

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
République Algérienne Démocratique et Populaire
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

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



جامعة محمد خيضر بسكرة
كلية العلوم و التكنولوجيا
قسم: الهندسة المدنية و الري
المرجع:

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

Option : **Ouvrages Hydrauliques**

Thème

**Étude de la compacité du ressaut hydraulique dans quelques
profils de canaux à ciel ouvert**

Présenté par : **BENMALEK Ahmed**

Soutenu le : 15/11/2018

Devant le jury composé de:

OUAMANE Ahmed	Professeur	Président	Université de Biskra
DEBABECHE Mahmoud	Professeur	Encadreur	Université de Biskra
REMINI Boualem	Professeur	Examineur	Université de Blida
Ghomri Ali	MC'A'	Examineur	Université d'El-Oued

Remerciements

*Pour ce travail, j'ai bénéficié des orientations, encouragements et précieux conseils de mon encadreur, Professeur **DEBABECHE Mahmoud**, Professeur à l'Université de Biskra que je remercie vivement et auquel j'exprime ma profonde reconnaissance pour l'aide scientifique et morale qu'il n'a cessé de me donner.*

*Aussi, je tiens à exprimer tout particulièrement, au Professeur **OUAMANE Ahmed** que pour avoir accepté de m'honorer par sa présence en sa qualité de président de Jury.*

*Je remercie également, le Professeur **REMINI Boualem** et le Docteur **Ghomri Ali** en leur qualité de membres de jury, pour avoir lu et accepté d'examiner mon thèse de doctorat.*

Enfin, je tiens également à remercier toutes les personnes qui m'ont permis de réaliser cette recherche et m'ont fait bénéficier de leurs aides, conseils et encouragements.

Résumé

L'analyse bibliographique a montré que lorsque le ressaut hydraulique contrôlé est entièrement formé dans le bassin de dissipation le déplacement du seuil vers l'aval ne modifie en rien la configuration du ressaut. Cependant, le déplacement du seuil vers l'amont provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci, jusqu'à sa disparition complète. L'objectif principal de cette étude est de déterminer expérimentalement l'effet du seuil sur la configuration du ressaut hydraulique évoluant dans différentes formes de canaux; et de trouver des relations empiriques adimensionnelles exprimant l'effet de la compacité sur les différents paramètres du ressaut.

Mots clés : Ressaut hydraulique, bassin de dissipation, canal trapézoïdal, élargissement brusque, canal rectangulaire composé, compacité du ressaut, nombre de Froude.

Abstract:

Bibliographical analysis showed that when the controlled hydraulic jump is entirely formed on the upstream side of the stilling basin, the sill has no effect on the configuration of the jump. However, when the jump length overcome the sill position, it results to the jump compactness and leads to several configurations of this latter, until its complete disappearance. The main objective of this study is to determine the effect of the hydraulic jump compactness on the main jump features in different forms of channels. Dimensionless empirical relationships depending on the jump compactness to be obtained.

Keywords: Hydraulic jump, stilling basins, trapezoidal channel, abrupt enlargement, compound rectangular channel, jump compactness, Froude number.

ملخص

وأظهر التحليل البليوغرافي أنه عندما يتم تشكيل القفزة المائية الخاضعة للرقابة بالكامل على أرضية حوض التبديد ، فإن تحريك العتبة إلى أسفل المصب لا يغير من تكوين القفزة. ومع ذلك، فإن تحريك العتبة إلى الخلف يسبب انضغاط القفزة ويؤدي إلى عدة تشكيلات منها، حتى اختفاءها الكامل. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هي التحديد التجريبي لتأثير العتبة على تكوين القفزة المائية في أشكال مختلفة من القنوات. وإيجاد علاقات تجريبية شاملة تعبر عن تأثير الانضغاط على العوامل المختلفة للقفزة المائية.

الكلمات المفتاحية: القفزة المائية، حوض التبديد، قناة شبه منحرف، اتساع مفاجئ، قناة مستطيلة مركبة، انضغاط القفزة المائية، عدد فرود.

SOMMAIRE

INTRODUCTION GENERALE

Première partie

ETUDE BIBLIOGRAPHIQUE

INTRODUCTION.....	1
-------------------	---

Chapitre I

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOIDAL

I.1. Introduction.....	4
I.2. Ressaut hydraulique classique.....	5
I.2.1. Classification du ressaut classique.....	5
I.3. Approche de Wanoschek et Hager (1989).....	7
I.3.1. Généralités.....	7
I.3.2. Expérimentation.....	9
I.3.2.1. Installations expérimentales.....	9
I.3.2.2. Caractéristiques de l'écoulement.....	10
I.3.3. Analyse des résultats.....	11
I.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	11
I.3.3.2. Rouleau de fond.....	12
I.3.3.3. Longueur de ressaut.....	13
I.4. Effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal (Approche de Kateb, Debabeche et Benmalek 2013).....	14
I.4.1. Description du modèle expérimental.....	14
I.4.2. Expérimentation.....	16
I.4.3. Résultats expérimentaux.....	17
I.4.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	17
I.4.3.2. Hauteur relative du seuil et de la marche positive.....	18
I.4.3.3. Position relative de la marche positive.....	19
I.4.3.4. Le rendement du ressaut hydraulique.....	21
I.5. Conclusion.....	22

Chapitre II

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS LES CANAUX ELARGIS

II.1. Introduction.....	24
II.2. Canal rectangulaire graduellement élargi (Approche de Hager 1985).....	25
II.2.1. Analyse du ressaut hydraulique.....	25
II.2.2. Vérification expérimentale.....	26
II.2.3. Perte d'énergie relative.....	28
II.2.4. Longueurs caractéristiques du ressaut.....	29
II.3. Canal rectangulaire brusquement élargi.....	30

II.3.1. Équations de l'écoulement.....	30
II.3.2. Perte d'énergie relative.....	32
II.3.3. Longueurs caractéristiques du ressaut	34
II.3.4. Volume du ressaut hydraulique.....	35
II.4. Canal trapézoïdal graduellement élargi (Approche d'Omid, Esmaelivaraki et Narayanan 2007).....	35
II.4.1. Principe de dynamique unidimensionnelle.....	36
II.4.2. Dispositif expérimentale.....	40
II.4.3. Résultats expérimentaux.....	41
II.5. Conclusion.....	49

Chapitre III

RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSE (Approche de Khattaoui et Achour 2012)

III.1. Introduction.....	52
III.2. Rapport des hauteurs conjuguées.....	52
III.3. Rendement du ressaut.....	55
III.4. Conclusion.....	57

Chapitre IV

COMPACTITE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE (Approche de Debabeche 2003)

IV.1. Introduction.....	58
IV.2. Position du problème.....	58
IV.3. Rapport des hauteurs conjuguées.....	59
IV.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma \leq 0,9$	59
IV.3.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,9$	59
IV.4. Hauteur relative du seuil.....	61
IV.5. Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du seuil.....	62
IV.6. Profil de surface du ressaut.....	63
IV.7. Conclusion.....	64
CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....	66

Deuxième partie

ETUDE EXPERIMENTALE

INTRODUCTION.....	69
-------------------	----

Chapitre I

ETUDE DE LA COMPACTITE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOIDAL

I.1. Introduction.....	71
------------------------	----

I.2.	Description du modèle expérimental.....	71
I.2.1.	Description du canal.....	71
I.2.2.	Mesure du débit, niveau d'eau et longueurs caractéristiques.....	73
I.2.2.1.	Limnimètre.....	75
I.2.3.	Seuils.....	75
I.3.	Position du problème.....	76
I.4.	Procédure expérimental.....	77
I.5.	Analyse des résultats.....	82
I.5.1.	Rapports des hauteurs conjuguées du ressaut.....	82
I.5.1.1.	Rapports des hauteurs conjuguées pour $\gamma \leq 0,9$	82
I.5.1.2.	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,9$	82
I.5.2.	Hauteur relative du seuil.....	87
I.5.3.	Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du Seuil.....	91
I.5.4.	Profil de surface du ressaut.....	92
I.6.	Conclusion.....	98

Chapitre II

ETUDE DE LA COMPACITE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL TRAPEZOIDAL BRUSQUEMENT ELARGI A UN CANAL RECTANGULAIRE

II.1.	Introduction.....	99
II.2.	Description du modèle expérimental.....	99
II.2.1.	Mesure du débit, niveau d'eau et longueurs caractéristiques.....	101
II.2.2.	Seuils.....	101
II.3.	Description des essais.....	102
II.3.1.	Position du problème.....	102
II.4.	Analyse des résultats.....	105
II.4.1.	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,9$	105
II.4.2.	Hauteur relative du seuil.....	111
II.4.3.	Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du Seuil.....	115
II.4.4.	Profil de surface généralisé.....	116
II.5.	Conclusion.....	122

Chapitre III

ETUDE DE LA COMPACITE DU RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSE

III.1.	Introduction.....	123
III.2.	Description du modèle expérimental.....	123
III.2.1.	Mesure du débit, niveau d'eau et longueurs caractéristiques.....	125
III.2.2.	Seuils.....	125
III.3.	Description des essais.....	126
III.3.1.	Position du problème.....	126
III.3.2.	Procédure expérimentale.....	126

III.4. Analyse des résultats.....	130
III.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,9$	130
III.4.2. Hauteur relative du seuil.....	138
III.4.3. Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du Seuil.....	146
III.4.4. Profil de surface généralisé.....	150
III.5. Conclusion.....	159
 CONCLUSION A LA DEUXIEME PARTIE.....	 161
CONCLUSION GENERALE	162

Introduction générale

INTRODUCTION GENERALE

Dans le domaine des constructions hydrauliques, il est souvent question de restituer l'eau d'un ouvrage hydraulique vers un cours d'eau. Un ouvrage hydraulique, tel qu'un barrage, est muni d'un déversoir pour laisser passer les débits de crues que la retenue ne peut accumuler. Au pied de ce barrage se situe un bassin amortisseur, conçu pour être le siège de la dissipation d'énergie. Un changement de régime de l'écoulement intervient alors dans le dissipateur : à son entrée, le régime est torrentiel, à sa sortie il est fluvial ; cette transition s'appelle ressaut hydraulique. Pour contrôler et stabiliser la position dans le bassin, la disposition d'un seuil en travers de l'écoulement est souhaitable.

Le présent travail consiste à analyser par la voie de l'expérimentation l'effet du seuil mince sur le ressaut hydraulique dans trois types de canaux, à savoir, canal trapézoïdal, canal trapézoïdal brusquement élargi à un canal rectangulaire et le canal rectangulaire composé. Pour atteindre ce but, l'étude a été divisée en deux parties essentielles. La première partie consiste à passer en revue sur les principaux travaux effectués pour les trois types de canaux et la deuxième partie concerne notre contribution dans ce domaine qui propose une étude expérimentale sur la compacité du ressaut hydraulique dans quelques formes de canaux.

La première partie qu'est l'étude bibliographique a été divisée en quatre chapitres essentiels, le premier chapitre sur le ressaut hydraulique dans les canaux trapézoïdaux ce type de ressaut à attirer l'attention de plusieurs auteurs, les travaux les plus reconnus sont celles de Wanoschek et Hager (1989), ces derniers ont analysé les différents paramètres hydrauliques caractérisant le ressaut hydraulique classique. Ils ont décrit d'une manière détaillée le comportement du ressaut, dans un canal trapézoïdal, d'angle d'inclinaison de 45° ($m = 1$) et pour des valeurs de $M \leq 0,40$. Les observations ont révélé l'existence d'un rouleau du fond, jusqu'alors jamais détecté, dont les caractéristiques géométriques, telles que la longueur à la base, la hauteur ainsi que la position sont définies.

