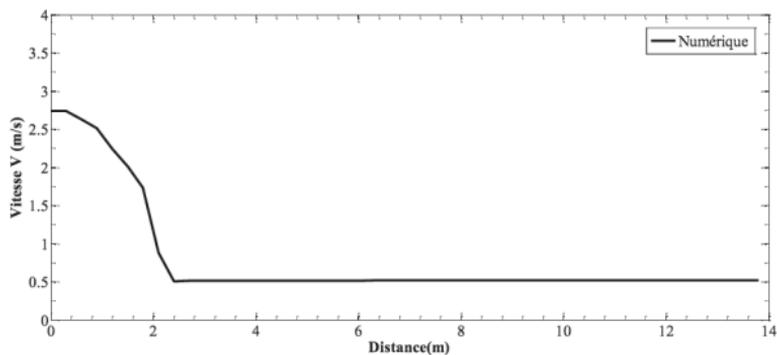


Figure 4.16. Variation de la vitesse v .

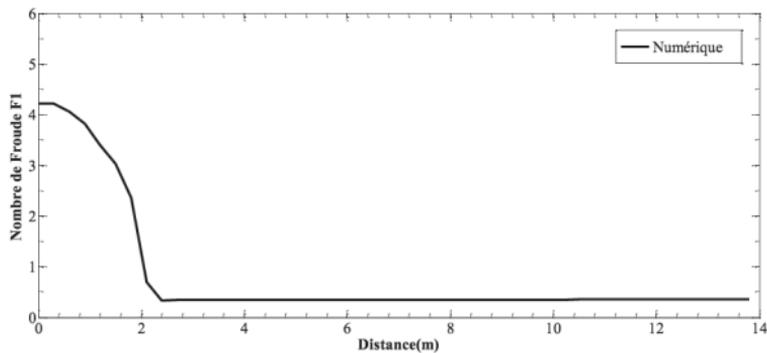


Figure 4.17. Variation du nombre de Froude F_1 .

On remarque qu'il y a une instabilité du débit dans la partie de la formation du ressaut hydraulique à cause du changement du régime d'écoulement du régime torrentiel au régime fluvial, pour la vitesse et le nombre de Froude on remarque une diminution de leurs valeurs pendant la formation du ressaut hydraulique et cela revient aussi au changement du régime d'écoulement.

IV.3.2. Localisation du ressaut hydraulique

IV.3.2.1. Description des essais expérimentaux

Debabeche (2003) a étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire pour le but de déterminer ses caractéristiques, tels que : les hauteurs conjuguées, la longueur et le rendement du ressaut hydraulique.

Le modèle physique (figure 4.18) est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure de section droite rectangulaire par le moyen d'une conduite circulaire de 150 mm de diamètre. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe qui alimente un convergent en charge débouchant dans le canal de mesure.

Le canal de mesure de largeur 0,295 m est muni de parois latérales transparentes permettant les prises de vue et observations. Il est composé de 7 tronçons de 1 m de longueur et 0,54 m de hauteur.

La section de sortie du convergent est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut. Les hauteurs h_1 sont obtenues par le déplacement d'une paroi supérieure mobile.

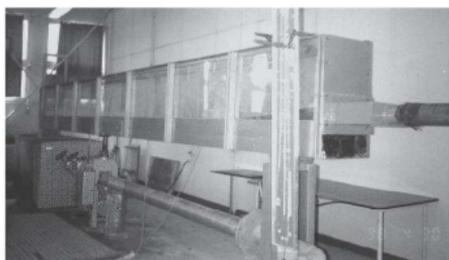


Figure 4.18 : Photographie du canal de mesure utilisé selon (Debabeche 2003).

L'étude expérimentale est menée sous différentes hauteurs initiales h_1 du ressaut correspondant à une large gamme des valeurs du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident. En fait, h_1 et F_1 varient entre $10 \leq h_1 \leq 60$ mm et $1,5 < F_1 < 25$. Des seuils de

différentes hauteurs h_s ont été testés afin d'observer leurs influence sur le contrôle du ressaut, la hauteur des seuils h_s varie entre 1,5 cm et 20 cm.

IV.3.2.2. Simulation numérique

Pour exécuter les simulations numériques nous avons choisi quelques essais expérimentaux effectués au laboratoire. Nous avons utilisé le modèle numérique basé sur le schéma de MacCormack avec l'extension de haute résolution TVD. Le tableau (4.5) montre les caractéristiques de la simulation numérique des essais expérimentaux choisis.

Tableau 4.5. Caractéristiques de la simulation d'un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire.

<i>Pente: $s = 0,00$; Maille: $dx = 0,1$ m; Temps d'essai: $t = 60$ s ; coefficient de rugosité : $K_s = 100$ m^{1/3}/s</i>							
Nombre d'essai	Débit Q (m ³ /s)	Nombre de Froude F_1	Hauteur initiale h_1 (m)	Hauteur finale h_2 (m)	Localisation de R. hydraulique L_c (m)	Lc/L	Hauteurs Conjugées Y
1	0,02527	3,42	0,040	0,1859	0,1	0,014	4,65
2	0,02737	5,70	0,030	0,2390	0,1	0,014	7,97
3	0,01869	7,15	0,020	0,1914	0,1	0,014	9,57

La figure (4.19) montre les simulations numériques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire présentées dans le tableau (4.5).

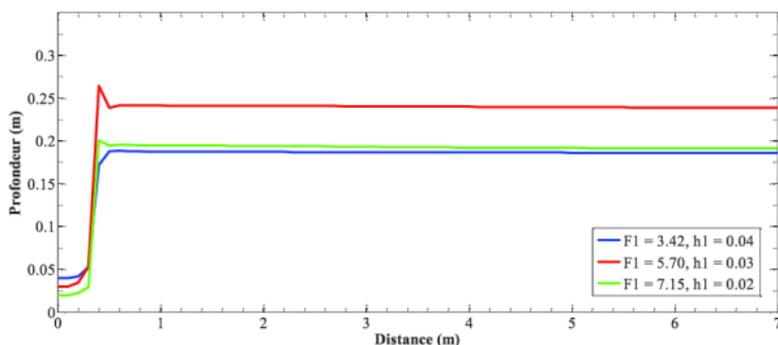


Figure 4.19. Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire (pente = 0).

On remarque que les simulations numériques de tous les profils de surface du ressaut hydraulique ont été placées à l'amont du canal, comme il a été observé dans les essais expérimentaux.

Les simulations numériques pour le canal rectangulaire montrent des bonnes localisations du ressaut hydraulique.

IV.4. DÉPLACEMENT DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRIANGULAIRE

La présente étude a pour objectif d'analyser le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente variable. Le modèle numérique utilisé basé sur le schéma de MacCormack de haute résolution TVD. Plus de 90 simulations numériques du ressaut hydraulique ont été effectuées pour les pentes 0%, 1%, 2%, 3%, 4% et 5%. On se base dans ce travail sur les essais expérimentaux réalisés au laboratoire.

La figure (4.20) montre les différentes positions du ressaut hydraulique avec ses caractéristiques; h_1 est la profondeur initiale mesurée à l'amont du canal au pied du ressaut hydraulique, h_2 est la profondeur finale du ressaut hydraulique mesurée à l'aval du canal au niveau de la surface libre maximale, α est l'angle d'inclinaison du canal par rapport à l'horizontale, L_j est la longueur du ressaut hydraulique mesuré entre les profondeurs h_1 et h_2 . Si la profondeur aval h du canal est inférieure à h_2 , le ressaut hydraulique se déplace vers l'aval du canal (figure 4.20.b). Cependant, le ressaut hydraulique se déplace vers l'amont si la profondeur h à l'aval du canal est supérieure à h_2 , comme il est indiqué dans la figure (4.20.c).

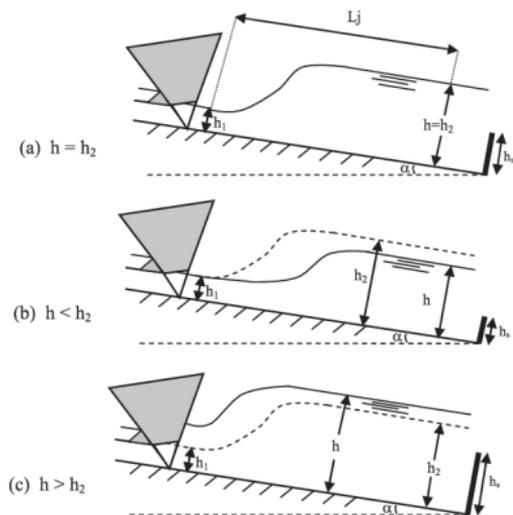


Figure 4.20. déplacement du ressaut hydraulique.

IV.4.1. Description des essais expérimentaux

Les expériences du ressaut hydraulique ont été faites au laboratoire sur un canal triangulaire à pente variable.

Le modèle physique est constitué essentiellement d'un canal de mesure de 3 m de longueur, de section droite triangulaire symétrique d'angle d'ouverture de 90° , alimenté au moyen d'une conduite circulaire de 115 mm de diamètre. Celle-ci est raccordée au canal par le biais d'une boîte métallique fermée, sur laquelle est insérée un convergent en tôle de section triangulaire débouchant directement dans le canal. Le rôle de ce dernier est de générer un écoulement incident à grande vitesse, sa section de sortie est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe axiale débitant jusqu'à 40 l/s, puisant l'eau d'un réservoir d'accumulation. Le canal de mesure de section triangulaire est relié, dans sa partie aval, à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale, permettant la mesure directe du débit. Les figures (4.21) et (4.22) montrent le modèle physique et le canal de mesure utilisé.

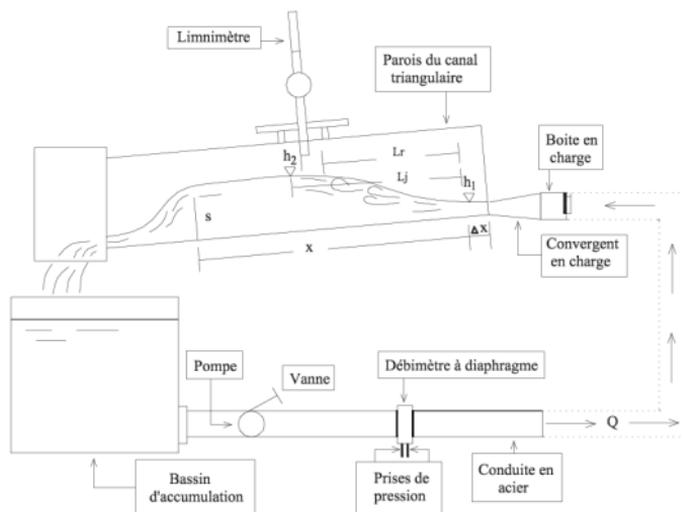


Figure 4.21. Schéma simplifié du canal de mesure de section droite triangulaire, ayant servi à l'expérimentation.



Figure 4.22. Photographie du canal de mesure utilisé.

Les caractéristiques étudiées du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à pente variable sont : le débit volume Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la hauteur h_s du seuil, l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontal et la longueur L_j du ressaut.

L'étude expérimentale a été menée sous trois hauteurs initiales : h_1 (mm) = 35 ; 40 ; 50. Pour chaque hauteur h_1 choisie, il a été donné au canal six positions d'angle d'inclinaison α correspondant chacune à une valeur bien déterminée de la pente positive, de sorte que la tangente de l'angle d'inclinaison α par rapport à l'horizontal, prend les valeurs suivantes (en %) : 0, 1, 2, 3, 4, 5. Une gamme assez pratique de nombres de Froude a été ainsi obtenue : $2 < F_1 < 14$.

L'accroissement du nombre de Froude F_1 entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval ainsi que l'augmentation de la longueur L_j du ressaut ; pour ramener le pied du ressaut à sa position d'origine (à l'amont du canal), il est nécessaire d'augmenter la hauteur du seuil h_s qui se localise à l'extrémité aval du canal.

Le nombre de Froude est calculé à partir de l'application de la relation suivante :

$$F_1^2 = 2Q^2 \cos^5 \alpha / (gh_1^5)$$

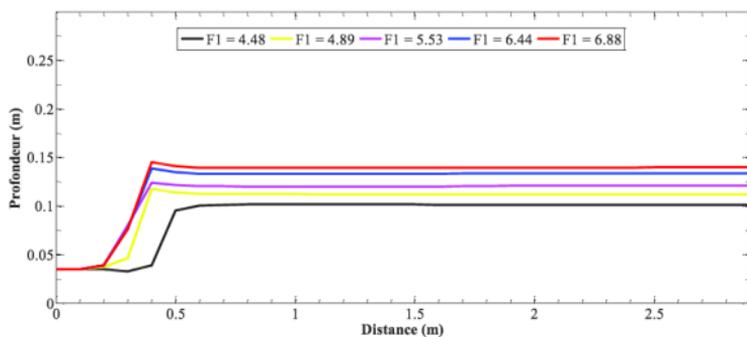
La figure (4.23) illustre la configuration typique de ressaut hydraulique pour la hauteur initiale $h_1 = 35$ mm.