Les essais de Wanoschek et Hager (1989) ont montré que la longueur relative L_j/h_2 du ressaut dépend à la fois de la valeur du nombre de Froude Fr_1 et de la valeur du rapport de forme M : les courbes de la variation de L_j/h_2 , obtenues pour $0,1 \leq M \leq 0,4$, issues des essais de Peterka pour le ressaut en canal de section droite triangulaire.

Les auteurs ont montré que le ressaut dans le canal trapézoïdal testé devrait être plus long et asymétrique au-delà d'une valeur limite du nombre de Froude Fr_{1L} , tout dépend du rapport de forme M .

À travers ce chapitre, un autre paramètre caractéristique du ressaut a été analysé; ce paramètre est le rapport Y des hauteurs conjuguées, obtenu par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut.

La deuxième étude concernée par cette recherche bibliographique est celle de Kateb, Debabeche et Benmalek 2013, l'étude se propose d'examiner, par la voie expérimentale, l'effet de la marche positive sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. Une étude comparative entre les caractéristiques du ressaut contrôle et le ressaut force de type A par marche positive est proposée.

Dans le deuxième chapitre, trois types de ressauts hydrauliques ont été analysés ; à savoir ; le ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires graduellement élargi et brusquement élargi (Approche de Hager 1985) et le ressaut dans un canal trapézoïdal graduellement élargi (Approche d'Omid, Esmaelivaraki et Narayanan 2007).

Les ressauts hydrauliques dans les élargissements graduels sont également appelés ressauts hydrauliques circulaires ou radiaux. Ils ont été largement discutés au cours des deux dernières décennies, notamment par Rubatta (1963), (1964) pour les canaux divergents et convergents, et par Koloseus et Ahmad (1969), qui considèrent un segment de cercle comme volume de contrôle et formulent un Équation pour le rapport des profondeurs conjuguées, ce qui explique une variation linéaire du profil de la surface longitudinale. La dispersion des observations des prédictions est relativement importante, mais ce fait est attribué aux difficultés de mesure. La longueur relative du ressaut est plus petite que dans un canal prismatique. Arbhabhrama et Abella (1971) étendent l'étude précédente en supposant un profil de surface longitudinale quarte elliptique. La relation rapport profondeur est présentée par analogie avec l'équation de Belanger (1828), et l'accord avec les observations est favorable pour la plage examinée des angles de divergence (10 à 26°). La comparaison entre leur approche et celle de Koloseus et al. Indique un meilleur ajustement des données en supposant un profil de surface non linéaire. La position de ressaut peut être estimée avec une relation empirique.

Concernant les bassins de dissipation d'énergie à section rectangulaire brusquement élargie, pour lesquels le jet supercritique entrant se sépare des parois latérales du canal. De nombreuses études ont été réalisées par Unny (1960), Sharma (1965) et Macha (1963). Le ressaut hydraulique résultant a été désigné comme un ressaut spatial hydraulique. Le rapport des hauteurs conjuguées est présenté en fonction du nombre Froude de l'écoulement incident, du rapport entre la hauteur d'eau et la largeur du canal en amont, et le rapport des largeurs amont et aval du canal. Cette combinaison de paramètres n'est pas claire lors de l'utilisation du

théorème de la quantité de mouvement, et Herbrand (1971) a souligné l'incohérence du paramètre de profondeur-largeur. En utilisant un modèle symétrique (à deux faces) et le modèle unilatéral correspondant, il a démontré expérimentalement l'insignifiance du paramètre en question. Les données d'Herbrand sont particulièrement intéressantes, car elles se rapportent à des ressauts avec un pied à la section de transition. Contrairement à ce type de ressaut, Rajaratnam et Subramanya (1968) examinent la formation du ressaut en aval de la section de transition.

Le troisième chapitre concerne l'approche de Khattaoui et Achour 2012 sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé. Dans cette étude les auteurs ont constaté que les écoulements uniformes, ou plus encore les écoulements non uniformes en lit composé sont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2005). Ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaire de l'écoulement. Il peut être donc intéressant de voir la grandeur de ces dissipations dans le cas où il se produit un ressaut hydraulique dans le lit composé. Il est plus intéressant d'autant plus que le ressaut hydraulique est utilisé justement pour la dissipation d'énergie. Cette dissipation supplémentaire est donc la bienvenue. En s'inspirant du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, une approche théorique est proposée dans ce présent travail pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en lit composé. Le rendement du ressaut est lui aussi quantifié. Toutes les équations sont présentées en termes adimensionnels afin de leur donner un caractère de validité général.

Le quatrième chapitre s'occupe de l'approche de Debabeche 2003, l'auteur a montré que le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse (Forster et Skrinde, 1950; Achour, 1997), continu ou discontinu ainsi que par une marche positif ou négatif (Hager et Sinniger, 1985). Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau aval, de contrôler sa position lors des changements des paramètres de l'écoulement et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin d'amortissement (Bretz 1987, Hager et Li. 1992). Cette étude se propose d'analyser expérimentalement, les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince, évoluant dans un canal rectangulaire. L'objectif principal de cette étude est de trouver les relations fonctionnelles, exprimées en termes adimensionnels, liant ces caractéristiques.

Dans la deuxième partie de cette étude, une analyse expérimentale a été présentée ; sur l'effet du seuil mince, sur le ressaut hydraulique évoluant dans trois types de canaux, à savoir,

le canal trapézoïdal, le canal trapézoïdal brusquement élargi à un canal rectangulaire et le canal rectangulaire composé. La recherche bibliographique a montré que le déplacement du seuil vers l'aval provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci (Debabeche 2003). Toutes ces constatations, mènent à trouvé des relations empiriques adimensionnelles, liantes les différentes caractéristiques du ressaut au rapport de compacité $\gamma = Lr/x$, défini comme le rapport de la longueur du rouleau Lr^* et de la position x du seuil.

En effet, notre premier chapitre de cette partie sera consacré à l'analyse expérimentale, de l'effet du seuil contenu à paroi mince sur le ressaut hydraulique en un canal de section droite trapézoïdale. Ce type de ressaut n'a connu que très peu d'étude. Les travaux les plus reconnus sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal sont ceux effectués par Poisey et Hsing (1938), Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989) et ceux de Kateb, Debabeche et Benmalek (2013) sur l'effet de la marche positive sur ce type de ressaut.

Le deuxième chapitre concerne le ressaut hydraulique évaluant en canal trapézoïdal brusquement élargi à un canal rectangulaire. L'étude des paramètres hydrauliques du ressaut dans les canaux non prismatique a fait l'objet de recherche pour plusieurs auteurs. Au premier lieu Herbrand (1973) a présenté les résultats d'une étude fondamentale approfondie relative au ressaut hydraulique dit spatial. Après une introduction portant sur les problèmes hydrauliques qui interviennent dans le calcul et dans la conception de bassins de dissipation comportant un élargissement soit brusque, soit progressif. Plutard Hager (1985) a analysé le phénomène du ressaut hydraulique sur un fond horizontal en canal rectangulaire non prismatique. À travers cette étude l'auteur a distingué entre les cas où l'écoulement est séparé et non séparé des parois latérales. Les résultats contiennent des formules pour le rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident, du rapport des largeurs correspondantes, la dissipation d'énergie relative et les caractéristiques de la longueur du ressaut.

Le troisième chapitre de cette étude expérimentale sera consacré au ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé, les seuls travaux existants pour ce type de ressaut c'est ceux du ressaut classique (Khattaoui et Achour 2012). Donc à travers cette contribution expérimentale une analyse sur l'effet du seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique était proposée. Pour atteindre cet objectif deux cas seront présentés : cas où l'écoulement s'effectuera au niveau du lit mineur du canal, et le deuxième cas, où le ressaut se forme au niveau du lit majeur. Des relations fonctionnelles seront établies, exprimant en termes adimensionnels, le rapport de compacité en fonction de différents paramètres caractérisant le ressaut.

En effet, selon la revue de la littérature, la compacité des ressauts hydrauliques n'a été étudiée que dans un canal rectangulaire par Debabeche (2003). Cette étude vise à trouver des relations empiriques de la hauteur relative du seuil ainsi que du rapport des hauteurs conjuguées, en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident et de la compacité du ressaut.

Première partie
Etude bibliographique

Première Partie

Étude bibliographique

Introduction

L'étude bibliographique a été divisée en quatre chapitres essentiels, le premier chapitre sur le ressaut hydraulique dans les canaux trapézoïdaux ce type de ressaut à attirer l'attention de plusieurs auteurs, les travaux les plus reconnus sont celles de Wanoschek et Hager (1989), ces derniers ont analysé les différents paramètres hydrauliques caractérisant le ressaut hydraulique classique. Ils ont décrit d'une manière détaillée le comportement du ressaut, dans un canal trapézoïdal, d'angle d'inclinaison de 45° ($m = 1$) et pour des valeurs de $M \leq 0,4$. Les observations ont révélé l'existence d'un rouleau du fond, jusqu'alors jamais détecté, et dont les caractéristiques géométriques, telles que la longueur à la base, la hauteur ainsi que la position sont définies.

Les essais ont montré que la longueur relative du ressaut dépend à la fois de la valeur du nombre de Froude Fr_1 et de la valeur du rapport de forme M : les courbes de la variation de la longueur relative du ressaut, obtenues pour $0,1 \leq M \leq 0,4$, issues des essais de Peterka pour le ressaut en canal de section droite triangulaire.

Les auteurs ont montré que le ressaut dans le canal trapézoïdal testé devrait être plus long et asymétrique au-delà d'une valeur limite du nombre de Froude Fr_{1L} , tout dépendant du rapport de forme M .

À travers ce chapitre, un autre paramètre caractéristique du ressaut a été analysé; ce paramètre est le rapport Y des hauteurs conjuguées, obtenu par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut.

La deuxième étude concernée par cette recherche bibliographique est celle de Kateb, Debabeche et Benmalek 2013, l'étude se propose d'examiner, par la voie expérimentale, l'effet de la marche positive sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. Une étude comparative entre les caractéristiques du ressaut contrôle et le ressaut force de type A par marche positive est proposé.

Dans le deuxième chapitre, trois types de ressauts hydrauliques ont été analysés ; à savoir ; le ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires graduellement élargi et brusquement élargi (Approche de Hager 1985) et le ressaut dans un canal trapézoïdal graduellement élargi (Approche d'Omid, Esmaelivaraki et Narayanan 2007).

Les ressauts hydrauliques dans les élargissements graduels sont également appelés ressauts hydrauliques circulaires ou radiaux. Ils ont été largement discutés au cours des deux dernières décennies, notamment par Rubatta (1963), (1964) pour les canaux divergents et convergents, et par Koloseus et Ahmad (1969), qui considèrent un segment de cercle comme volume de contrôle et formulent une équation pour le rapport des hauteurs conjuguées, ce qui explique une variation linéaire du profil de la surface longitudinale. La dispersion des observations des prédictions est relativement importante, mais ce fait est attribué aux difficultés de mesure. La longueur relative du ressaut est plus petite que dans un canal prismatique. Arbhahirama et Abella (1971) étendent l'étude précédente en supposant un profil de surface longitudinale quarte elliptique. La relation rapport profondeur est présentée par analogie avec l'équation de Belanger (1828), et l'accord avec les observations est favorable pour la plage examinée des angles de divergence (10 à 26°). La comparaison entre leur approche et celle de Koloseus et al. Indique un meilleur ajustement des données en supposant un profil de surface non linéaire. La position de ressaut peut être estimée avec une relation empirique.