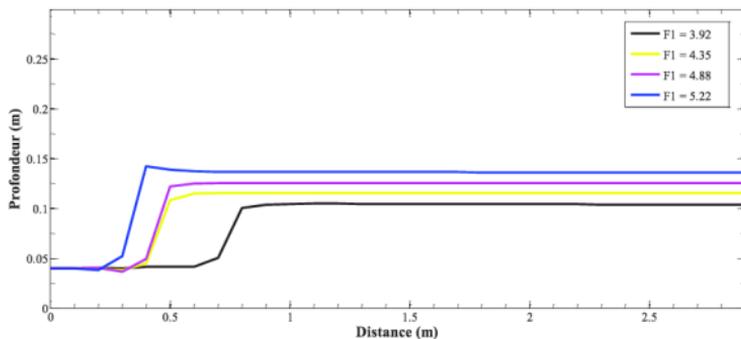
Figure 4.23. Ressaut hydraulique contrôlé à pente positive
 $F_1 = 8,07$; $s = 18$ cm; $L_j = 137$ cm; $h_2 = 18,25$ cm ; $\tan(\alpha) = 0,03$.

IV.4.2. Simulation numérique

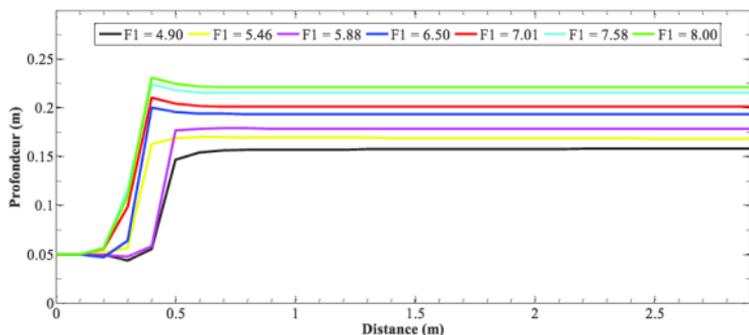
Les figures (4.24), (4.25), (4.26), (4.27), (4.28) et (4.29) montrent les simulations numériques des essais expérimentaux réalisés au laboratoire pour les différentes pentes s testées, les profondeurs initiales h_1 et les nombres de Froude F_1 obtenus.



a) $h_1 = 0,035$ m, la pente $s = 0$.

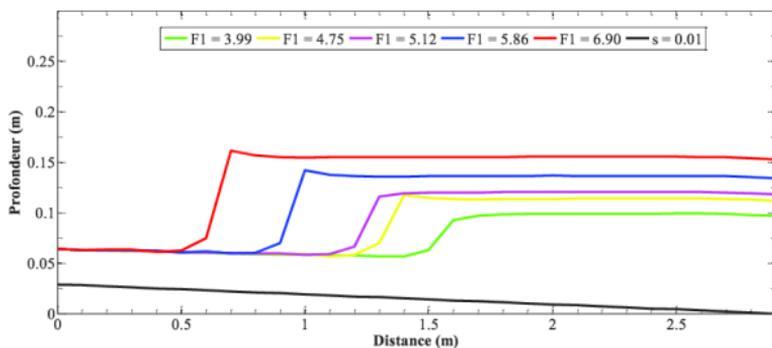


b) $h_1 = 0,04$ m, la pente $s = 0$.

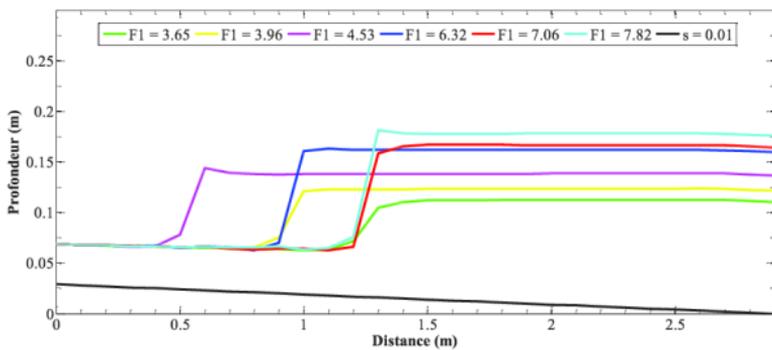


c) $h_1 = 0,05$ m, la pente $s = 0$.

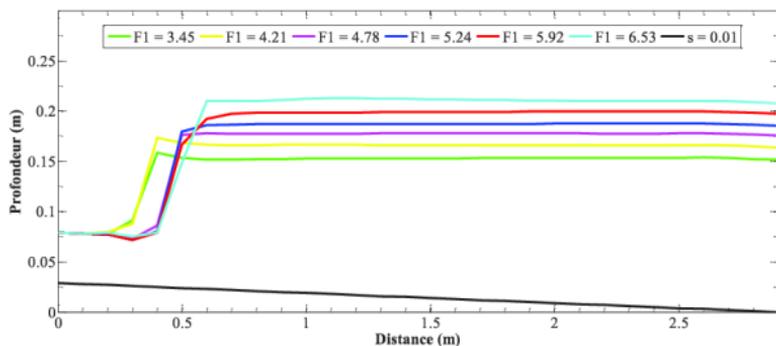
Figure 4.24. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0$).



a) $h_1 = 0,035$ m, la pente $s = 0,01$

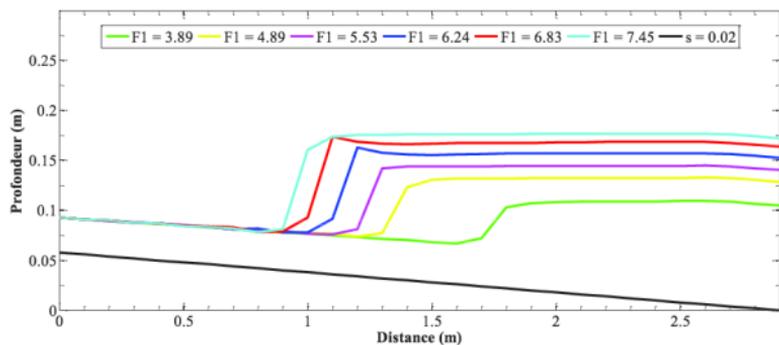


b) $h_1 = 0,04$ m, la pente $s = 0,01$

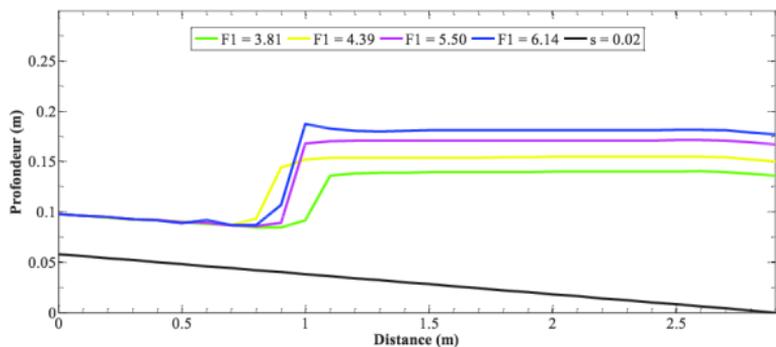


c) $h_1 = 0,05$ m, la pente $s = 0,01$

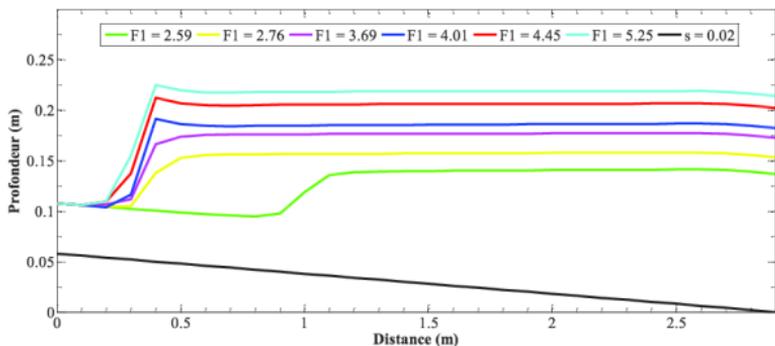
Figure 4.25. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0,01$).



a) $h_1 = 0,035$ m, la pente $s = 0,02$

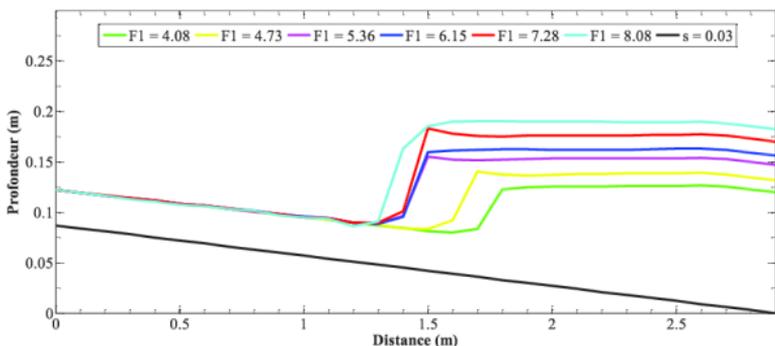


b) $h_1 = 0,04$ m, la pente $s = 0,02$

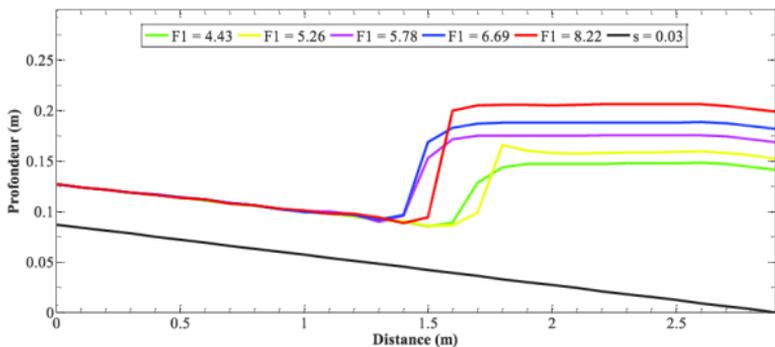


c) $h_1 = 0,05$ m, la pente $s = 0,02$

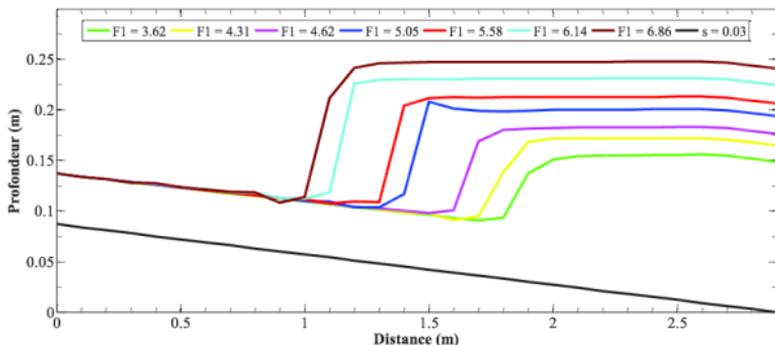
Figure 4.26. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0,02$).



a) $h_1 = 0,035$ m, la pente $s = 0,03$

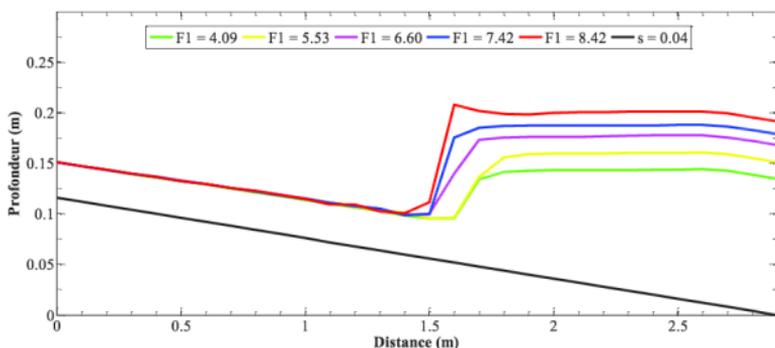


b) $h_1 = 0,04$ m, la pente $s = 0,03$

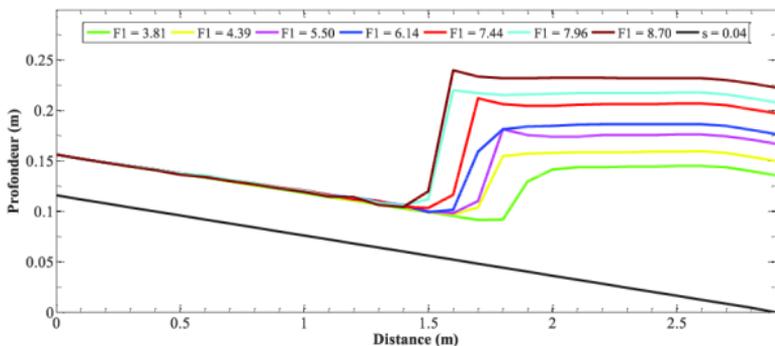


c) $h_1 = 0,05$ m, la pente $s = 0,03$

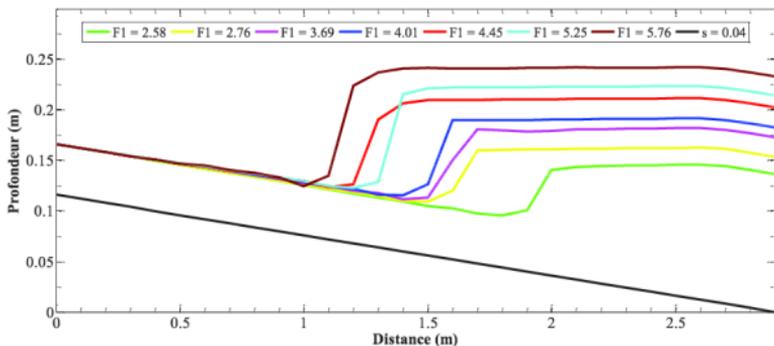
Figure 4.27. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0,03$).



a) $h_1 = 0,035$ m, la pente $s = 0,04$

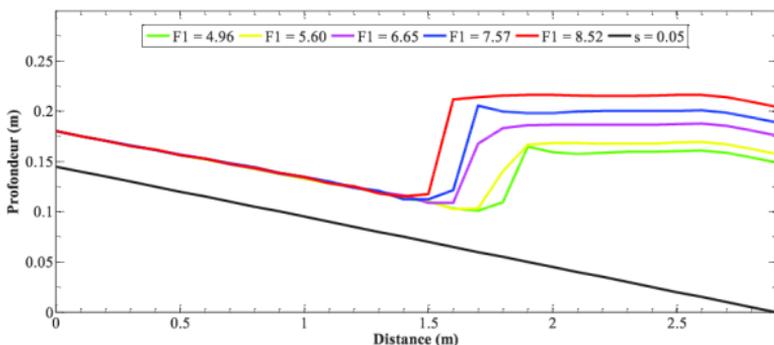


b) $h_1 = 0,04$ m, la pente $s = 0,04$

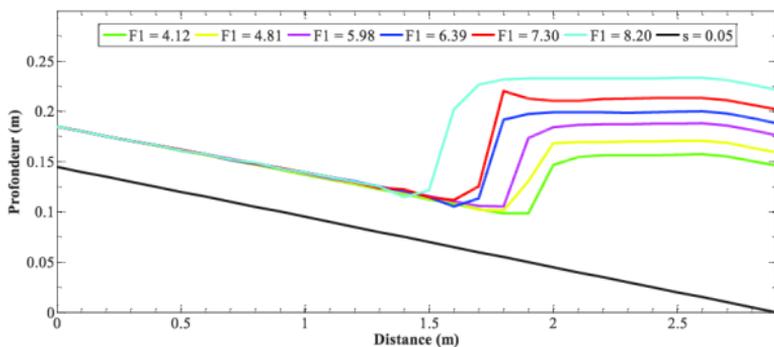


c) $h_1 = 0,05$ m, la pente $s = 0,04$

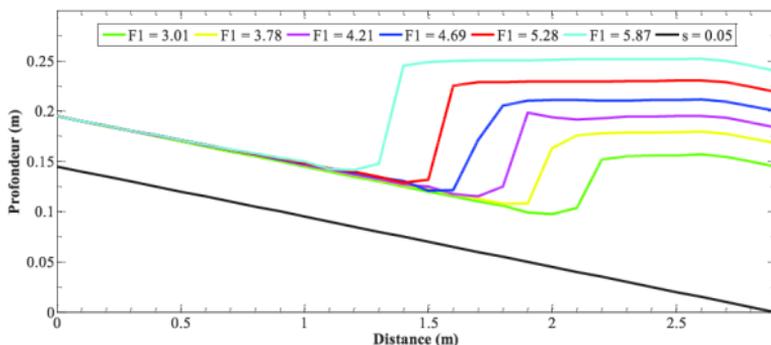
Figure 4.28. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0,04$).



a) $h_1 = 0,035$ m, la pente $s = 0,05$



b) $h_1 = 0,04$ m, la pente $s = 0,05$



c) $h_1 = 0,05$ m, la pente $s = 0,05$

Figure 4.29. Ressaut hydraulique dans un canal triangulaire (pente $s = 0,05$).

On remarque que les simulations numériques nous ont donné plusieurs localisations du ressaut hydraulique dans le canal triangulaire pour toutes les pentes testées. Ces différents emplacements nous entraînent à étudier le déplacement du ressaut hydraulique.

IV.4.3. Analyse et discussion

Les analyses des simulations numériques du ressaut hydraulique montrent que ce dernier se localise à l'amont du canal pour la pente nulle ($s = 0$). Avec l'augmentation de la pente, le ressaut hydraulique se déplace vers l'aval.

Pour étudier le déplacement du ressaut hydraulique, nous avons choisi trois pentes du canal triangulaire: 0 %, 2% et 5%. Le tableau (4.6) montre les caractéristiques des simulations numériques de quelques essais expérimentaux réalisés au laboratoire pour les pentes 0 %, 2% et 5% choisies.

Tableau 4.6. Caractéristiques de la simulation d'un ressaut hydraulique dans un canal triangulaire.

Maille : $dx = 0,1$ m; Temps d'essai : $t = 60$ s ; coefficient de rugosité de Strickler : $K_s = 100$ $m^{1/3}s^{-1}$

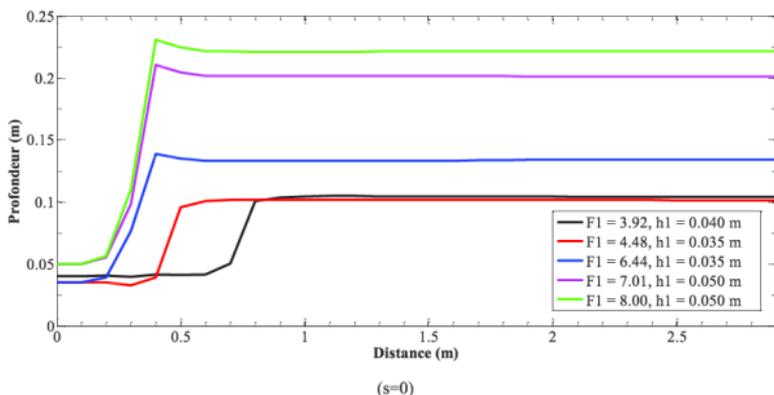
Nombre d'essai	Pente s	Débit Q (m^3/s)	Nombre de Froude F_1	Hauteur initiale h_1 (m)	Hauteur finale h_2 (m)	Localisation du R. hydraulique L_c (m)	L_c/L	Hauteurs Conjuguées Y
1	0,00	0,00278	3,92	0,040	0,1038	0,6	0,2069	2,60
2	0,00	0,00227	4,48	0,035	0,1013	0,3	0,1034	2,89
3	0,00	0,00327	6,44	0,035	0,1339	0,1	0,0345	3,83
4	0,00	0,00868	7,01	0,050	0,2013	0,1	0,0345	4,03
5	0,00	0,00991	8,00	0,050	0,2213	0,1	0,0345	4,43
6	0,02	0,00342	2,76	0,05	0,1537	0,3	0,1034	3,07
7	0,02	0,00457	3,69	0,05	0,1730	0,3	0,1034	3,46

8	0,02	0,00311	4,39	0,04	0,1502	0,7	0,2414	3,76
9	0,02	0,00390	5,50	0,04	0,1670	0,8	0,2759	4,18
10	0,02	0,00281	5,53	0,035	0,1403	1,1	0,3793	4,01
11	0,02	0,00378	7,45	0,035	0,1722	0,8	0,2759	4,92
12	0,05	0,00373	3,01	0,05	0,1451	2,1	0,7241	2,90
13	0,05	0,00469	3,78	0,05	0,1681	1,8	0,6207	3,36
14	0,05	0,00292	4,12	0,04	0,1458	1,9	0,6552	3,65
15	0,05	0,00581	4,69	0,05	0,2001	1,5	0,5172	4,00
16	0,05	0,00726	5,87	0,05	0,2404	1,3	0,4483	4,81
17	0,05	0,00424	5,98	0,04	0,1764	1,7	0,5862	4,41
18	0,05	0,00337	6,65	0,035	0,1757	1,5	0,5172	5,02
19	0,05	0,00581	8,20	0,04	0,2215	1,4	0,4828	5,54
20	0,05	0,00433	8,52	0,035	0,2042	1,4	0,4828	5,83

Le débit Q et la profondeur initiale h_1 sont considérés en tant que conditions initiales et aux limites en amont, la profondeur finale h_2 est une condition limite en aval.

Nous avons fixé les deux premiers points en amont et les deux derniers points en aval du canal pour donner au modèle plus de rigidité, le temps de test de la simulation $t = 60$ s et le pas d'espace $\Delta x = 0,1$ m.

La figure (4.30) montre les simulations numériques présentées dans le tableau (4.6) pour un ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Les valeurs du nombre de Courant C_n pour ces simulations varient entre 0,32 et 0,45.



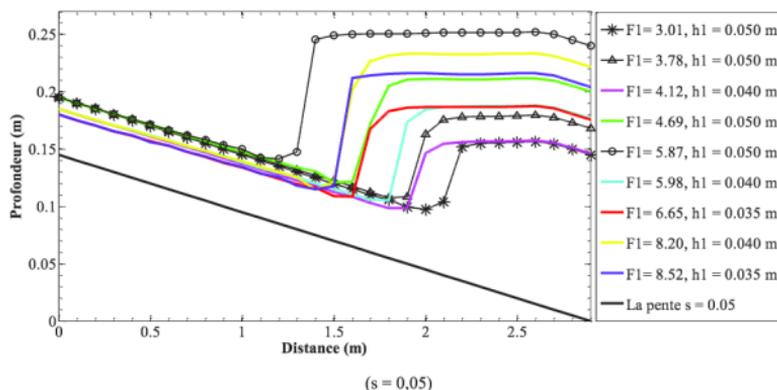
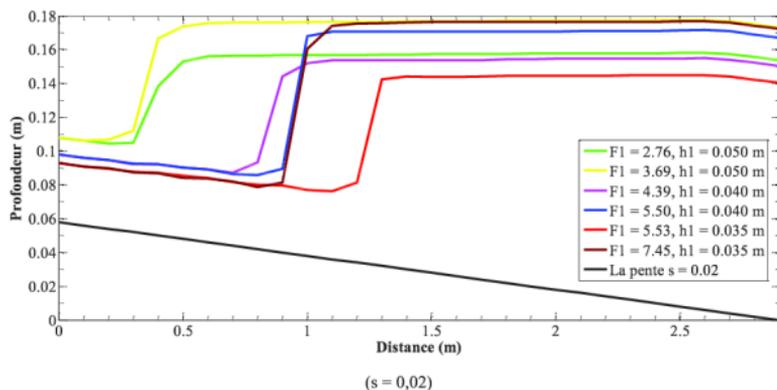


Figure 4.30. Simulation numérique d'un ressaut hydraulique dans un canal triangulaire pour les pentes ($s = 0 ; 0,02 ; 0,05$).

On remarque que le ressaut hydraulique se localise à l'amont du canal pour la plupart des simulations dans la pente horizontale, aussi bien que, pour les petits nombres de Froude avec la pente égal à 0,02. Cependant, pour des grands nombres de Froude le ressaut hydraulique se déplace vers l'aval. Chaque fois que la pente augmente, le ressaut hydraulique se déplace en aval.

Nous avons constaté qu'il est difficile de mesurer avec précision la profondeur finale h_2 pour les grandes pentes ainsi que pour les grands nombres de Froude, et cela à cause de

l'instabilité de la surface libre de l'écoulement, ce qui entraîne un intervalle de précision de la profondeur finale $h_2 \pm 0,01$ m.

Pour déplacer le ressaut hydraulique à l'amont du canal nous avons augmenté la profondeur finale h_2 , ensuite nous avons étudié la relation entre les simulations numériques des profondeurs finales h_2 (h_2 simulée) et les autres caractéristiques du ressaut hydraulique.

IV.4.4. Résultats

Pour déterminer la localisation du ressaut hydraulique, nous avons besoin dans un premier temps de trouver une relation entre les hauteurs conjuguées Y simulée en fonction de nombre de Froude F_1 et la pente du canal s d'une part, et Y expérimentale en fonction de nombre de Froude F_1 et la pente du canal s d'autre part, dans un deuxième temps on calcule la différence entre les hauteurs conjuguées $Y_{sim} = h_{2sim}/h_1$ et $Y_{exp} = h_{2exp}/h_1$, duquel résulte une nouvelle relation h_d/h_1 , dans un troisième temps et à travers la nouvelle relation trouvée on peut développer une relation générale qui détermine la localisation du ressaut hydraulique. La figure (4.31) montre la variation des hauteurs conjuguées simulées en fonction du nombre du Froude et la pente du canal s , et la figure (4.32) montre la variation des hauteurs conjuguées expérimentales en fonction du nombre de Froude et la pente du canal s .