Les bassins de dissipation d'énergie à section rectangulaire brusquement élargie, pour lesquels le jet supercritique entrant se sépare des parois latérales du canal. De nombreuses études ont été réalisées par Unny (1960), Sharma (1965) et Macha (1963). Le ressaut hydraulique résultant a été désigné comme un ressaut spatial hydraulique. Le rapport de profondeur conjuguée est présenté en fonction du nombre Froude de l'écoulement incident, du rapport entre la profondeur d'eau et la largeur du canal en amont, et le rapport des largeurs amont et aval du canal. Cette combinaison de paramètres n'est pas claire lors de l'utilisation du théorème de moment, et Herbrand (1971) a souligné l'incohérence du paramètre de profondeur-largeur. En utilisant un modèle symétrique (à deux faces) et le modèle unilatéral correspondant, il a démontré expérimentalement l'insignifiance du paramètre en question. Les données d'Herbrand sont particulièrement intéressantes, car elles se rapportent à des ressauts avec un pied à la section de transition. Contrairement à ce type de ressaut, Rajaratnam et Subramanya (1968) examinent la formation du ressaut en aval de la section de transition.

Le troisième chapitre concerne l'étude de Khattaoui et Achour 2012 sur le ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé. Dans cette étude les auteurs ont constaté que les écoulements uniformes, ou plus encore les écoulements non uniformes en lit composé sont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2005). Ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaire de l'écoulement.

Il peut être donc intéressant de voir la grandeur de ces dissipations dans le cas où il se produit un ressaut hydraulique dans le lit composé. Il est plus intéressant d'autant plus que le ressaut hydraulique est utilisé justement pour la dissipation d'énergie. Cette dissipation supplémentaire est donc la bienvenue. En s'inspirant du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, une approche théorique est proposée dans ce présent travail pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en lit composé. Le rendement du ressaut est lui aussi quantifié. Toutes les équations sont présentées en termes adimensionnels afin de leur donner un caractère de validité général.

Le quatrième chapitre sur l'approche de Debabeche 2003, se propose d'analyser expérimentalement, les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince, évoluant dans un canal rectangulaire. L'objectif principal de cette étude est de trouver les relations fonctionnelles, exprimées en termes adimensionnels, liant ces caractéristiques.

Chapitre I:

Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

Chapitre I

Ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

I.1. Introduction

Le ressaut hydraulique dans les canaux trapézoïdaux a attiré l'attention de plusieurs auteurs, les travaux les plus reconnus sont celles de Wanoschek et Hager (1989), ces derniers ont analysé les différents paramètres hydrauliques caractérisant le ressaut hydraulique classique.

Ils ont décrit d'une manière détaillée le comportement du ressaut, dans un canal trapézoïdal, d'angle d'inclinaison de 45° ($m = 1$) et pour des valeurs de $M \leq 0,4$. Les observations ont révélé l'existence d'un rouleau du fond, jusqu'alors jamais détecté, et dont les caractéristiques géométriques, telles que la longueur à la base, la hauteur ainsi que la position sont définies.

Les essais ont montré que la longueur relative L_j/h_2 du ressaut dépend à la fois de la valeur du nombre de Froude Fr_1 et de la valeur de la hauteur relative initiale M : les courbes de la variation de L_j/h_2 , obtenues pour $0,1 \leq M \leq 0,4$, issues des essais de Peterka pour le ressaut en canal de section droite triangulaire.

Les auteurs ont montré que le ressaut dans le canal trapézoïdal testé devrait être plus long et asymétrique au-delà d'une valeur limite du nombre de Froude Fr_{1L} , tout dépendant de la hauteur relative initiale M .

De même pour la longueur caractéristique du ressaut, nous allons aborder à travers ce chapitre un autre paramètre caractéristique du ressaut ; ce paramètre est le rapport des hauteurs conjuguées Y , obtenu par l'application du théorème de la quantité de mouvement, entre la section initiale et finale du ressaut.

La deuxième étude concernée par cette recherche bibliographique est celle de Kateb, Debabeche et Benmalek 2013, l'étude se propose d'examiner, par la voie expérimentale, l'effet de la marche positive sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. Une étude comparative entre les caractéristiques du ressaut contrôlé et le ressaut force de type A par marche positive est proposée.

I.2. Ressaut hydraulique classique

Le ressaut hydraulique est une surélévation brusque de la surface libre d'un écoulement permanent, qui se produit lors du passage du régime torrentielle au régime fluvial. Il est accompagné d'une agitation marquée et de grandes pertes d'énergie (figure 1.1).

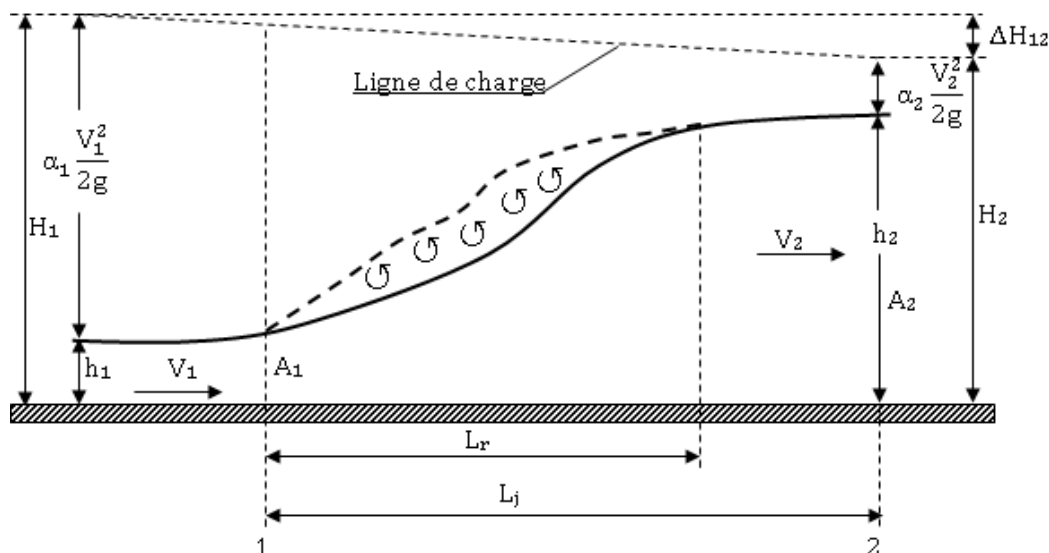


Figure 1.1 : Ressaut hydraulique

Les hauteurs h_1 et h_2 sont appelées profondeurs conjuguée du ressaut. La distance L_j entre la section 1 et 2 est appelée longueur du ressaut et la distance L_r appelée longueur du rouleau. La perte de charge est représentée par ΔH_{12} .

La capacité de dissipation du ressaut est généralement évaluée par le rapport de la perte de charge qu'il occasionne entre ces sections initiales et finales à la charge totale dans sa section initiale.

L'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est caractérisé par un coefficient cinétique (ou nombre de Froude $Fr_1 > 1$) et représente la relation entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des petites perturbations.

I.2.1. Classification du ressaut classique

La classification du ressaut classique est basée sur la variation du nombre de Froude Fr_1 caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut.

Pour les valeurs de $Fr_1 \leq 1$, le régime est lent, ou critique, et il n'y a pas de ressaut. Pour des valeurs de nombre de Froude comprise entre 1 et 1,7 et cela d'après Andersen (1978), la différence des profondeurs conjuguées en amont et en aval est très faible, et le ressaut est

caractérisé par de légères rides à la surface libre, aspect qui diffère peu de celui que l'on observe dans le régime critique, c'est le ressaut ondulé (figure 1.2).

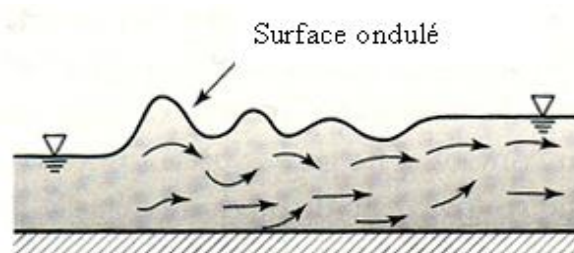


Figure 1.2 : Ressaut ondulé

Selon la classification de Bradly et Peterka (1957) on distingue quatre formes de ressaut classique.

- 1- Pour des valeurs de $1,7 < Fr_1 < 2,5$ on constate le même phénomène, mais plus accentué ; dans ce cas se produisent déjà de petits tourbillons superficiels. Jusqu'à ces valeurs de Fr_1 , la surface libre est raisonnablement plane et la distribution des vitesses est régulière mais le rendement obtenu est très faible : c'est le pré-ressaut (figure 1.3).

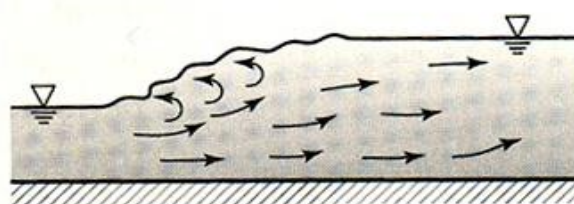


Figure 1.3 : Le pré-ressaut

- 2- Pour des valeurs de $2,5 < Fr_1 < 4,5$ l'écoulement est pulsative ; la plus grande turbulence se vérifie soit près de fond, ou à la surface : c'est le ressaut de transition (figure 1.4). Chaque pulsation produit une onde de période irrégulière, qui peut se propager sur plusieurs Kilomètres dans la nature, ce qui peut causer des dommages aux berges.

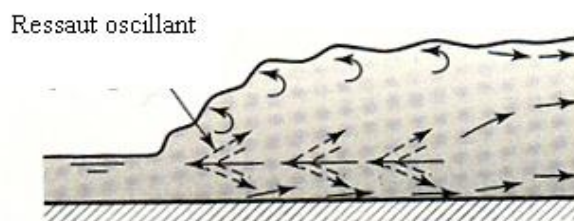


Figure 1.4 : Ressaut de transition

- 3- Pour des valeurs de $4,5 < Fr_1 < 9$, le ressaut est bien caractérisé et localisé. Ce type de ressaut est souvent adopté pour les bassins de dissipation d'énergie pour son bon rendement (45% et 70%) : c'est le ressaut stable (figure 1.5).



Figure 1.5 : Ressaut stable

- 4- Pour des valeurs de $Fr_1 > 9$, on constate des masses d'eau qui roulent par-dessous, au début du ressaut, et tombent sur le circuit rapide d'amont, d'une manière intermittente, provoquant des nouvelles ondulations en aval et la surface libre du ressaut est irrégulière : c'est le ressaut agité ou clapoteux (figure 1.6).



Figure 1.6 : Ressaut clapoteux

I.3. Approche de Wanoschek et Hager (1989)

I.3.1. Généralités

Les ressauts hydrauliques dissipent une grande quantité d'énergie mécanique. Ce phénomène est donc appliqué dans les bassins d'amortissements. Les bassins d'amortissements actuels ont généralement une forme rectangulaire. Le rendement du ressaut hydraulique $\eta = \Delta H/H_1$ croit avec l'augmentation du nombre de Froude Fr_1 . $\Delta H = H_1 - H_2$ est la perte d'énergie entre la section amont et aval du ressaut (figure 1.7). La fonction $\eta(Fr_1)$ peut facilement être établie pour les bassins prismatiques non rectangulaires, si l'on suppose que la force de frottement le long des parois du canal est compensée par la force de gravité

longitudinale. Typiquement, une telle configuration s'établit dans des canaux, dont la pente inférieure à 1%.