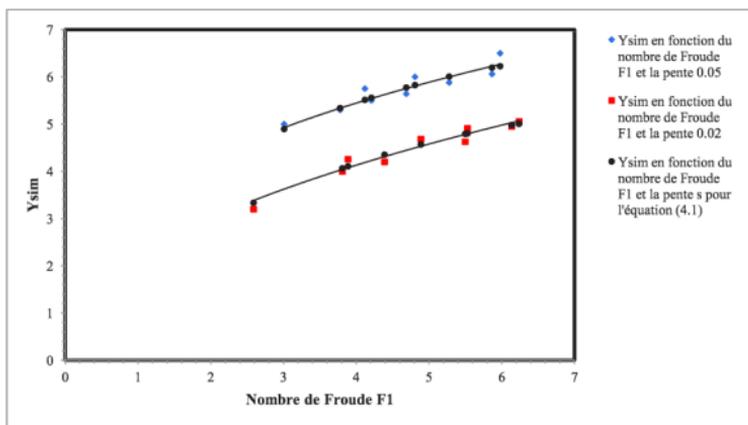


Figure 4.31. Variation des hauteurs conjuguées simulées en fonction du nombre de Froude et la pente s .

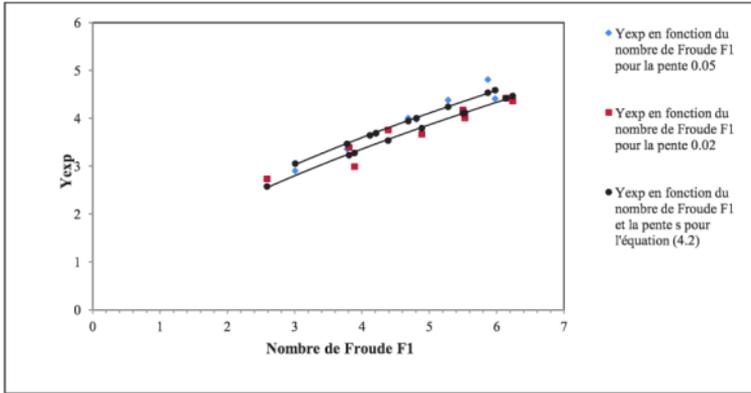


Figure 4.32. Variation des hauteurs conjuguées expérimentales en fonction du nombre de Froude et la pente s .

La relation qui représente le rapport h_{2sim}/h_1 peut s'écrire comme suit :

$$\frac{h_{2sim}}{h_1} = a + bF_1 + cF_1^2 + \frac{d}{tg\alpha} \quad (4.1)$$

Avec, $a = 3,3622$, $b = 0,9703$, $c = -0,0582$ and $d = -0,0432$; et $R^2 = 0,97$

La relation qui représente le rapport h_{2exp}/h_1 peut s'écrire comme suit :

$$\frac{h_{2exp}}{h_1} = a + bF_1 + cF_1^2 + \frac{d}{tg\alpha} \quad (4.2)$$

Avec, $a = 1,5254$, $b = 0,5869$, $c = -0,0078$, $d = -0,0083$; et $R^2 = 0,93$

La différence entre les deux relations (4.1) et (4.2) nous donne la relation suivante :

$$\frac{h_d}{h_1} = a + bF_1 + cF_1^2 + \frac{d}{tg\alpha} \quad (4.3)$$

Avec; $a = 1,8368$, $b = 0,3834$, $c = -0,0504$, $d = -0,0349$; et $R^2 = 0,93$

Il est noté que ces formules sont valables pour des pentes faibles, en excluant la pente horizontale ($s=0$) dans cette étude, puisque elle donne une bonne localisation du ressaut hydraulique.

Les figures (4.33) et (4.34) représentent successivement les relations (4.1) et (4.2)

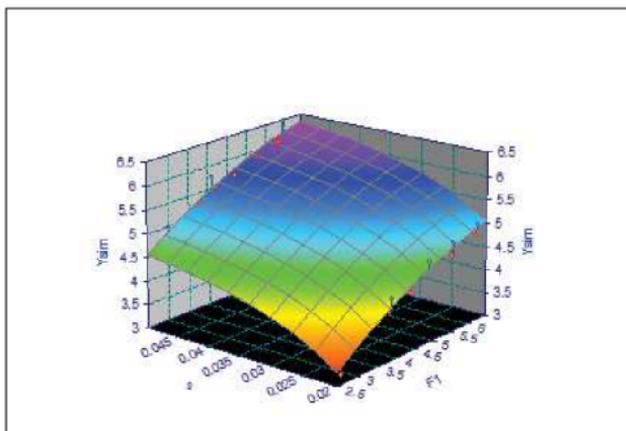


Figure 4.33. Relation entre les hauteurs conjuguées simulées en fonction du nombre de Froude F_1 et la pente s .

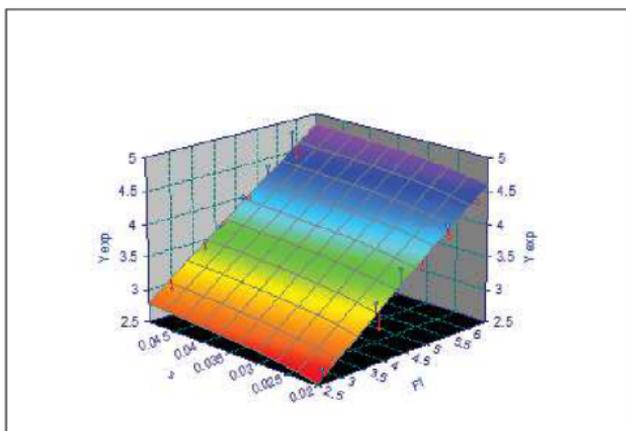


Figure 4.34. Relation entre les hauteurs conjuguées expérimentales en fonction du nombre de Froude F_1 et la pente s .

Afin de déterminer la localisation du ressaut hydraulique, nous allons étudier la relation entre le déplacement du ressaut hydraulique L_r/h_1 en fonction de la différence des hauteurs conjuguées h_d/h_1 et la pente s . La figure (4.35) montre cette variation et la figure (4.36) montre la relation trouvée pour cette variation.

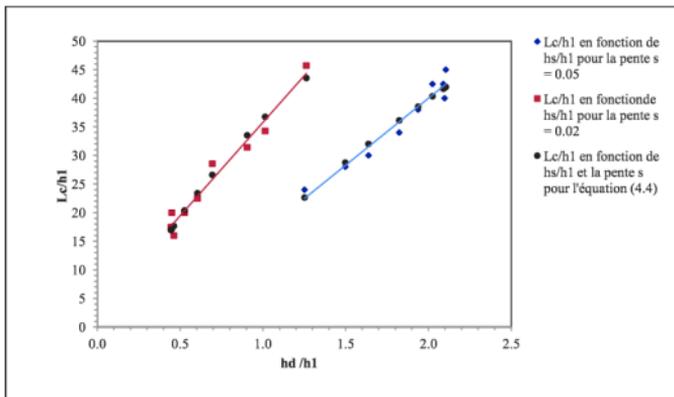


Figure 4.35. Variation entre la localisation du ressaut hydraulique L_c/h_1 en fonction de la différence h_d/h_1 et la pente s .

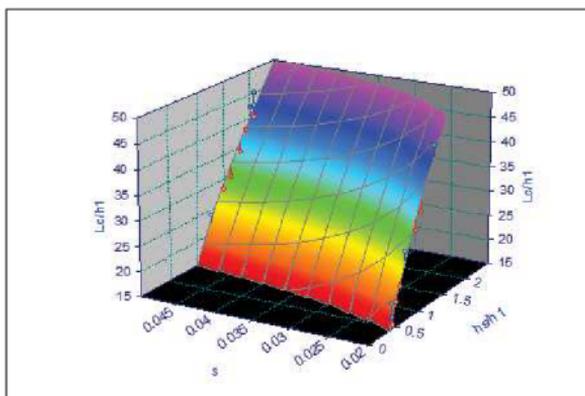


Figure 4.36. Relation entre la localisation du ressaut hydraulique L_c/h_1 en fonction de la différence h_d/h_1 et la pente s .

L'équation générale obtenue qui détermine la localisation du ressaut hydraulique peut s'écrire comme suit :

$$\frac{L_c}{h_1} = a + b \frac{h_d}{h_1}^{0,5} + \frac{c}{(tg\alpha)^{1,5}} \quad (4.4)$$

Avec ; $a = -49,55$, $b = 58,28$; $c = 0,08$; et $R^2 = 0,96$

Dans cette partie nous avons établi une relation (4.4) permettant de déterminer le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente variable.

IV.5. CONCLUSION

Pour étudier numériquement le ressaut hydraulique dans des canaux prismatiques, nous avons développé deux modèles numériques en MATLAB®, le premier basé sur le schéma classique de MacCormack tends qu'au deuxième nous avons ajouté l'extension TVD du schéma de MacCormack. L'application de ces deux modèles a été faite par des simulations numériques à travers des essais expérimentaux réalisés au laboratoire.

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons validé le modèle numérique à travers des comparaisons entre les simulations numériques effectuées par le modèle réalisé et les solutions analytiques calculées par des formules développées, pour trois différents types des régimes d'écoulements ; écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial, écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial-torrentiel et écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial-torrentiel-fluvial. Les résultats obtenus présentent une conformité entre les solutions numériques et les solutions analytiques.

Dans la deuxième partie nous avons analysé numériquement la localisation du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à partir des données des essais expérimentaux réalisé par Gharangik et Chaudhry (1991). Trois paramètres ont été étudiés pour cette analyse ; L'effet du changement du pas d'espace Δx ; L'effet du changement du coefficient de la quantité de mouvement β et l'effet du changement du coefficient de Manning n . Les résultats obtenus montrent que les trois paramètres ont une influence directe sur la localisation du ressaut hydraulique. L'augmentation du coefficient de Boussinesq β favorise le déplacement du profil du ressaut hydraulique vers l'aval par contre l'augmentation du coefficient de Manning n pousse le profil du ressaut hydraulique vers l'amont. L'effet du pas d'espace Δx est relativement négligeable par rapport aux deux autres paramètres. L'utilisation du schéma de MacCormack avec l'extension TVD minimise les oscillations sur la surface d'écoulement et donne une bonne localisation du ressaut hydraulique. Nous avons aussi présenté les simulations numériques des essais expérimentaux réalisés par Debabeche (2003) pour un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, les simulations numériques donnent aussi des bonnes localisations du ressaut hydraulique.

Dans la troisième et la dernière partie de ce chapitre, nous avons étudié le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente variable. Une relation générale a été développée à partir des essais expérimentaux réalisés au laboratoire et des simulations numériques effectuées par le modèle réalisé, permettant de déterminer l'emplacement du ressaut hydraulique dans n'importe quel lieu dans le canal.

Chapitre V

**ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET
NUMÉRIQUE SUR LE
DÉPLACEMENT D'UN RESSAUT
HYDRAULIQUE DANS UN CANAL
RECTANGULAIRE EN PRÉSENCE
D'UN OBSTACLE**

ÉTUDE EXPÉRIMENTALE ET NUMÉRIQUE SUR LE DÉPLACEMENT D'UN RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE EN PRÉSENCE D'UN OBSTACLE

V.1. INTRODUCTION

Le présent chapitre a pour but d'étudier par voie expérimentale et numérique le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle.

Trois parties seront abordées dans ce chapitre. Dans la première partie on commence par une description générale sur le modèle expérimental. Dans la deuxième partie une étude expérimentale contenant la description des essais expérimentaux et les résultats obtenus sera présentée, et dans la dernière partie une comparaison entre les résultats des essais expérimentaux avec les simulations numériques de ces essais.

V.2. PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE

Avant d'aborder l'étude expérimentale, nous allons présenter une description détaillée du modèle expérimental, une description des essais expérimentaux effectués au laboratoire LARGHYDE, et les différents appareillages des mesures utilisés.

V.2.1. Description du canal

Le banc d'essais est constitué d'un grand canal rectangulaire (figures 5.1), dans lequel est inséré un canal de mesure de section rectangulaire, caractérisé par une largeur de base de 20 cm et d'une longueur de 5 m (figures 5.2). Le canal est relié au bassin d'alimentation par une conduite de PVC circulaire de 115 mm de diamètre. Cette conduite est reliée à une boîte métallique fermée (figure 5.3), sur laquelle est insérée une ouverture en tôle de section rectangulaire débouchant dans le canal. Le rôle de cette dernière est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie de celle-ci est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut. Le canal de mesure est relié dans sa partie aval, à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale, permettant la mesure directe du débit (figure 5.4). L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe axiale (figure 5.5) d'un débit allant jusqu'à 44 l/s.



Figure 5.1. Photographie du canal de mesure utilisé (vu latérale).



Figure 5.2. Photographie du canal de mesure utilisé (vu en plan).



Figure 5.3. Photographie de la boîte en charge et vanne de manipulation.



Figure 5.5. Pompe centrifuge.



Figure 5.4. Déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale.

V.2.2. Mesure du débit

Comme il a été cité précédemment, le canal de mesure de section rectangulaire est relié, dans sa partie aval, à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale, réalisé et testé par Hachemi Rachedi (2006), permettant la détermination du débit volume Q . Cette procédure est assurée par l'injection des hauteurs déversantes (h).

Dans la formule (5.1) en assurant la condition d'application de celle ci qui est :

$\beta_1 < 0,45$; avec $\beta_1 = b/B$.

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g}\beta_1(1 + 0,16496\beta_1^{2,0716})^{3/2}h_{dev}^{3/2} \quad (5.1)$$

Q : le débit en (m^3/s);

B : la largeur du canal en (m) ;

g : l'accélération de la pesanteur (m/s^2) ;

β_1 : Rapport de forme ;

b : largeur de l'échancrure ;

h : la hauteur de la lame d'eau.

La condition d'application de cette relation est : $\beta_1 < 0,45$

V.2.3. Limnimétrie

A l'exception de la hauteur initiale du ressaut, dont la valeur est assimilée à la hauteur due à la section de la sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été évaluées par un limnimètre.

La lecture sur le limnimètre s'effectue en deux étapes : on procède d'abord à la lecture de la graduation sur la règle, située immédiatement en haut du zéro du vernier, puis on effectue la lecture du nombre de cinquantième en face de la division qui coïncide ou celle qui est la plus rapprochée d'une division de la règle.

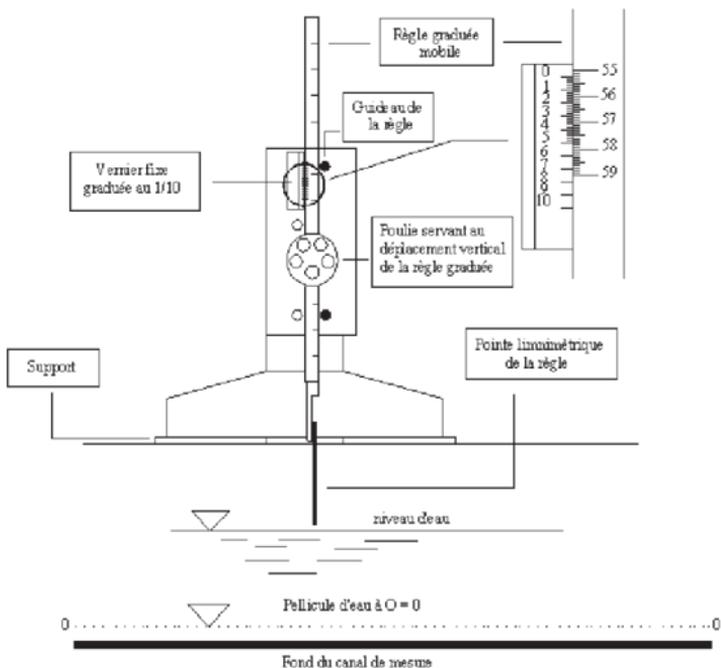


Figure 5.6 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.

V.3. ÉTUDE EXPÉRIMENTAL

V.3.1. Description des essais

L'étude expérimentale s'intéresse au déplacement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle (seuil). Les essais expérimentaux ont été menés sous trois hauteurs initiales de l'écoulement : h_1 (mm) = 32,5; 37 et 40. La hauteur initiale h_1 du ressaut est assimilée à l'ouverture du convergent en charge générant l'écoulement incident, cette ouverture placée à l'entrée du canal de mesure et elle occupe une distance de 30 cm de la longueur du canal. Pour chaque hauteur h_1 choisie, et avec l'augmentation du débit Q parfois et l'élévation de la hauteur de seuil h_s d'autres fois, on mesure la distance du déplacement du ressaut hydraulique L_c dans le canal de mesure. La mesure de la profondeur h_2 se fait à l'aide d'un limnimètre.

Une large gamme du nombre de Froude a été obtenue, correspondant à : $2,9 < F_1 < 5,3$. La formation du ressaut est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement, ce seuil est placé à 4 m de l'ouverture du convergent en charge. A cet effet, des seuils de différentes hauteurs ont été utilisés.

Les caractéristiques hydrauliques et géométriques qui intéressent la présente étude expérimentale sont : le débit volume Q , la hauteur initiale h_1 du ressaut, la hauteur finale h_2 du ressaut, la hauteur du seuil h_s et le déplacement du ressaut L_c . Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut, la hauteur relative $H_s = h_s/h_1$ du seuil.

Les figures (5.7) et (5.8) illustrent deux configurations typiques pour deux cas de déplacement du ressaut hydraulique en canal rectangulaire, pour des nombres de Froude $F_1 = 4,9$ et $5,3$.



Figure 5.7. Photographie d'un ressaut hydraulique pour $F_1 = 4,9$.



Figure 5.8. Photographie d'un ressaut hydraulique pour $F_1 = 5,3$ (vu en plan).

Pour obtenir les résultats expérimentaux, nous avons procédé aux étapes suivantes :

1. Calcul du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, par application de la relation :

$$F_1 = \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2h_1^3}} ;$$

2. Mesure de la hauteur géométrique h_s du seuil;

3. Mesure de la hauteur conjuguée aval h_2 du ressaut;

4. Mesure du déplacement L_c du ressaut;

5. Calcul du débit correspondant, par application de la relation (5.1);

V.3.2. Résultats expérimentaux

En raison de l'incapacité de trouver une approche expérimentale directe qui représente le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle, l'analyse des essais expérimentaux a été réalisée en deux étapes :

- La première étape consiste à la détermination d'une relation qui représente la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 .

- La deuxième étape consiste à la recherche d'une relation qui représente le déplacement du ressaut hydraulique L_c en fonction de ses caractéristiques.

V.3.2.1. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1

Pour trouver une relation qui représente la variation du rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 , nous avons étudié la variation de la différence du rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées et la hauteur relative $H_s = h_s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 (figure 5.9).

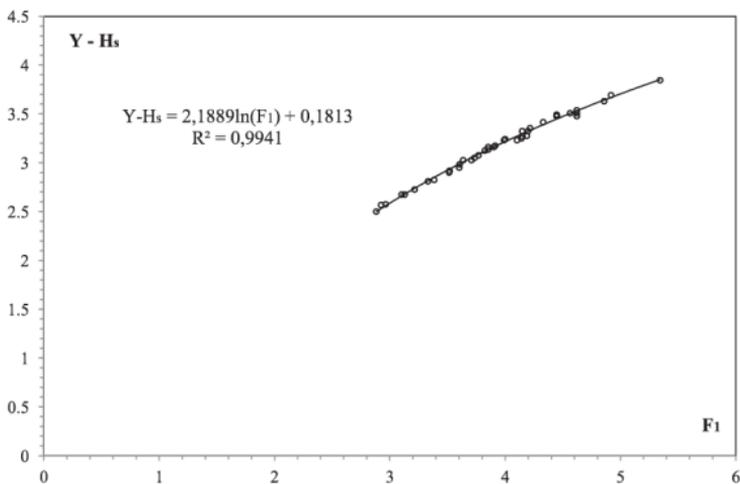


Figure.5.9. variation du Y-Hs, en fonction du F_1 .

Selon la figure (5.9), l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation de la différence du rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées et la hauteur relative $H_s = h_s/h_1$ du seuil en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type logarithmique.

Une relation expérimentale a été trouvée à partir de l'ajustement des mesures expérimentales représentés dans la figure (5.9), permet de calculer le rapport Y des hauteurs conjuguées, cette relation peut s'écrire comme suit :

$$Y_{\text{form}} = H_s + 2.1889 * \ln(F_1) + 0,1813 \quad (5.2)$$

Afin de vérifier la validité de l'équation (5.2), celle-ci est confrontée au rapport Y_{exp} des hauteurs conjuguées expérimentales calculé.

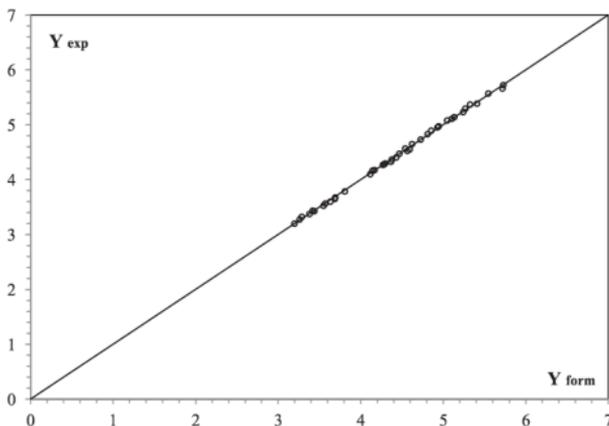


Figure 5.10. Variation du rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction du rapport des hauteurs conjuguées de la formule Y_{form} calculée selon la relation (5.2).
 (—) Première bissectrice d'équation : $Y_{exp} = Y_{form}$.

La figure (5.10) montre que les points obtenus se répartissent de manière quasi uniforme autour de la première bissectrice.

Par ailleurs, les écarts relatifs entre les rapports des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} et les rapports des hauteurs conjuguées de la formule Y_{form} sont calculés et présentés au tableau (5.1).

Tableau 5.1. Écarts relatifs en (%) entre Y_{exp} expérimentales et Y_{form} formule.

Y_{exp}	F_1	$Y_{formule}$	$\Delta Y/Y$	Y_{exp}	F_1	$Y_{formule}$	$\Delta Y/Y$
3,324	2,923	3,286	1,153	4,831	3,990	4,810	0,426
3,432	3,102	3,416	0,477	4,954	4,216	4,931	0,468
3,568	3,331	3,572	-0,116	5,077	4,446	5,047	0,591
3,676	3,517	3,691	-0,420	5,108	4,562	5,104	0,082
3,784	3,708	3,806	-0,595	5,231	4,858	5,241	-0,194
3,200	2,881	3,198	0,075	4,649	3,999	4,621	0,605
3,275	2,963	3,259	0,490	4,730	4,197	4,726	0,069
3,375	3,129	3,378	-0,100	4,892	4,449	4,854	0,770
3,425	3,213	3,436	-0,335	4,475	3,913	4,468	0,163
3,525	3,384	3,550	-0,701	4,550	4,141	4,592	-0,915
3,600	3,514	3,632	-0,893	5,292	4,330	5,266	0,493
3,650	3,601	3,686	-0,985	5,369	4,446	5,324	0,846
4,277	3,605	4,280	-0,080	5,569	4,917	5,545	0,441

4,369	3,768	4,377	-0,187	5,723	5,343	5,726	-0,058
4,523	4,102	4,563	-0,889	5,662	4,621	5,716	-0,963
4,162	3,636	4,142	0,485	5,385	4,621	5,408	-0,441
4,297	3,901	4,296	0,030	5,138	4,621	5,131	0,136
4,405	4,147	4,430	-0,559	4,973	4,147	4,944	0,592
4,100	3,734	4,115	-0,368	4,568	3,852	4,539	0,630
4,175	3,823	4,167	0,197	4,270	3,852	4,269	0,041
4,325	4,187	4,366	-0,944				

Afin d'examiner la validité de la relation (5.2). Le tableau (5.1), montre clairement que les écarts relatifs entre Y_{exp} et Y_{form} sont inférieur à 2%, on peut donc conclure la validité de la relation proposée (5.2).

V.3.2.2. Déplacement Lc du ressaut hydraulique en fonction ses caractéristiques

Pour déterminer le déplacement Lc du ressaut hydraulique en fonction de ses caractéristiques nous avons étudié le rapport de :

La différence entre la longueur du canal L et le déplacement du ressaut hydraulique Lc d'une part, et la multiplication du rapport Y_{exp} des hauteurs conjuguées et la hauteur h_s de l'obstacle en fonction du nombre de Froude F_1 (figure 5.11).

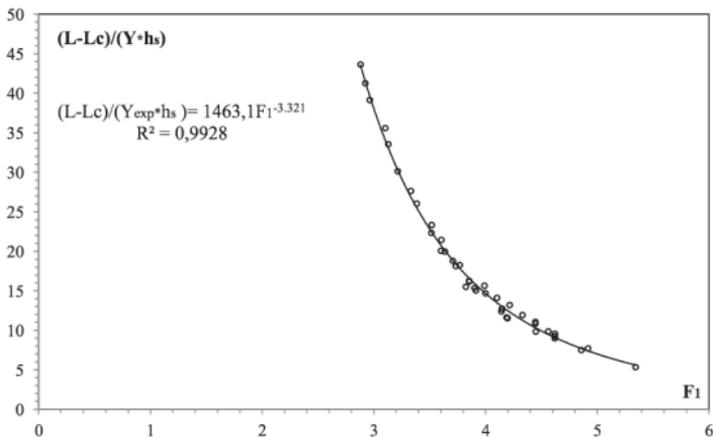


Figure 5.11. Variation du $\frac{(L-L_c)}{(Y_{\text{exp}} \cdot h_s)}$ en fonction du nombre de Froude F_1 .