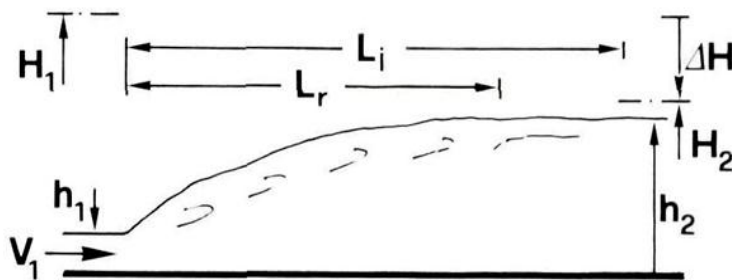


Figure 1.7 : Schéma de définition pour le ressaut hydraulique.

Du point de vue pratique, les canaux à section trapézoïdale sont particulièrement préoccupants. Pour un nombre de Froude Fr_1 donné le rendement η (équation 1.1) augmente avec $M = mh_1/b$, m est la cotangente de la pente latérale, h_1 la profondeur amont et b la largeur de base de la section transversale trapézoïdale symétrique.

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{Fr_1^2}{2Y^2} \left[\frac{(1+M)^3}{(1+2M)(1+MY)^2} \right]}{1 + \frac{Fr_1^2}{2} \left(\frac{1+M}{1+2M} \right)} \quad (1.1)$$

Pour les canaux rectangulaires ($M = 0$), et les canaux triangulaires ($1/M = 0$) sont des cas particuliers de la section trapézoïdale. Les expressions donnant les rapports des profondeurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ et le rendement η de l'écoulement correspondant aux deux types de canaux sont donnés par l'équation (1.2) et l'équation (1.3) respectivement pour $Fr_1 > 2,5$.

$$Y = \sqrt{2}Fr_1 - \frac{1}{2}, \quad \eta_R = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{Fr_1}\right)^2, \quad M = 0 \quad (1.2)$$

$$\text{Et } Y = \left(\frac{3}{2}Fr_1^2 - 1\right)^{\frac{1}{3}}, \quad \eta_T = \left[1 - \left(\frac{12}{Fr_1^4}\right)^{\frac{1}{3}}\right]^2, \quad 1/M = 0 \quad (1.3)$$

La dissipation d'énergie relative $\eta = \Delta H / H_1$ (figure 1.8), dans laquelle $H_1 = h_1 + Q^2/(2gA_1^2)$ est l'énergie en amont, et $\Delta H = H_1 - H_2$ (figure 1.7), est facilement déterminable en utilisant l'équation de Bernoulli.

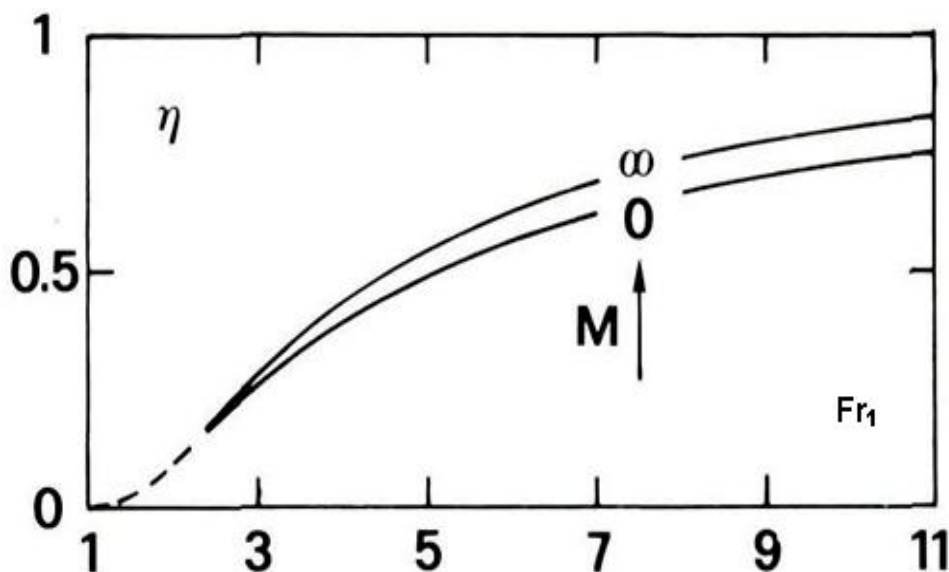


Figure 1.8 : Dissipation de l'énergie relative, $\eta = \Delta H / H_1$ en fonction de Fr_1 et de M pour un canal rectangulaire ($M = 0$) et triangulaire ($1/M = 0$).

Pour un Fr_1 donné, la différence $(\eta_T - \eta_R) / \eta_T$ est presque égale à 10%; les indices R et T se réfèrent respectivement au canal rectangulaire et au canal triangulaire. Cette augmentation du rendement est importante.

Par rapport au ressaut dans le canal rectangulaire un certain nombre d'avantages ont été établis. Cependant, pour la conception pratique du bassin de dissipation triangulaire est compliquée. Bien que pas aussi rentable que le ressaut dans le canal triangulaire, le ressaut hydraulique dans le canal trapézoïdal à attirer l'attention de plusieurs auteurs.

Le but de la présente étude est d'analyser les principales caractéristiques d'écoulement de ces canaux. Les résultats sont ainsi basés sur la connaissance actuelle des ressauts dans les deux sections limites et des observations obtenues dans un canal trapézoïdal symétrique à 45° .

I.3.2. Expérimentation

I.3.2.1. Installations expérimentales

Les présents essais ont été réalisés dans un canal trapézoïdal prismatique symétrique de largeur de base 0,2 m et une pente latérale de 45° ($m = 1$). La profondeur du canal était de 0,7 m et de 1,60 m de largeur. La longueur du canal horizontal était de 8 m. Le débit a été assuré par une conduite de diamètre 0,15 m. Le passage de la conduite sous pression au canal a été réalisé par une "boîte de pression". Le jet entrant est ainsi guidé par un horizontal, et a généré une profondeur de départ initiale bien définie h_0 ($\pm 0,2$ mm). Des vitesses jusqu'à

$V_0 = 8 \text{ ms}^{-1}$ ont été atteintes. Observation des profils de vitesse d'admission indiquait une distribution de vitesse totalement turbulente, symétrique par rapport à l'axe du canal.

On a considéré des valeurs de $h_0 = 20 \text{ mm}$, 40 mm , 60 mm et 80 mm , pour lesquelles $M = 0,1 ; 0,2 ; 0,3 ;$ et $0,4$, respectivement. Des débits Q entre $7,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ et $98 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ont été exécutés. Les limites supérieures des nombres de Froude respectifs sont ainsi devenues $Fr_1 = 15; 13; 9;$ et $5,45$. L'immersion de l'eau est réglée de telle sorte que les ressauts étaient situés le plus près possible de la section d'entrée sans pour autant submerger le couvercle.

La distance entre x_0 et x_1 , se situait généralement à $0,5 \text{ m}$. En raison de la vitesse moyenne V_1 à la section x_1 était inférieur à v_0 . La valeur de h_1 a été obtenue par un calcul de remous standard basé sur le débit Q , la profondeur d'écoulement h_0 , et sur l'équation de Colebrook-White pour le facteur de frottement f , puisque le domaine des nombres de Reynolds était entre 10^5 et 10^6 et le canal d'essai présent une surface pratiquement lisse, f atteint des valeurs de $0,010$ à $0,012$. La différence entre h_0 et h_1 était normalement faible, mais impliquait généralement une réduction de 3% de Fr_1 .

À l'extrémité aval du canal, l'eau pourrait être réglée par une grille mobile. Plus loin en aval, le débit était mesuré par un canal Venturi. Son exactitude était meilleure que $\pm 0,5 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ ou $\pm 2,5 \%$ (plus grande des deux valeurs).

I.3.2.2. Caractéristiques de l'écoulement

Comparée au ressaut hydraulique bien connu dans les canaux rectangulaires prismatiques (ressaut classique), la configuration d'écoulement des ressauts dans les canaux trapézoïdaux est tout à fait différente. Les ressauts classiques sont caractérisés par un jet de fond à grande vitesse et un rouleau de surface superposé. De tels ressauts sont habituellement appelés bidimensionnels.

La figure (1.9) montre la représentation graphique des caractéristiques d'écoulements principaux dans un ressaut trapézoïdal. L'entrée d'air à grande vitesse ⁽¹⁾ est soulevée dans l'air et forme une zone d'éclaboussure ⁽²⁾ en raison de la présence d'une zone de séparation au fond ⁽³⁾, dit rouleau de fond. Le courant principal s'écoule donc près de la surface et diverge lentement vers les parois latérales. Ceci est dû à la concentration de l'écoulement ⁽¹⁾ sur la partie centrale de la section transversale et à la dépression résultante le long des parois latérales. Une première partie de l'écoulement latéral retourne en amont et forme des zones ⁽⁴⁾ d'écoulement latérales.

Une deuxième partie reste à la surface et continue en aval ⁽⁵⁾. Une troisième partie plonge le long des parois latérales en pente et enrôle le rouleau de fond ⁽⁶⁾. Ce courant n'est plus entraîné par le rouleau de fond, mais continue directement vers aval du ressaut ⁽⁷⁾.

Un ressaut hydraulique trapézoïdal est ainsi géré par des phénomènes d'écoulement très spatiaux. La présence du rouleau de fond a caractérisé ce type de ressaut par rapport au ressaut classique:

- les vitesses le long du fond sont sensiblement réduites;
- Un soulèvement à la surface du courant principal et diverge vers les deux côtés du canal;
- par conséquent, les vitesses maximales se produisent le long des parois latérales près de la surface libre.

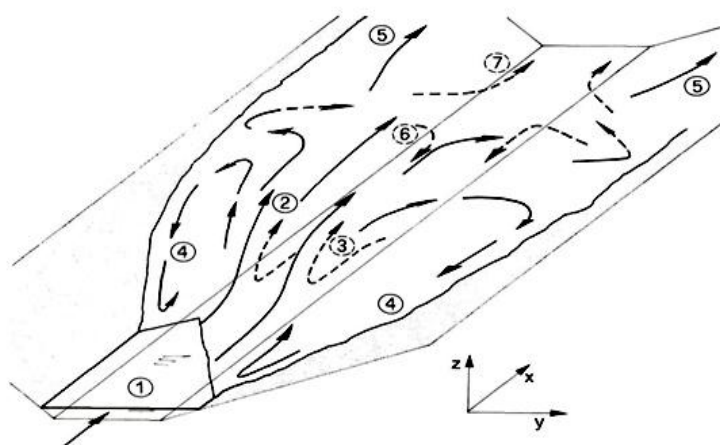


Figure 1.9 : Vue schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut en canal trapézoïdal. (—>) courants de surface, (- - ->) courants de fond.

I.3.3. Analyse des résultats

I.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Le nombre de Froude de l'écoulement incident pour un canal trapézoïdal est donné par :

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3} = \frac{m^3Q^2}{gb^5} \frac{(1+2M)}{[M(1+M)]^3} \quad (1.4)$$

Le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut $Y = h_2/h_1$ peut être calculé en fonction de Fr_1 et M , par l'application du théorème de la quantité de mouvement.

$$Fr_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (1.5)$$

La Figure (1.10) montre la comparaison avec les données expérimentales et un accord général équitable est noté. Comme nous l'avons déjà indiqué précédemment, les valeurs expérimentales de Y sont toujours inférieures à celles de la théorie. Cette déviation doit être attribuée à la négligence du frottement au niveau de la paroi. Comme Fr_1 et M sont généralement donnés et $h_2 = Y \cdot h_1$ requis pour des considérations de conception.