Selon la figure (5.11), l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport $(L - L_c)/(Y_{exp} * h_s)$ en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une loi de type puissance de la forme :

$$\frac{L-L_c}{Y_{exp} * h_s} = 1463,1 * F_1^{-3,321}$$

Une relation expérimentale a été trouvée à partir de l'ajustement des mesures expérimentales représentés dans la figure (5.11), permet de déterminer le déplacement du ressaut hydraulique et qui s'écrit comme suit :

$$L_{c_{form}} = L - \left(Y_{exp} * h_s * (1463,1 * F_1^{-3,321}) \right) \quad (5.3)$$

Par ailleurs, les écarts relatifs absolus entre les déplacements des ressauts hydrauliques expérimentaux $L_{c_{exp}}$ et les déplacements des ressauts hydrauliques de la formule (5.3) $L_{c_{form}}$ sont calculés et présentés au tableau (5.2).

Tableau 5.2. Écarts relatifs absolus en (%) entre $L_{c_{exp}}$ expérimentaux et $L_{c_{form}}$ formule.

Y_{exp}	$L_{c_{exp}}$ (m)	$L_{c_{formule\ exp}}$ (m)	Erreur abs	Y_{exp}	$L_{c_{exp}}$ (m)	$L_{c_{formule\ exp}}$ (m)	Erreur abs
3,324	0,160	0,136	0,602	4,831	0,070	0,289	5,465
3,432	0,580	0,725	3,617	4,954	0,600	0,830	5,749
3,568	1,240	1,312	1,793	5,077	1,080	1,276	4,912
3,676	1,600	1,689	2,231	5,108	1,380	1,485	2,637
3,784	2,010	2,003	0,181	5,231	1,960	1,909	1,264
3,200	0,090	0,097	0,185	4,649	0,450	0,455	0,134
3,275	0,410	0,361	1,224	4,730	1,160	0,929	5,776
3,375	0,830	0,871	1,033	4,892	1,500	1,383	2,915
3,425	1,110	1,093	0,427	4,475	0,500	0,333	4,172
3,525	1,430	1,480	1,258	4,550	1,070	0,911	3,983
3,600	1,750	1,729	0,519	5,292	0,150	0,365	5,385
3,650	1,950	1,878	1,794	5,369	0,450	0,621	4,279
4,277	0,150	0,282	3,308	5,569	1,380	1,493	2,825
4,369	0,650	0,722	1,802	5,723	2,140	2,045	2,386
4,523	1,320	1,441	3,015	5,662	0,150	0,352	5,060
4,162	0,510	0,484	0,655	5,385	0,960	1,019	1,486
4,297	1,230	1,126	2,593	5,138	1,600	1,575	0,616
4,405	1,650	1,596	1,348	4,973	0,140	0,059	2,031
4,100	0,880	0,829	1,266	4,568	0,140	0,057	2,068
4,175	1,280	1,015	6,625	4,270	1,100	1,023	1,930
4,325	1,890	1,714	4,406				

Afin d'examiner la validité de la relation (5.3), le tableau (5.2), montre clairement que les écarts relatifs absolus entre $L_{c_{exp}}$ et $L_{c_{form}}$ sont inférieurs à 6%, on peut donc conclure la validité de la relation proposée (5.3).

Pour déterminer la relation (5.3), on s'est basé sur les mesures expérimentales du rapport Y des hauteurs conjuguées Y_{exp} . Afin de trouver une relation générale qui représente le déplacement L_c du ressaut hydraulique, on a remplacé le rapport des hauteurs conjuguées expérimentale Y_{exp} par le rapport des hauteurs conjuguées Y_{form} trouvé par la relation (5.2), ce qui nous donne la formule suivante :

$$L_{c_{form}} = L - \left(Y_{form} * h_s * \left(1463,1 * F_1^{-3,321} \right) \right) \quad (5.4)$$

La relation générale approchée (5.4) est donc proposée pour déterminer le déplacement L_c du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle.

La figure (5.12) montre la courbe d'ajustement issue de la relation (5.4), appliquée aux points expérimentaux.

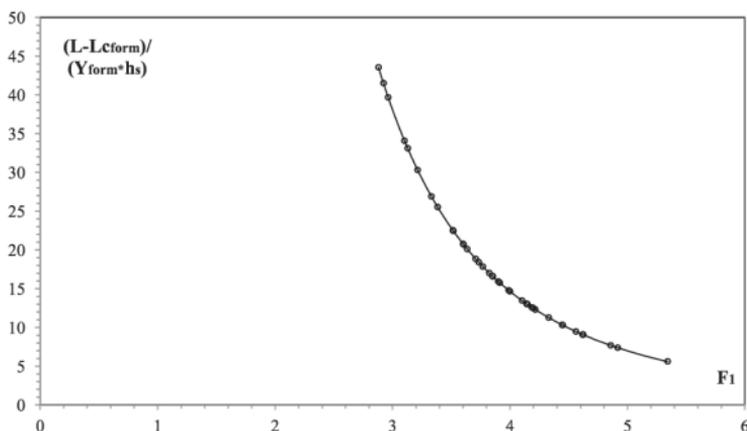


Figure 5.12. Variation du $\frac{(L-L_{c_{form}})}{(Y_{form} * h_s)}$ en fonction du nombre de Froude F_1 .

Concernant la précision de calcul, la relation (5.4) occasionne des écarts relatifs absolus inférieurs à 1 %, qui sont inférieurs aux écarts relatifs absolus de la relation (5.3). Ce petit écart reflète une bonne précision à la relation générale approchée.

Les écarts relatifs absolus entre les déplacements des ressauts hydrauliques expérimentaux $L_{c_{exp}}$, et les déplacements des ressauts hydrauliques calculés par la formule générale approchée (5.4) $L_{c_{form}}$ sont présentés au tableau (5.3).

Tableau 5.3. Écarts relatifs absolus en (%) entre $L_{c_{exp}}$ expérimentaux et $L_{c_{form}}$ formule.

$Y_{formule}$	$L_{c_{exp}}$ (m)	$L_{c_{formule}}$ (m)	Erreur abs	$Y_{formule}$	$L_{c_{exp}}$ (m)	$L_{c_{formule}}$ (m)	Erreur abs
3,286	0,160	0,180	0,511	4,810	0,070	0,304	0,396
3,416	0,580	0,740	0,391	4,931	0,600	0,845	0,371
3,572	1,240	1,309	0,078	5,047	1,080	1,293	0,403
3,691	1,600	1,680	0,242	5,104	1,380	1,488	0,051
3,806	2,010	1,991	0,297	5,241	1,960	1,905	0,101
3,198	0,090	0,100	0,074	4,621	0,450	0,477	0,536
3,259	0,410	0,379	0,446	4,726	1,160	0,931	0,053
3,378	0,830	0,868	0,078	4,854	1,500	1,404	0,503
3,436	1,110	1,083	0,244	4,468	0,500	0,339	0,150
3,550	1,430	1,463	0,442	4,592	1,070	0,882	0,706
3,632	1,750	1,709	0,507	5,266	0,150	0,383	0,448
3,686	1,950	1,857	0,523	5,324	0,450	0,650	0,714
4,280	0,150	0,279	0,074	5,545	1,380	1,504	0,277
4,377	0,650	0,716	0,153	5,726	2,140	2,043	0,028
4,563	1,320	1,418	0,569	5,716	0,150	0,317	0,878
4,142	0,510	0,501	0,427	5,408	0,960	1,006	0,329
4,296	1,230	1,127	0,022	5,131	1,600	1,579	0,083
4,430	1,650	1,583	0,336	4,944	0,140	0,082	0,583
4,115	0,880	0,818	0,292	4,539	0,140	0,082	0,621
4,167	1,280	1,021	0,147	4,269	1,100	1,024	0,030
4,366	1,890	1,692	0,540				

V.4. MODÉLISATION NUMÉRIQUE

A travers les résultats expérimentaux trouvés, une étude comparative a été faite entre ; les déplacements des ressauts hydrauliques mesurés expérimentalement, les déplacements des ressauts hydrauliques calculés par la relation générale approchée (5.4) et les profils de surface des ressauts hydrauliques simulés par le modèle numérique développé.

V.4.1. Application

La validation du modèle numérique a été faite dans le quatrième chapitre. Pour faire une comparaison entre les profils de surface mesurés expérimentalement dans le laboratoire et les profils de surface simulés à partir du modèle numérique développé, nous avons choisi trois essais expérimentaux portant le même nombre de Froude F_1 avec des différents emplacements L_c du ressaut hydraulique.

Dans cette étude, il a été considéré que, les débits Q et les hauteurs initiales h_1 en tant que conditions initiales et aux limites en amont, et les hauteurs finales h_2 comme des conditions limites en aval.

Les figures (5.13) et (5.14) montrent les profils de surface des ressauts hydrauliques expérimentaux et numériques. Les essais expérimentaux sont effectués sur une distance de 4 m du canal, cette dernière est mesurée au début de la sortie de l'ouverture du convergent (hauteur initiale h_1) et la position du seuil (hauteur de l'obstacle), pour les trois essais choisis la hauteur initiale h_1 est fixée à la valeur de 0,0325 m, trois hauteurs de seuil ont été testées h_s (m) = 0,071, 0,061 et 0,052, le nombre de Froude obtenu $F_1 = 4,62$.

Pour la figure (5.13) nous avons choisi le pas d'espace $\Delta x = 0,1$ m ; et pour la figure (5.14) le pas d'espace choisi $\Delta x = 0,2$ m.

Les valeurs du nombre de Courant C_n varient entre 0,50 et 0,53, le coefficient de Manning $n = 0,01$ et le temps final du test $t = 100$ s.

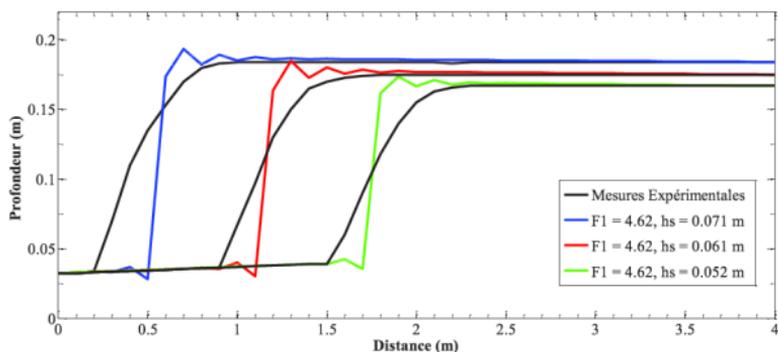


Figure 5.13. Profil de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x = 0,1$.

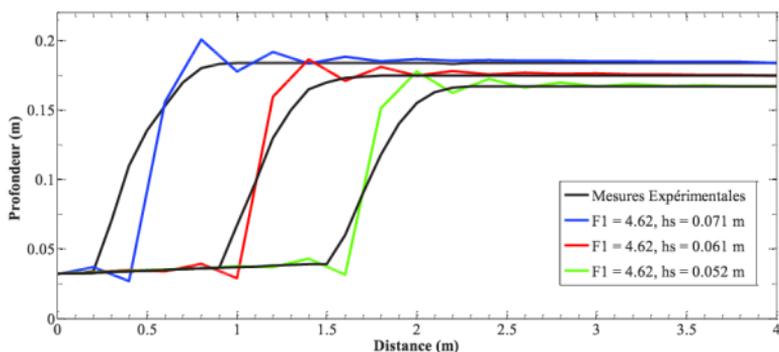


Figure 5.14. Profil de surface du ressaut hydraulique pour $\Delta x=0,2$.

Les simulations numériques pour le pas d'espace $\Delta x = 0,1$ m (fig 5.13) donnent des bonnes localisations du ressaut hydraulique, les positions des pieds du ressaut simulées numériquement et mesurées expérimentalement sont presque égales, par contre pour le pas d'espace $\Delta x = 0,2$ m (fig 5.14), il a été observé un décalage entre les localisations du ressaut hydraulique expérimentales et numériques. En outre, il a été remarqué qu'il y a un rapprochement entre les profils de surface du ressaut simulés et les profils de surface des essais expérimentaux pour le pas d'espace $\Delta x = 0,2$ m ; qui manquait aux profils de surface du ressaut pour le pas d'espace $\Delta x = 0,1$ m.

D'une manière générale la localisation des ressauts hydrauliques simulés donne de bons résultats pour le pas d'espace $\Delta x = 0,1$ m. Pour cela nous avons préféré d'utiliser le pas d'espace $\Delta x = 0,1$ m pour les analyses numériques du déplacement du ressaut hydraulique.

V.4.2. Analyses et résultats

Afin de comparer les résultats des essais expérimentaux de l'étude du déplacement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle avec les simulations numériques du déplacement du ressaut hydraulique, quelques essais expérimentaux ont été choisis et présentés dans le tableau (5.4). Ce tableau (5.4) montre les caractéristiques du ressaut hydraulique, sa localisation expérimentale, sa localisation calculée par la relation générale approchée (5.4) et sa localisation simulée par le modèle numérique développé.

Tableau 5.4. Caractéristiques et localisations du ressaut hydraulique.