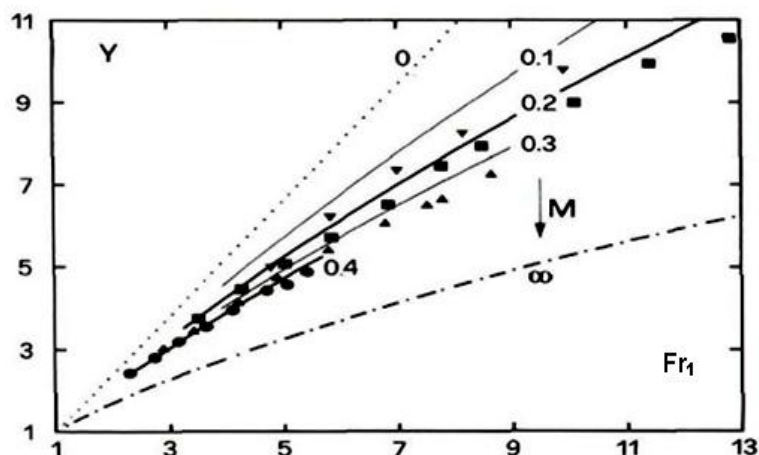


Figure 1.10: Variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ pour différents valeurs de M .
 (—) Courbe lié à l'équation théorique (4). (...) Courbe pour $M = 0$ (canal rectangulaire), (▼) $M = 0.1$,
 (■) $M = 0.2$, (▲) $M = 0.3$, (●) $M = 0.4$. (· - ·) Courbe pour $M = \infty$ (canal triangulaire).

I.3.3.2. Rouleau de fond

Une caractéristique particulière des ressauts trapézoïdaux avec $Fr_1 > 4$ est l'apparition d'un rouleau de fond (figure 1.11.d).

La figure (1.11.d) représente une esquisse de définition. Les dimensions globales du rouleau de fond peuvent être données par L_u (distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau de fond), L_b (longueur du rouleau de fond) et h_b (hauteur maximale du rouleau de fond).

Les figures (1.11.a) à (1.11.c), montrent les rapports : $\lambda_u = L_u/h_2$, $\lambda_b = L_b/h_2$ et h_b/h_2 en fonction de Fr_1 pour diverses valeurs de M , où h_2 correspond à la profondeur d'eau aval. Bien que la définition expérimentale des positions amont et aval soient compliqués pour un écoulement très turbulent, ces constatations révèlent qu'il existe des relations définies pour λ_u , λ_b et h_b/h_2 .

- λ_u est défini entre $2 < \lambda_u < 4$, tout à fait près de pied du ressaut.
- Pour un Fr_1 donné, λ_u augmente avec l'augmentation de M .
- λ_b est beaucoup plus grand que λ_u et peut atteindre des valeurs aussi supérieures que 8.

- λ_b diminue avec la croissance de M , contrairement à λ_u .
- Il semble y avoir un maximum pour la fonction λ_b (Fr_1).
- L'extrémité du rouleau de fond ($\lambda_u + \lambda_b$) est presque indépendante de M et augmente avec la croissance du nombre de Froude jusqu'à une valeur de $Fr_1 = 10,5$.
- La hauteur maximale h_b/h_2 du rouleau de fond augmente avec Fr_1 , jusqu'à une limite supérieure de 0,6 à 0,7. Pour Fr_1 fixe h_b/h_2 augmente avec l'augmentation de M .

Il semble intéressant de souligner l'extension considérable (axiale) du rouleau de fond étonnamment, la présence d'un rouleau de fond n'a pas été détectée comme un composant typique de ressauts hydrauliques trapézoïdaux. Pourtant, une configuration d'écoulement similaire a récemment été décrite par Hager pour des ressauts dans des canaux en U, pourvu que $h_1/D \ll 1$, où D est le diamètre de la partie circulaire inférieure. Des observations récentes sur des ressauts dans un canal semi-triangulaire ont mis en évidence la présence d'un rouleau de fond. Cela peut être dû à l'effet du "demi-modèle" utilisé; les rouleaux de fonds devraient apparaître pour un modèle complet. Des enquêtes futures sont nécessaires pour ce point.

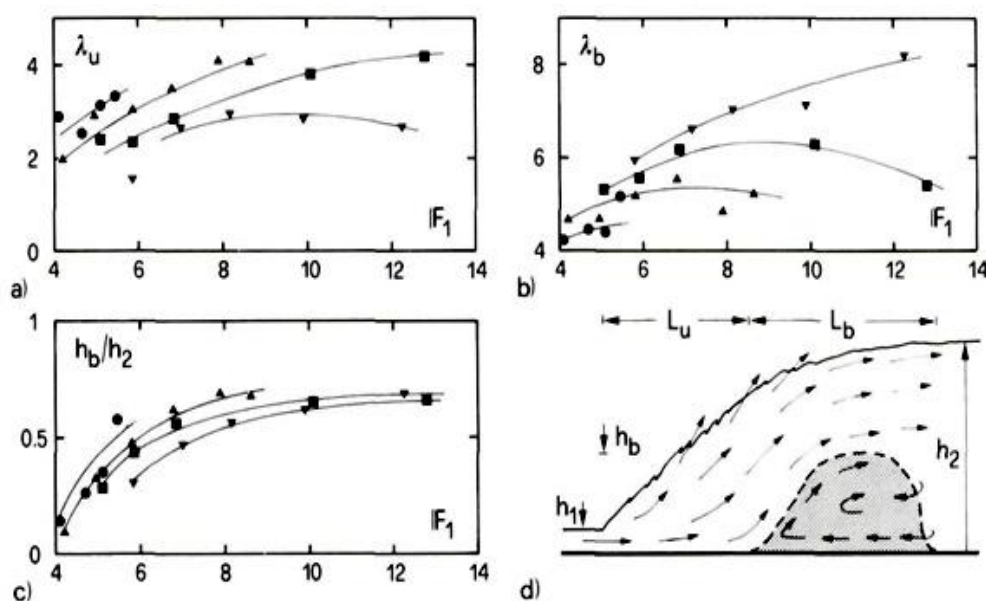


Figure 1.11: Caractéristiques principales du rouleau de fond: a) distance d'approche. b) longueur maximale. c) hauteur maximale adimensionnelle h_b/h_2 en fonction de Fr_1 , et de M . Les notations sont celles de la Figure 10. d) croquis de définition.

I.3.3.3. Longueur de ressaut

Une autre longueur d'intérêt est la longueur du ressaut L_j . Bien que de nombreuses définitions pour cette longueur aient été avancées, nous laissons la fin du ressaut à la position

où l'ébullition de surface disparaît. À ce point, les poches de bulles d'air montent à la surface et indiquent ainsi la fin de la zone de désaération. De toute évidence, le niveau de turbulence diminué de façon significative et l'écoulement ne portent que quelques bulles d'air plus en aval. La fin du ressaut a été visualisée à la fois par les yeux et par des photographies.

La figure (1.12) montre que $\lambda_j = L_j/h_2$ en fonction de Fr_1 et M . Il apparaît par conséquent que λ_j augmente avec Fr_1 et M .

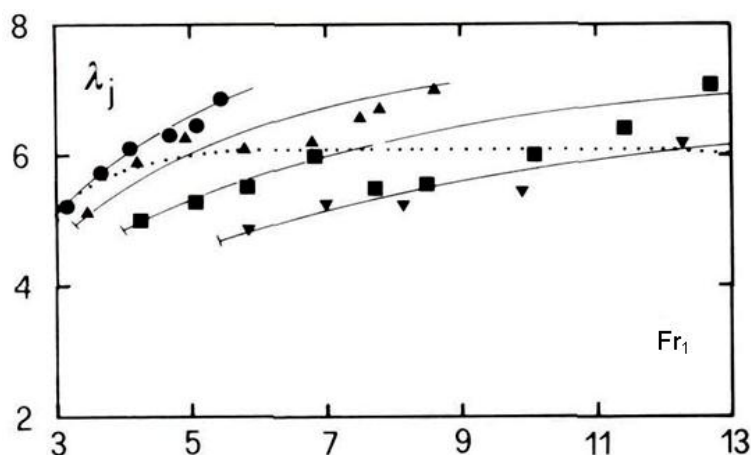


Figure 1.12 : Longueur relative du ressaut $\lambda_j = L_j/h_2$ en fonction de Fr_1 et M . Les notations sont conformes à la Figure 1.9. (.....) Courbe du ressaut hydraulique en canal rectangulaire.

I.4. Effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal (Approche de Kateb, Debabeche et Benmalek 2013)

L'étude se propose d'examiner, par la voie expérimentale, l'effet de la marche positive sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal. Une étude comparative entre les caractéristiques du ressaut contrôle et le ressaut force de type A par marche positive est proposée. Des conclusions intéressantes sont alors tirées. Les résultats de cette recherche peuvent être appliqués dans le cas des bassins de dissipation de charge hydraulique des barrages et également dans celui des raies d'irrigation, utilisant la capacité du ressaut à surélever le plan d'eau à l'aval de l'écoulement.

I.4.1. Description du modèle expérimental

Le canal de mesure utilisé est de section trapézoïdale, il est constitué d'une structure métallique de forme rectangulaire, dans laquelle sont fixes des panneaux transparents en plexiglas formant la géométrie d'un canal trapézoïdal (figure 1.13.a). Le fond du canal est parfaitement horizontal. Un bassin d'alimentation est relié au canal par le moyen d'une conduite circulaire. Le canal trapézoïdal (figure 1.13.b) est caractérisé par une base de largeur

20 cm, de longueur 6 m et d'angle d'inclinaison des parois latérales de $72,68^\circ$. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérée une pompe qui alimente un convergent en charge (1.14.a) débouchant dans le canal de mesure.

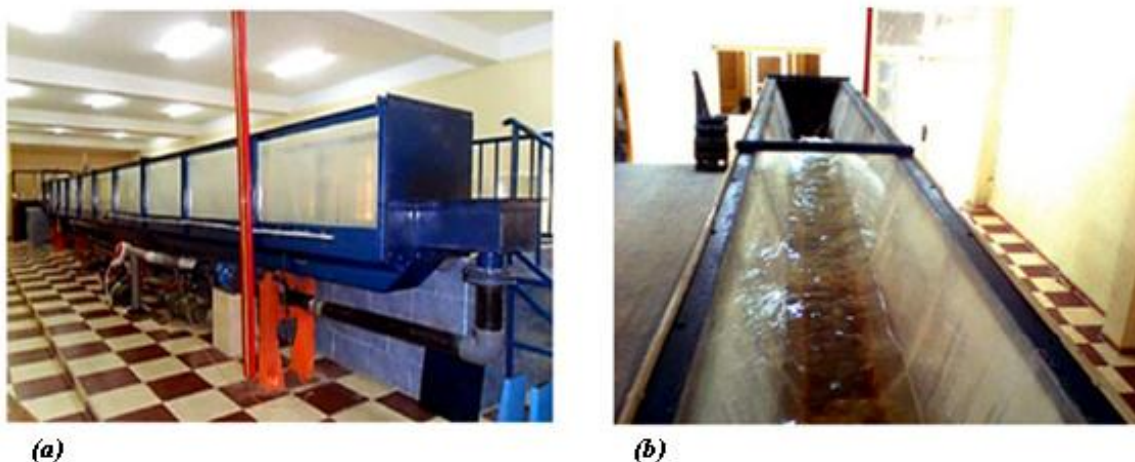


Figure 1.13 : Photographies du canal de mesure

Afin d'obtenir un nombre important de points de mesure, nous avons confectionné 12 marches positives de longueur 1 m (figure 1.14.c) pour différentes hauteurs s (cm) : 3,6; 4,7; 5,6; 6,5; 7,5; 9; 10; 11,6; 12,7; 13,9; 14,2; 15,9 (figure 1.14).