F_1	Y_{formule}	$Lc_{\text{exp}} \text{ (m)}$	$Lc_{\text{formule}} \text{ (m)}$	$Lc_{\text{simulé}} \text{ (m)}$
2,923	3,286	0,160	0,180	0.20
3,102	3,416	0,580	0,740	0.60
3,331	3,572	1,240	1,309	1.10
3,517	3,691	1,600	1,680	1.60
3,708	3,806	2,010	1,991	2.10
3,605	4,280	0,150	0,279	0.20
3,768	4,377	0,650	0,716	0.80
4,102	4,563	1,320	1,418	1.30
3,990	4,810	0,070	0,304	0.20
4,216	4,931	0,600	0,845	0.60
4,446	5,047	1,080	1,293	1.10
4,562	5,104	1,380	1,488	1.40
3,999	4,621	0,450	0,477	0.70
4,197	4,726	1,160	0,931	1.30
4,449	4,854	1,500	1,404	1.60

Les figures (5.15), (5.16), (5.17), (5.18) montrent les simulations numériques des profils de surface du ressaut hydraulique et ses localisations mesurées expérimentalement, et calculées par la formule générale (5.4) représentées dans le tableau (5.4).

La figure (5.15) représente les simulations numériques des ressauts hydrauliques d'une hauteur initiale $h_1 = 0,037 \text{ m}$ et d'une hauteur de seuil $h_s = 0,028 \text{ m}$. Le pas d'espace $\Delta x = 0,1 \text{ m}$; les valeurs du nombre de Courant C_n varient entre 0,69 et 0,75, le coefficient de Manning $n = 0,01$ et le temps final du test $t = 100 \text{ s}$.

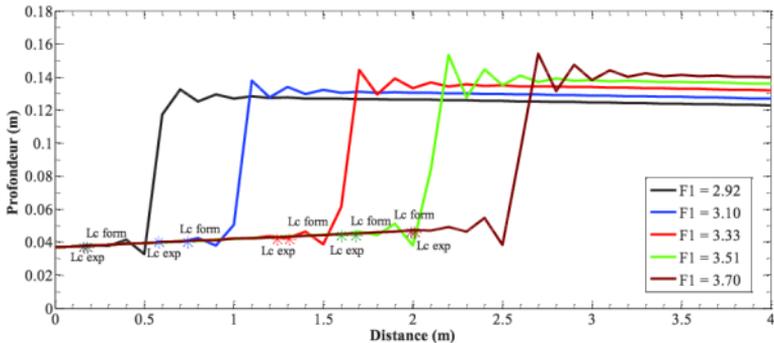


Figure 5.15. Déplacement du ressaut hydraulique pour $h_1 = 0,037 \text{ m}$ et $h_s = 0,028 \text{ m}$.

La figure (5.16) représente les simulations numériques des ressauts hydrauliques d'une hauteur initiale $h_1 = 0,0325$ m et d'une hauteur de seuil $h_s = 0,042$ m. Le pas d'espace $\Delta x = 0,1$ m ; les valeurs du nombre de Courant C_n varient entre 0,62 et 0,68 ; le coefficient de Manning $n = 0,01$ et le temps final du test $t = 100$ s.

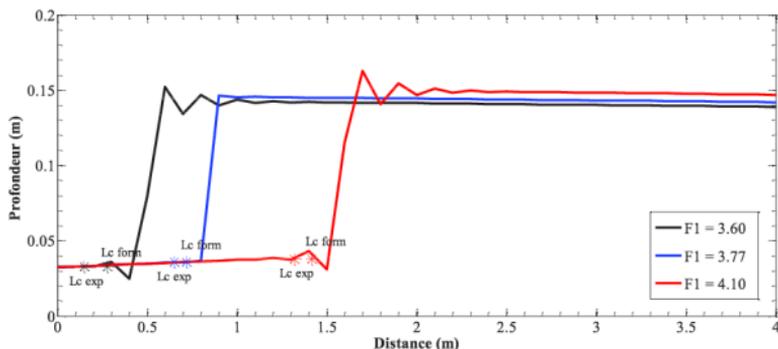


Figure 5.16. Déplacement du ressaut hydraulique pour $h_1 = 0,0325$ m et $h_s = 0,042$ m.

La figure (5.17) représente les simulations numériques des ressauts hydrauliques d'une hauteur initiale $h_1 = 0,0325$ m et d'une hauteur de seuil $h_s = 0,052$ m. Le pas d'espace $\Delta x = 0,1$ m ; les valeurs du nombre de Courant C_n varient entre 0,53 et 0,62, le coefficient de Manning $n = 0,01$ et le temps final du test $t = 100$ s.

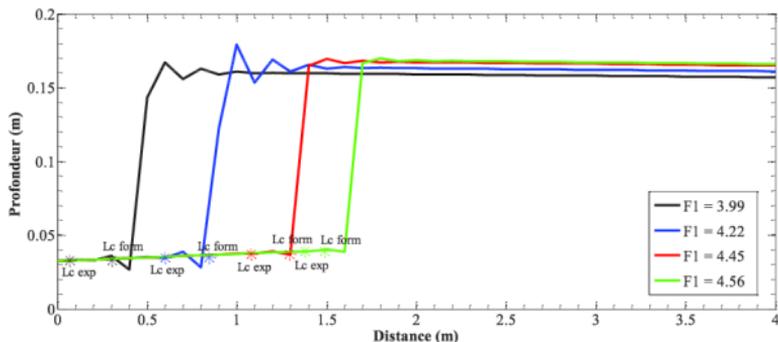


Figure 5.17. Déplacement du ressaut hydraulique pour $h_1 = 0,0325$ m et $h_s = 0,052$ m.

La figure (5.18) représente les simulations numériques des ressauts hydrauliques d'une hauteur initiale $h_1 = 0,037$ m et d'une hauteur de seuil $h_s = 0,052$ m. Le pas d'espace $\Delta x = 0,1$ m; les valeurs du nombre de Courant C_n varient entre 0,56 et 0,63 ; le coefficient de Manning $n = 0,01$ et le temps final du test $t = 100$ s.

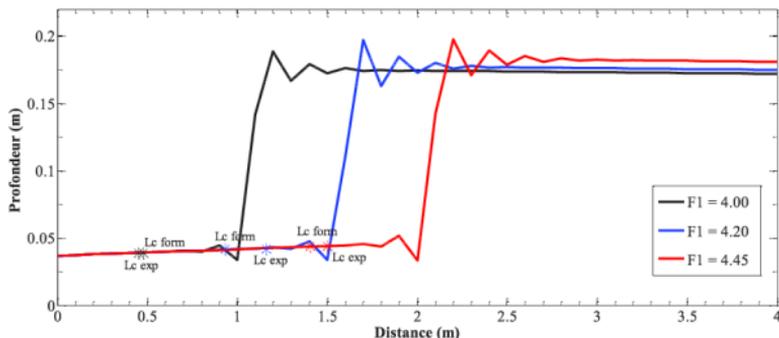


Figure 5.18. Déplacement du ressaut hydraulique pour $h_1 = 0,037$ m et $h_s = 0,052$ m.

On remarque que pour toutes les simulations numériques effectuées ont donné de bons emplacements du ressaut hydraulique, l'écart entre les déplacements du ressaut simulé, mesuré expérimentalement et calculé par la formule générale (5.4) pour les figures (5.15), (5.16), et (5.18) est minime, cet écart augmente pour la figure (5.17) mais il est toujours acceptable.

Les résultats de la comparaison entre les déplacements des ressauts hydrauliques mesurés expérimentalement et ceux calculés par la relation générale approchée (5.4) avec les profils des ressauts hydrauliques simulés, ont montré la validation de l'utilisation de la formule générale approchée (5.4) et le modèle numérique développé.

V.5. CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons étudié expérimentalement et numériquement le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle, Trois parties ont été abordées dans ce chapitre ; dans la première partie, une description détaillée sur le modèle expérimental ainsi que sur les différents appareillages de mesures utilisés pour les essais expérimentaux. Dans la deuxième partie, une formule générale approchée (5.4) a été trouvée à partir des essais expérimentaux réalisés au laboratoire

LARGHYDE, qui permet de calculer le déplacement L_c du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle. Dans la dernière partie, une étude comparative entre les déplacements des ressauts hydrauliques mesurés expérimentalement et ceux calculés par la relation générale approchée (5.4) avec les profils de surface des ressauts hydrauliques simulés a été faite. Les résultats obtenus présentent une homogénéité entre les déplacements des ressauts hydrauliques comparés.

La formule générale (5.4) découverte ainsi que le modèle numérique développé peuvent être utilisés pour calculer et simuler le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Nous nous sommes intéressés dans cette thèse de doctorat, à la modélisation numérique du ressaut hydraulique dans quelques types de canaux prismatiques. Cette thèse se compose de deux parties importantes:

Dans la première partie, nous avons donné dans le premier chapitre, un aperçu général sur la modélisation numérique des écoulements à surface libre. En suite nous avons présenté des explications sur la formation des équations de Barré Saint-Venant ainsi que sur les conditions d'utilisations de ces équations. Puis nous avons abordé la résolution numérique de ces équations à travers des schémas numériques basés sur la méthode des différences finies, notamment le schéma classique de MacCormack, nous avons terminé par l'explication des schémas de haute résolution telle que l'extension TVD du schéma de MacCormack.

Dans le deuxième chapitre nous avons présenté des travaux expérimentaux et numériques sur le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire. Quatre travaux ont été exposés dans ce chapitre. Hager et al. (1990) ont développé des formules qui permettent à calculer les caractéristiques du ressaut hydraulique classique, telles que, le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y , la longueur du rouleau L_r , la longueur du ressaut L_j et le rendement du ressaut η en fonction du nombre de Froude F_1 . Hager (1992) a découvert une formule qui aide à calculer le profil de surface du ressaut hydraulique classique. Gharangik et Chaudhry (1991) ont étudié l'effet du coefficient de Boussinesq à travers la modélisation du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire, trois modèles numériques ont été testés et les résultats trouvés ont montré qu'il n'y a pas une grande influence de ce coefficient sur la formation du profil de surface du ressaut hydraulique. Carvalho et al. (2008) ont réalisé un modèle numérique basé sur les équations 2D de Navier-Stokes, ils ont comparé les profils de surface du ressaut hydraulique de ce modèle avec les essais expérimentaux réalisés au laboratoire et la formule trouvée par Hager (1992). Les résultats obtenus présentent une homogénéité entre le modèle physique, le modèle numérique et la formule présentée par Hager (1992).

La deuxième partie de cette thèse, porte sur notre contribution à l'étude de la modélisation numérique du ressaut hydraulique dans quelques types de canaux prismatiques, elle se compose de trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons présenté les travaux

réalisés au laboratoire sur le ressaut hydraulique contrôlé dans un canal triangulaire, concernant les travaux de :

- Achour et Debabeche (2003) qui ont étudié expérimentalement le ressaut hydraulique contrôlé par seuil dénoyé à paroi mince ;
- Debabeche et Achour (2007) qui ont étudié l'influence du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire ;
- Debabeche et al. (2006) sur l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses ;
- Debabeche et al. (2008) sur l'étude du ressaut contrôlé et forcé par marche positive dans un canal triangulaire ;
- Debabeche et al. (2009) et (2010) qui ont étudié l'effet de la pente du canal sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à des pentes positives et négatives.

Toutes les formules découvertes à partir de ces travaux ont été rassemblées et présentées sous un programme en langage Fortran pour le but de calculer les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal triangulaire. Des explications concernant l'utilisation de ce programme ont été présentées à travers des exemples des ressauts hydrauliques.

Ce programme est un outil d'aide aux chercheurs et ingénieurs pour faciliter les calculs des caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire.

Dans le deuxième chapitre, nous avons étudié numériquement le ressaut hydraulique dans des canaux rectangulaire et triangulaire, deux modèles numériques en MATLAB® ont été développés, le premier se base sur le schéma classique de MacCormack et dans le deuxième une extension TVD de haute résolution a été ajoutée. La validation de ces deux modèles a été faite à partir des essais expérimentaux réalisés au laboratoire et les solutions analytiques trouvées. Ce chapitre est composé de trois parties. Dans la première partie, trois types des régimes d'écoulements ont été testés pour le but de valider le modèle numérique développé ;

- L'écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial ;
- L'écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial-torrentiel ;
- L'écoulement permanent en présence d'un obstacle en régime fluvial-torrentiel-fluvial.

Les résultats obtenus ont montré une concordance entre les solutions numériques et les solutions analytiques ce qui prouve la validation du modèle numérique.

Dans la deuxième partie, une analyse numérique sur la localisation du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire a été faite, trois paramètres ont été étudiés pour cette analyse ;

- L'effet du changement du pas d'espace Δx ;
- L'effet du changement du coefficient de la quantité de mouvement β ;
- L'effet du changement du coefficient de Manning n .

Dans cette analyse nous nous sommes basés sur les données des essais expérimentaux de Gharangik et Chaudhry (1991). Les résultats obtenus montrent que les trois paramètres ont une influence directe sur la localisation du ressaut hydraulique. L'augmentation du coefficient de Boussinesq β favorise le déplacement du profil du ressaut hydraulique vers l'aval par contre l'augmentation du coefficient de Manning n pousse le profil du ressaut hydraulique vers l'amont. L'effet du pas d'espace Δx est relativement négligeable par rapport aux deux autres paramètres. L'utilisation du schéma de MacCormack avec l'extension TVD minimise les oscillations sur la surface d'écoulement et donne une bonne localisation du ressaut hydraulique. Nous avons aussi présenté les simulations numériques des essais expérimentaux réalisés par Debabeche (2003), qui ont donné de bonnes localisations du ressaut hydraulique. Dans la troisième partie une étude sur le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à pente variable a été faite, une formule générale a été découverte nous permettant de déterminer l'emplacement du ressaut hydraulique dans n'importe quel lieu dans un canal triangulaire.