La mesure de débit est effectuée par le moyen d'un débitmètre électromagnétique. Celui-ci est composé d'un capteur de mesure, placé au travers de l'écoulement, raccordé par un câble électrique à un convertisseur de mesure à affichage digital. Le débit volume mesuré est inscrit dans l'intervalle: $2 \text{ m}^3/\text{s} \leq Q \leq 44 \text{ m}^3/\text{s}$. La précision du débitmètre est de $\pm 0,5 \text{ m}^3/\text{s}$. À l'exception de la hauteur initiale h_1 qui est définie au préalable par l'ouverture du convergent, la profondeur finale ainsi que toutes les profondeurs de la surface libre du ressaut sont mesurées par une limnimétrie. En raison de la stabilité, de l'écoulement fluvial à l'aval, l'erreur de mesure sur la profondeur finale h_2 est de 2 mm environ.

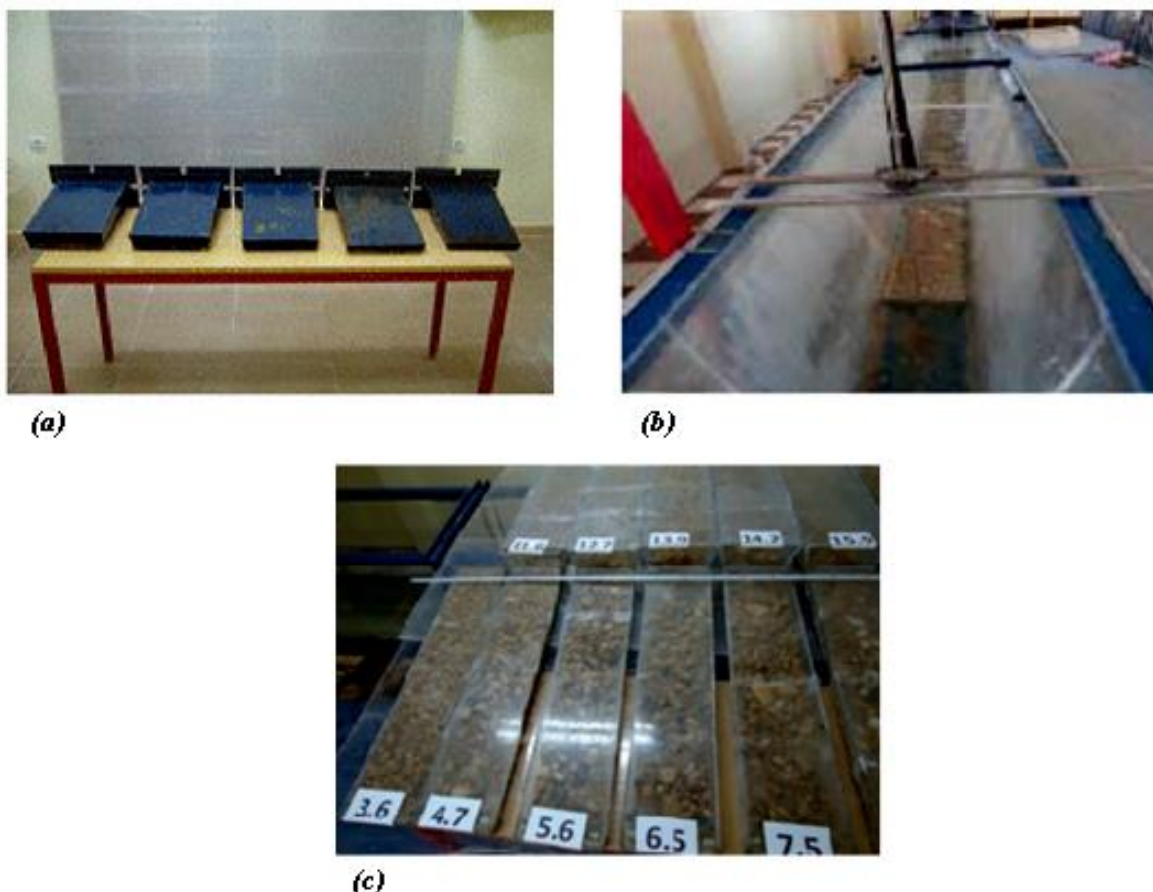


Figure 1.14 : a) photographie d'une série de convergents. b) mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique. (c) Photographie des séries de marches positives.

I.4.2. Expérimentation

L'expérimentation a été menée sous cinq hauteurs initiales de l'écoulement : h_1 (mm) égale 20, 30, 40, 50 et 60. Une large gamme de nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue, tel que : $2 < Fr_1 < 14$. Pour l'ensemble des essais effectués le rapport de forme $M = mh_1/b$ est compris entre 0,031 et 0,094. La formation du ressaut contrôlé et sa force est conditionnée par la mise en place d'une marche positive à l'aval de l'écoulement. En effet, pour une hauteur s de la marche positive placée à l'extrémité aval du canal et pour une hauteur h_1 de l'écoulement incident, l'augmentation du débit volume Q provoque l'apparition d'un ressaut. Cependant, lorsque le rapport L_j/x est inférieur ou égal à un, le ressaut est dit contrôlé, lorsque ce rapport est supérieur à un, le ressaut est dit force. Le ressaut force est dit de type A lorsque la position x de la marche coïncide avec la longueur L_r du rouleau. Les principales caractéristiques étudiées dans un ressaut hydraulique provoqué par une marche positive sont : le débit volume Q , la profondeur initiale h_1 , la profondeur finale h_2 , la hauteur s de la marche, la longueur L_r du rouleau, la longueur L_j du ressaut et la position x de la

marche. Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2/h_1$ des profondeurs conjuguées du ressaut, la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive, la longueur relative $\lambda_j = L_j/h_1$ du ressaut, la longueur relative $\lambda_r = L_r/h_1$ du rouleau et la position relative $X = x/h_1$ de la marche.

I.4.3. Résultats expérimentaux

I.4.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

La figure (1.15) montre la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude Fr_1 , pour les trois types de ressauts cités précédemment. La relation théorique (1.6) de Wanoschek et Hager (1989) montre que le nombre de Froude Fr_1 incident dépend exclusivement du rapport des hauteurs conjuguées Y et du rapport de forme M . La courbe issue de cette relation se présente au-dessus des trois autres courbes expérimentales montrant clairement que la présence d'un obstacle a un effet réducteur significatif sur le ressaut. Cependant, pour une gamme pratique de nombres de Froude la courbe théorique est presque confondue avec la courbe du ressaut contrôle par seuil mince.

$$Fr_1^2 \left[1 - \frac{(1+M)}{Y(1+MY)} \right] = \frac{1+2M}{2(1+M)^2} \left[Y^2 \left(1 + \frac{2MY}{3} \right) - \left(1 + \frac{2M}{3} \right) \right] \quad (1.6)$$

Par ailleurs, pour un même nombre de Froude, le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut force est inférieur à celui de son homologue contrôle. Aussi, il est constaté que pour le même type de ressaut, la marche positive a un effet réducteur sur la hauteur du ressaut meilleur que celui du seuil mince. Par ailleurs, la représentation graphique (figure 1.15) de la fonction $Y = f(Fr_1)$, liant le rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ et le nombre de Froude Fr_1 , a abouti à trois courbes uniques. L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés montre que la fonction $Y = f(Fr_1)$ est une droite d'équation de la forme : $Y = aFr_1$

Avec : $0,031 \leq M \leq 0,094$ et $2 < Fr_1 < 8$ ou : $a = 1,21$ pour le ressaut contrôle par seuil mince, $a = 1,13$ pour le ressaut contrôle par marche positive, $a = 1,01$ pour le ressaut force par marche positive.

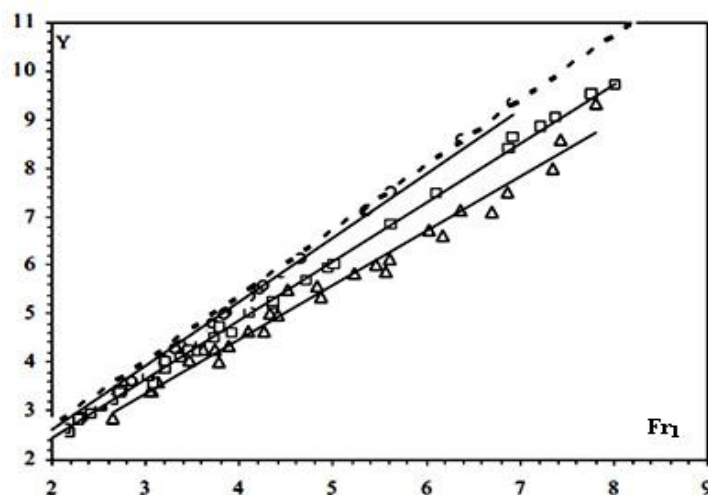


Figure 1.15 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude Fr_1 . (o) ressaut contrôlé par seuil mince; (□) ressaut contrôlé par marche positive; (Δ) ressaut force de type A par marche positive; (- - -) courbe tracée selon la relation théorique (1).

I.4.3.2. Hauteur relative du seuil et de la marche positive

La figure (1.16) montre la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil et la marche positive en fonction du nombre de Froude Fr_1 . En effet, cette figure montre clairement que pour un même nombre de Froude, la hauteur relative S de la marche du ressaut force est inférieure à celle du ressaut contrôlé. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport $S = s/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident suit une loi de type puissance de la forme :

$$s/h_1 = aFr_1^b \quad (1.7)$$

Avec : $0,031 \leq M \leq 0,094$ et $1,5 < Fr_1 < 8$ ou : $a = 0,15$ et $b_1 = 1,65$ pour le ressaut force par marche positive, $a = 0,24$ et $b = 1,57$ pour le ressaut contrôlé par marche positive, $a = 0,42$ et $b = 1,36$ pour le ressaut contrôlé par seuil mince.

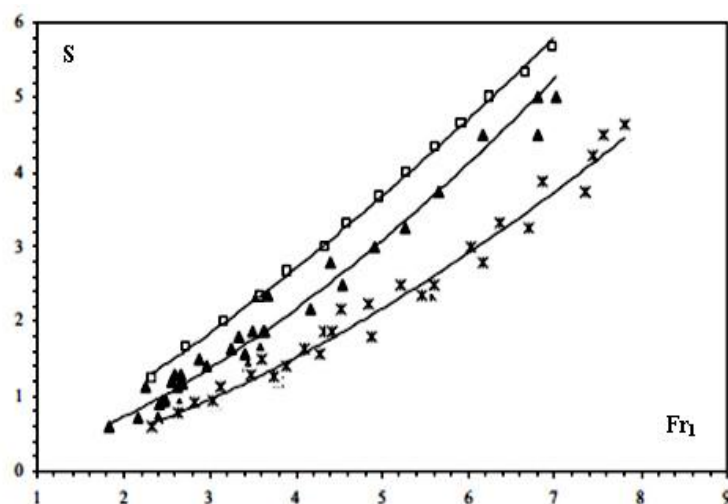


Figure 1.16 : Variation du rapport S de la marche en fonction du nombre de Froude Fr_1 . (▲) ressaut contrôlé par marche; (□) ressaut contrôle par seuil mince; (x) ressaut force de type A par marche positive.

I.4.3.3. Position relative de la marche positive

La figure (1.17) montre que pour un même nombre de Froude, la position relative de la marche positive du ressaut force est inférieure à celle du ressaut contrôle, ce qui implique que pour les mêmes conditions amont, le ressaut force par marche évolue dans un bassin plus réduit que son homologue contrôle par marche positive et par seuil mince. La représentation graphique (figure 1.17) de la fonction $X = f(Fr_1)$, relation liant les positions relatives du seuil et les nombres de Froude incidents, a abouti à deux courbes uniques.

L'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés non linéaire a montré que la fonction $X = f(Fr_1)$ est une droite, donnée par la relation suivante : $X = aFr_1^b$, avec : $0,031 \leq M \leq 0,094$ et $2 < Fr_1 < 8$ ou : $a = 12,86$ et $b = 6,84$ pour le ressaut contrôlé par marche positive, $a = 10,54$ et $b = 5,06$ pour le ressaut force par marche positive, $a = 12,91$ et $b = 2,52$ pour le ressaut contrôlé par seuil mince.

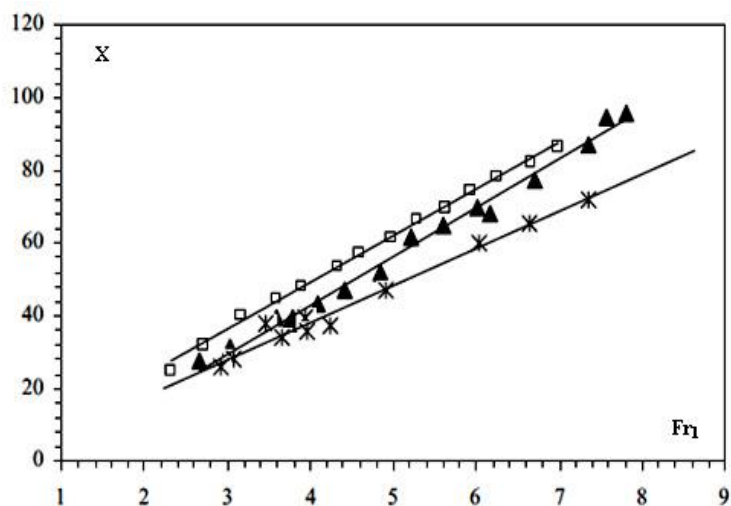


Figure 1.17 : Variation de la position de la marche en fonction du nombre de Froude Fr_1 . (▲) ressaut contrôlé par marche; (□) ressaut contrôle par seuil mince; (✱) Ressaut force de type A par marche positive.

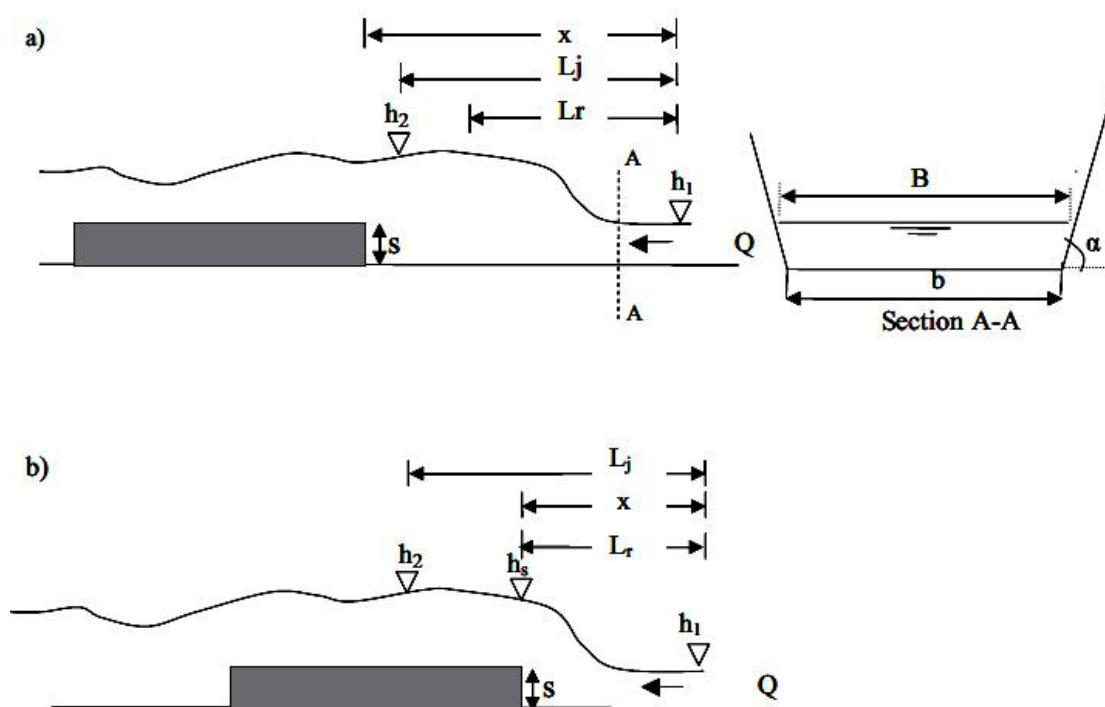


Figure 1.18 : Schéma du ressaut hydraulique. a) ressaut contrôlé. b) ressaut force de type A. b , largeur de la base du canal; B , largeur du canal au niveau de la surface libre; h_1 , profondeur conjuguée amont; h_2 , profondeur conjuguée aval; h_s , profondeur d'eau au droit du seuil; L_r , longueur du rouleau; L_j , longueur du ressaut; Q , débit volume; s , hauteur de la marche; x , position de la marche par rapport au pied du ressaut; α , angle d'inclinaison du talus du canal trapézoïdal.

I.4.3.4. Le 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 :

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad (1.8)$$

Avec : $\Delta H = H_1 - H_2$.

Ou H_1 et H_2 désignent, respectivement, la charge totale dans les sections initiale et finale du ressaut. Celles-ci sont définies par les relations :

$$H_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad H_2 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g}$$

En tenant compte de l'équation de continuité ($Q = VA$, ou A est l'aire de la section mouillée), ces deux dernières relations s'écrivent :

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} H_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (1.9)$$

Avec $A_1 = bh_1 + mh_1^2$ et $A_2 = bh_2 + mh_2^2$

Le nombre de Froude de l'écoulement incident dans un canal trapézoïdal est défini par la relation :

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2 [b \cdot (1+2M)]}{g [bh_1 (1+M)]^3} \quad (1.10)$$

En tenant compte des relations précédentes, le rendement du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal, s'écrit comme suit :

$$\eta = 1 - \frac{Y + (Fr_1^2 / 2Y^2) \cdot [(1+M)^3 / (1+2M)(1+MY)^2]}{1 + [Fr_1^2 / 2] \cdot [(1+M) / (1+2M)]} \quad (1.11)$$

La figure (1.19) montre que les points de mesures du ressaut force de type A, par marche positive sont au-dessus de leurs homologues contrôlés pour une gamme de nombre de Froude incident

$2 < Fr_1 < 8$. Cependant, pour les nombres de Froude $Fr_1 > 8$ tous les points de mesures tendent à se rejoindre pour former un seul nuage de points.

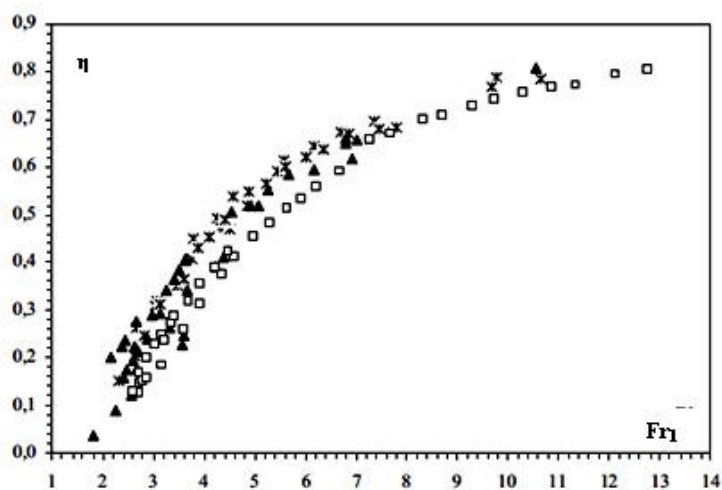


Figure 1.19: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude Fr_1 . (▲) ressaut contrôlé par marche; (□) ressaut contrôlé par seuil mince; (⋈) ressaut force de type A par marche positive.

I.5. Conclusion

Dans ce chapitre on a abordé les travaux de Wanoschek et Hager (1989) où le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique de 45° de pente latérale est analysé. Sur la base de l'approche de la dynamique unidimensionnelle, ils ont montré que le rendement est significativement plus élevé que pour les ressauts dans des canaux rectangulaires. Cette propriété attire l'attention sur ses caractéristiques hydrauliques, soit un niveau d'eau amont réduit et des avantages sur la construction des parois latérales inclinées.

Par rapport au ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires, les ressauts trapézoïdaux sont régis par des caractéristiques importantes d'écoulement spatial. Sur la base d'enregistrements de vitesse 3D, un schéma de flux est établi (figure 1.9).

Une autre propriété particulière des ressauts trapézoïdaux est la présence d'un rouleau de fond et de zones de retour latéral. D'autres considérations se rapportent au rapport des profondeurs conjuguées (figure 1.10), aux principales caractéristiques du rouleau de fond (figure 1.11), au retour latéral et à la longueur du ressaut (figure 1.12). Les auteurs ont décrit les différents types d'instabilités inhérentes à ces ressauts. Ainsi, ils ont présenté un aperçu complet du schéma d'écoulement interne des ressauts dans les canaux trapézoïdaux, au moins en ce qui concerne les propriétés temporelles.

La seconde étude de Kateb, Debabeche et Benmalek (2013) a permis d'analyser expérimentalement trois types de ressauts à savoir : le ressaut contrôlé par seuil mince, ressaut

contrôle par marche positive et le ressaut force type A. En effet, il a été trouvé, pour les trois configurations de ressaut, des relations empiriques permettant le dimensionnement du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Une étude comparative a été effectuée entre ces trois types de ressauts et il ressort que pour le même nombre de Froude Fr_1 , la profondeur conjuguée d'aval, la position de la marche et la hauteur du seuil sont plus réduites dans le ressaut force de type A, que pour leurs homologues contrôlés par marche positive et par seuil mince. L'étude a abordé ensuite, la variation du rendement η en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, et ceci pour les trois configurations de ressauts étudiées. L'étude à montre que les points de mesures expérimentales du ressaut de type A, forcé par marche positive se présente légèrement au-dessus de ceux contrôlés par marche positive, par conséquent, l'effet de la dissipation de l'énergie, pour les trois configurations de ressauts, est quasi identique.

Chapitre II

Ressaut hydraulique dans les canaux élargis

Chapitre II

Ressaut hydraulique dans les canaux élargis

II.1. Introduction

Dans le présent chapitre, trois types de ressauts hydrauliques ont été examinés à savoir ; le ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires graduellement élargi et brusquement élargi (Approche de Hager 1985) et le ressaut dans un canal trapézoïdal graduellement élargi (Approche d'Omid, Esmaelivaraki et Narayanan 2007).