Le troisième et le dernier chapitre a pour but de déterminer expérimentalement et numériquement le déplacement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle. Une formule expérimentale découverte à travers des essais expérimentaux réalisés au laboratoire LARGHYDE nous permettant de calculer le déplacement L_c du ressaut hydraulique. Une étude comparative entre les déplacements des ressauts hydrauliques mesurés expérimentalement ; les déplacements des ressauts hydrauliques calculés par la formule générale approchée ainsi que les déplacements des profils de surface des ressauts hydrauliques simulés. Les résultats obtenus ont montré un bon rapprochement entre les déplacements des ressauts hydrauliques comparés, ce qui donne plus rigidité au modèle numérique développé.

La formule générale découverte peut être utilisé pour le calcul du déplacement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire en présence d'un obstacle.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abbott, M. B., Marshall, G., and Rodenhuis, G. S. (1969). Amplitude-Dissipative and Phase-Dissipative Scheme for Hydraulic Jump Simulation, Proc., 13th Congress, Inter. Assoc. Hyd. Research, Tokyo, pp.313-329.
- Achour, B., and Debabeche, M. (2003). Control of hydraulic jump by sill in a triangular channel: Journal of Hydraulic Research, 41(3), 97-103.
- Ancey, C. (2014). Hydraulique à surface libre. Notes de cours. École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Bertrand-Krajewski, (2006). Modélisation des écoulements en réseau d'assainissement. Cours d'Hydrologie Urbaine. URGC, INSA de Lyon.
- Berrekse, A., Kettab, A., et Remini, B., (2006). Ecoulement supercritique à travers un élargissement progressif de canal. Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n. 05, Juin 2006, pp.105-112.
- Berrekse, A., Kettab, A., Remini, B., and Benmamar, S., (2011). Modélisation mathématique et numérique d'un écoulement torrentiel à deux dimensions spatiales dans un canal à pente considérable. 1er Séminaire International sur la Ressource en eau au sahara : Evaluation, Economie et Protection, le 19 et 20 janvier 2011 (ouargla).
- Carmo, J.S. (2004). Modelação em Hidráulica Fluvial e Ambiente, imprensa da universidade de Coimbra.
- Carvalho, R.F., Lemos, C.M., and Ramos, C.M. (2008). Numerical computation of the flow in hydraulic jump stilling basins: Journal of Hydraulic Research., 46(6), 739-752.
- Chanson, H., (2009). Current knowledge in hydraulic jumps and related phenomena. A survey of experimental results, European Journal of Mechanics B/Fluids 28.
- Chanson, H., and Carvalho, R. F. (2015). Chapter 4, Hydraulic Jumps, in Energy Dissipation in Hydraulic Structures, IAHR Monograph, CRC Press, Taylor & Francis Group, Leiden, The Netherlands, 168 pages.
- Cherhabil, S., (2010). Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à pente variable, Thèse de doctorat, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Chaudhry, M. H. (2008). Open-Channel Flow, University of South Carolina, Columbia, Springer Science and Business Media, LLC.
- Chow, V. T., (1959). Open Channel Hydraulics, McGraw-Hill Book Company.
- Cunge, J.A., Holly, F.M., Jr., and Verwey, A., (1980). Practical aspects of computational river hydraulics: London, Pitman Publishing Limited (reprinted 1986, Iowa City, by the Iowa Institute of Hydraulic Research), 420 p.

Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

Debabeche, M., and Achour, B. (2007). Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel: *Journal of Hydraulic Research.*, 45(1), 135–139.

Debabeche, M., Cherhabil, S., Hafnaoui, A., and Achour, B. (2009). Hydraulic Jump in a Sloped Triangular Channel: *Canadian Journal of Civil Engineering.*, 36, 655-658,

Ead, S.A., and Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jump on corrugated beds: *Journal of Hydraulic Engineering.*, 128(7), 656-663.

Freitag, M. A., and Morton K. W. (2007). The Preissmann box scheme and its modification for transcritical flows: *International Journal for Numerical Methods in Engineering.*, 70:791-811. DOI: 10.1002/nme.1908.

Garcia-Navarro, P., Alcrudo, F., and Saviron, J. M. (1992). 1-D Open-Channel Flow Simulation Using TVD-McCormack Scheme: *Journal of Hydraulic Engineering.*, 118, 1359-1372.

Gharangik, A. and Chaudhry, M. (1991). Numerical Simulation of Hydraulic Jump: *Journal of Hydraulic Engineering.*, 9 (1195), 1195-1211.

Ghomri, A., (2011). Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à parois rugueuses, Thèse de doctorat, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

Gottlieb, D. and Turkel, E. (1976). "Dissipative two-four methods for time-dependent problems." *Mathematics of computation*, 30(136), 703-723.

Graf, W.H. et Altinakar, M.S. (2000). *Hydraulique fluviale: écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple*. Ecole polytechnique fédérale de Lausanne en France. volume 16.

Hachemi R.L., (2006). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, Mémoire de magistère en sciences hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie.

Hafnaoui, M. A., Carvalho, R. F. and Debabeche, M. (2016). Prediction of Hydraulic Jump location in Some Types of Prismatic Channels using Numerical Modelling :6th International Junior Researcher and Engineer Workshop on Hydraulic Structures (JREWS 2016) Lübeck, Germany. DOI: 10.15142/T3D01F.

Hafnaoui M. A., Debabeche M. et Carvalho R.F. (2018), "Modélisation numérique de l'impact des paramètres hydrauliques et numériques sur la localisation du ressaut hydraulique". *Courrier du Savoir* N°25, pp.61-70.

Hager, W. H., (1992). Classical hydraulic jump: free surface profile. Institute of Hydraulics, Hydrology and Glaciology, Swiss Federal Institute of Technology, ETH-Zentrum, CH-8092 Zurich, Switzerland.

Hager, W.H. (1992). Energy dissipators and hydraulic jump. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands. 288 pages.

Hager, W.H., and Bretz, N.V. (1987). Hydraulic jumps at positive and negative steps: Journal of Hydraulic Research., 24(4), 237-253.

Hager, W.H. et Sinniger, R. (1985): Flow Characteristics of the Hydraulic Jump in a Stilling Basin with an Abrupt Bottom Rise. J. Hydraulic Research 23(2) : 101-113. Discussion 1986, 24(3) : 207-215.

Hager, W.H., and Wanoschek, R. (1987). Hydraulic jump in triangular channel: Journal of Hydraulic Research., 25(5), 549-564.

Hirsch, C., (1988). Numerical Computation of Internal and External Flows. Volume 1 : Fundamentals of Numerical Discretization. Vrije Universiteit Brussel, Belgium.

Katopodes, N. D., (1984), "A Dissipative Galerkin Scheme for Open-Channel Flow," Jour. Hyd. Engineering, Amer. Soc. Civ. Engrs., vol. 110, no. 4, April, pp. 450-466.

Kovacs, Y., (1988). Thèse de Doctorat. Modèles de simulation d'écoulement transitoire en réseau d'assainissement.

Lakehal, M., (2009). Le ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive, Thèse de doctorat, Département d'Hydraulique, Université de Oum el-Bouaghi, Algérie.

Machalinska-Murawska, J. et Szydłowski, M. (2013). Lax-Wendroff and McCormack Schemes for Numerical Simulation of Unsteady Gradually and Rapidly Varied Open Channel Flow. Hydro-Engineering and Environmental Mechanics. DOI: 10.2478/heed-2013-0008. Vol. 60 (2013), No. 1-4, pp. 51-62.

McCorquodale, J. A. and Khalifa, A. (1983). Internal Flow in Hydraulic Jumps: Journal of Hydraulic Engineering., 109(5), 684-701.

Mendes, P.J. (2001). Contribuição para o Estudo da Modelação das Ondas de Cheia Provocadas pela Ruptura de Barragens. Mestre em Engenharia Civil. Universidade de Coimbra.

Miller, S., and Chaudhry, M.H., (1989). Dam-break flows in curved channel: Journal of Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineers, v. 115, no. 11, p. 1465-1478.

Pinto, P.M. (2004). Esquema de alta-resolução das equações de Saint-Venant Método de McCormack TVD, Mestrado em hidráulica. Universidade de Coimbra.

Shi Yu-e, (2006). Résolution numérique des équations de Saint-Venant par la technique de projection en utilisant une méthode des volumes finis dans un maillage non structuré. thèse de doctorat, université de Caen - Basse Normandie.

Srinivas and Auld (2009). Integral Approach to the Control Volume analysis of Fluid Flow. www.aerodynamics4students.com

Sturm, T.W., (2001). Open Channel Hydraulics. Georgia Institute of Technology.

Triki, A., et Hadj Taïeb, E., (2010). Simulation numérique des écoulements transitoires à surface libre provoqués par la superposition de manœuvres de vannes. La houille blanche, N° 3-2010. DOI 10.1051/lhb:2010037, p 71-79.

PRINCIPALES NOTATIONS

- A : Surface d'écoulement [m^2]
P : Périmètre mouillé du canal [m]
 R_h : Rayon hydraulique [m]
B : Largeur superficielle du canal à sa surface libre [m]
 D_h : Profondeur hydraulique du canal [m]
h : Profondeur d'écoulement [m]
v : Vitesse moyenne d'écoulement [m/s]
 ρ : Masse volumique [$kg.m^{-3}$]
 ξ : Niveau de l'élévation du canal [m]
 η^* : Variable d'intégration qui désigne la profondeur [m]
 σ : Largeur de la section variable [m]
Q: Débit [m^3/s]
 q_1 : Débit latéral [m^3/s]
t: Temps [s]
x: Abscisse dans l'espace [-]
 I_1 : Composante de la force de pression
 I_2 : Composante longitudinale de la force de pression exercée sur les frontières latérales
J: Perte de charge [m]
g: Accélération de la pesanteur [m/s^2]
s: Pente du canal [-]
 β : Coefficient de la quantité de mouvement ou le coefficient de Boussinesq [-]
n: Coefficient de rugosité de Manning [$1/m^{1/3}s^{-1}$]
 K_s : Coefficient de rugosité de Strickler [$m^{1/3}s^{-1}$]
 Δt : Pas de temps [s]
 Δx : Pas d'espace [m]
i : Indice relatif au pas d'espace Δt [-]
k : Indice relatif au pas de temps Δx [-]

C_n : Nombre de Courant [-]
 \tilde{R} : Matrice correspondant à la jacobéenne approchée
 \tilde{D} : Fonction de vecteur
 U : Vecteur écoulement
 F : Vecteur flux
 S : Vecteur source
 L_r : Longueur du rouleau [m]
 L_j : Longueur du ressaut [m]
 F_1 : Nombre de Froude [-]
 Y : Rapport des hauteurs conjuguées [-]
 b : Largeur du fond du canal [m]
 h_1 : Hauteur initiale du ressaut [m]
 h_2 : Hauteur finale du ressaut [m]
 β_1 : Rapport de forme [-]
 λ_r : Rapport de la longueur du rouleau sur la hauteur initiale du ressaut [-]
 \tanh : Tangente hyperbolique [-]
 H_1 : Charge totale initiale [m]
 H_2 : Charges totale finale [m]
 ΔH : perte de charge [m]
 η : Rendement du ressaut [-]
 \vec{v} : Vecteur de la vitesse
 ϑ : Viscosité cinématique [$m^2.s^{-1}$]
 ϑ_T : Viscosité de la turbulence [$m^2.s^{-1}$]
 θ : Fonction de porosité [-]
 ∇ : Vecteur de dérivation
 Y_s : Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil [-]
 H_s : Hauteur relative du seuil [-]
 h_s : Hauteur du seuil [m]
 Ln : Logarithme népérien [-]

- $\bar{\alpha}, \bar{\beta}, \bar{\gamma}, \bar{a}, \bar{b}$: Coefficients caractérisant le type du ressaut [-]
- L_B : Longueur du bassin [m]
- L_{RF} : Longueur du rouleau de fond [m]
- X : Longueur relative du bassin [-]
- α : Angle d'inclinaison du canal [-]
- a : Pas de discrétisation des schémas aux différences finies [m]
- $\theta_1(a), \theta_2(a)$: Termes de troisième ordre [-]
- $\bar{\theta}_1, \bar{\theta}_2, \bar{\theta}_3$ et $\bar{\theta}_4$: Coefficients de pondérations [-]
- τ : Rapport de forme [-]
- ε_d : Coefficient qui contrôle l'addition de viscosité numérique [$m s^{-1}$]
- h_d : La différence entre les hauteurs conjuguées simulées et mesurées [m]
- L_c : Déplacement du ressaut hydraulique [m]
- R^2 : Coefficient de corrélation [-]