Les ressauts hydrauliques dans les élargissements graduels sont également appelés ressauts hydrauliques circulaires ou radiaux. Ils ont été largement discutés au cours des deux dernières décennies, notamment par Rubatta (1963) (1964) pour les canaux divergents et convergents, et par Koloseus et Ahmad (1969), qui considèrent un segment de cercle comme volume de contrôle et formulent une équation pour le rapport des hauteurs conjuguées, ce qui explique une variation linéaire du profil de la surface longitudinale. La dispersion des observations des prédictions est relativement importante, mais ce fait est attribué aux difficultés de mesure. La longueur relative du ressaut est plus petite que dans un canal prismatique. Arbhabhrama et Abella (1971) étendent l'étude précédente en supposant un profil de surface longitudinale quarte elliptique. La relation du rapport des hauteurs conjuguées est présentée par analogie avec l'équation de Belanger (1828), et l'accord avec les observations est favorable pour la plage examinée des angles de divergence (10° à 26°). La comparaison entre leur approche et celle de Koloseus et Ahmad, indique un meilleur ajustement des données en supposant un profil de surface non linéaire. La position de ressaut peut être estimée avec une relation empirique.

Les bassins de dissipation d'énergie à section rectangulaire brusquement élargie, pour lesquels le jet supercritique entrant se sépare des parois latérales du canal. De nombreuses études ont été réalisées par Unny (1960), Sharma (1965) et Macha (1963). Le ressaut hydraulique résultant a été désigné comme un ressaut hydraulique spatial . Le rapport des hauteurs conjuguées est présenté en fonction du nombre Froude de l'écoulement incident, du rapport entre la profondeur d'eau et la largeur du canal en amont, et le rapport des largeurs amont et aval du canal. Cette combinaison de paramètres n'est pas claire lors de l'utilisation du théorème de la quantité de mouvement, et Herbrand (1971) a souligné l'incohérence du paramètre de profondeur-largeur. En utilisant un modèle symétrique (à deux faces) et le modèle unilatéral correspondant, il a démontré expérimentalement l'insignifiance du paramètre en question. Les données d'Herbrand sont particulièrement intéressantes, car elles

se rapportent aux ressauts où le pied est au niveau de la section de transition. Contrairement à ce type de ressaut, Rajaratnam et Subramanya (1968) examinent la formation du ressaut en aval de la section de transition.

II.2. Canal rectangulaire graduellement élargi (Approche de Hager 1985)

II.2.1. Analyse du ressaut hydraulique

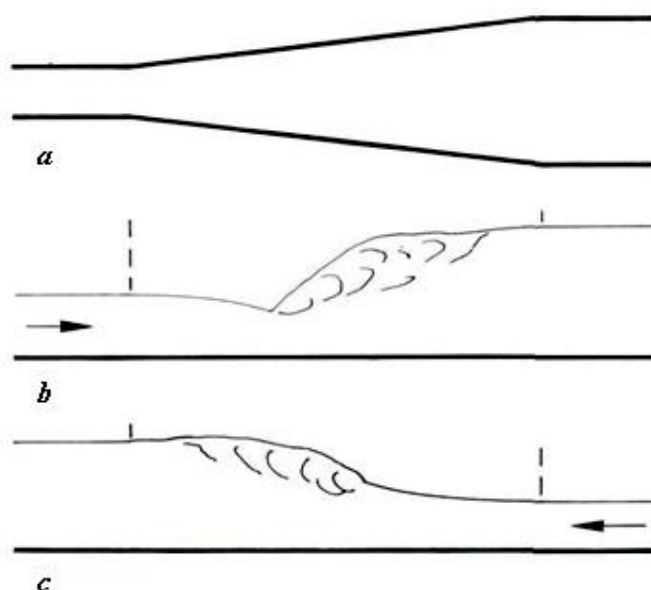


Figure 2.1 : Ressaut hydraulique dans une transition de canal avec variation linéaire de la largeur et sur fond presque horizontal (a); profil de surface moyen pour canal divergent (b), et canal convergent (c).

Une analyse plus détaillée peut être obtenue en considérant que la longueur de ressaut L_j est différente de zéro. L'application du théorème des moments dans le sens longitudinal donne :

$$\frac{b_1 h_1^2}{2} + \frac{Q^2}{g b_1 h_1} + F_x = \frac{b_2 h_2^2}{2} + \frac{Q^2}{g b_2 h_2} \quad (2.1)$$

Dans laquelle la répartition de la pression aux deux sections considérées "1" (en amont) et "2" (en aval) est supposée hydrostatique et les distributions de vitesse correspondantes sont uniformes. Notons que F_x désigne la force de pression exercée par les parois latérales dans l'axe x du canal. Évidemment, $F_x \sim (b_2 - b_1)$ et $F_x \sim h_a^2$ avec h_a et comme profondeur de

l'écoulement moyenne entre les sections "1" et "2". De la relation (2.1) il est raisonnable de supposer $h_a^2 = (h_1^2 + h_2^2) / 2$, donc $F_x = (b_2 - b_1).h_a^2 / 2$. Avec :

$$Y = h_2/h_1, \quad \beta = b_2/b_1, \quad F_1^2 = Q^2/(gb_1^2h_1^3) \quad (2.2)$$

L'équation (2.1) peut être écrite comme :

$$Fr_1^2 = \frac{(\beta+1)(Y^2-1)\beta Y}{4(\beta Y-1)} \quad (2.3)$$

Qui représente la relation des profondeurs conjuguées en fonction de nombre de Froude incident Fr_1 à la pointe du ressaut et du rapport des largeurs. Asymptotiquement, l'équation (2.3) peut être simplifiée pour:

$$Y = \sqrt{\frac{2}{\beta+1}} \left(\sqrt{2}Fr_1 - \frac{1}{2} \right) \quad (2.4)$$

Qui donne toujours des valeurs légèrement inférieures à celles de (2.3). Enfin l'équation de Belanger est directement trouvée en plaçant $\beta = 1$ dans l'équation (2.3) (canal prismatique) pour donner :

$$Fr_1^2 = \frac{Y(Y+1)}{2} \quad (2.5)$$

Ou asymptotiquement :

$$Y = \sqrt{2}Fr_1 - \frac{1}{2} \quad (2.6)$$

II.2.2. Vérification expérimentale

Les observations de Rubatta (1963), (1964), qui ont étudié expérimentalement les transitions des canaux avec des sections transversales rectangulaires linéairement variables, convergentes et divergentes, sont particulièrement intéressantes. Les données comprennent des angles $- 8^\circ < \nu < - 4^\circ$ (convergence) et $2^\circ < \nu < 24^\circ$ (divergence), décharge $16,5 < Q < 130$ (l/s), largeurs de canal d'entrée $0,2 < b_1 < 0,6$ (m) et des têtes d'énergie $0,25 \leq H_1 \leq 0,78$

(m). Au total 53 et 26 expériences dans des canaux divergents et convergents, respectivement, sont rapportées en détail. Ils ont été regroupés par un nombre caractéristique non dimensionnel $\zeta = Q / (v \sqrt{gH_1^5})$, qui a les valeurs 0,5 ; 1,0 et 2,0. Rubatta propose des relations empiriques pour les profondeurs conjuguées de l'écoulement, qui sont basées sur ses observations. Ici, les données seront reconsidérées pour tester l'équation (2.3); la figure (2.2) compare la formulation actuelle (signes ouverts) avec les données de Rubatta (signes pleins), et on note que les écarts sont extrêmement faibles (seulement des signes pleins). Sont également inclus les données de Khalifa et les résultats de McCorquodale (1979) obtenue pour des ressauts hydrauliques circulaires, et on peut noter que les écarts par rapport à l'équation (2.3) deviennent plus importants avec des valeurs importantes de β et Fr_1 . De l'équation (2.3) Y est indépendant de l'angle de divergence, v , mais dépend du rapport de largeur β . Cette tendance est observée en considérant la figure (2.2), qui est valable pour les petites valeurs de v .

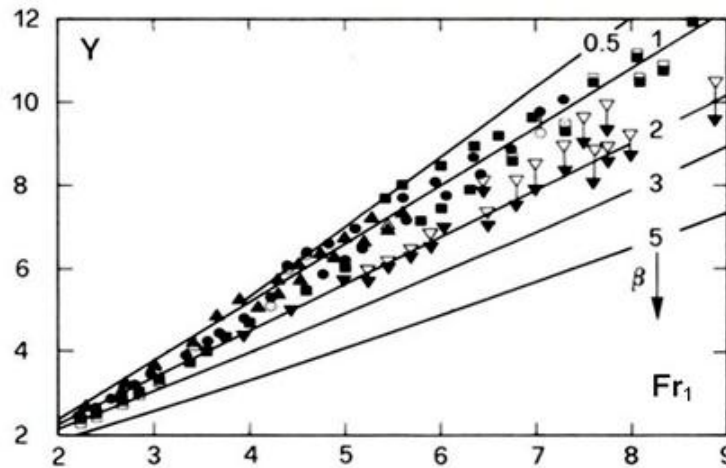


Figure 2.2 : Hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude $Fr_1 = Q / (gb_1^2 h_1^3)^{1/2}$ pour des canaux rectangulaires convergents ($\beta < 1$) et divergents ($\beta > 1$); comparaison entre l'équation (2.3) (points ouverts) et des essais de Rubatta (1963), (1964). (■) $\zeta = 0,5$; (●) $\zeta = 1,0$; (▲) $\zeta = 2,0$; et Khalifa et McCorquodale (1975) pour $1,2 < \beta < 1,85$ (▼).

En supposant un profil d'écoulement linéaire entre les sections "1" et "2", la pression moyenne sur les parois latérales, $F_x = (b_2 - b_1) (h_1^2 + h_1 h_2 + h_2^2) / 3$, est toujours inférieure à celle introduite ci-dessus, $h_2 > h_1$.

Par conséquent, la présente prédiction se situe entre celles connues, mais fournit une expression simple pour le rapport de profondeur conjuguées de l'écoulement.

II.2.3. Perte d'énergie relative

La perte d'énergie due à un ressaut hydraulique peut être trouvée en appliquant l'équation d'énergie unidimensionnelle entre les sections «1» et «2»:

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gb_1^2h_1^2} = h_2 + \frac{Q^2}{2gb_2^2h_2^2} + \Delta H \quad (2.7)$$

Ou, en combinant les deux équations de (2.7) :

$$\Delta H/H_1 = 1 - \left[Y + \frac{Fr_1^2}{2\beta^2 Y^2} \right] / \left[1 + \frac{Fr_1^2}{2} \right] \quad (2.8)$$

Qui rapporte $\Delta H/H_1$ et Y , Fr_1 , β . En supprimant $Y = Y(\beta, Fr_1)$ avec la relation (2.3), le résultat peut être exprimé par $\Delta H/H_1(Fr_1, \beta)$, qui est tracé dans la figure (2.3). On voit que, pour Fr_1 donné, $\Delta H/H_1$ augmente significativement avec l'augmentation de β . Ceci présente un intérêt particulier en termes de conception, car une énergie cinétique considérable peut être dissipée avec un nombre de Froude relativement faible.

Le rendement des ressauts hydrauliques dans les sections de canaux ouverts graduellement élargis peut être analysé plus loin en considérant la relation asymptotique (2.4). L'élimination de Y dans (2.8) conduit à:

$$\frac{\Delta H}{H_1} = \left(1 - \sqrt{\frac{2}{1+\beta} \frac{\sqrt{2}}{Fr_1}} \right)^2 \quad (2.9)$$

Dans lequel le même ordre d'approximations a été pris en compte. Comparé aux ressauts hydrauliques dans les canaux prismatiques ($\beta = 1$), on voit encore que $\Delta H/H_1 > (<) \Delta H/H_1$ ($\beta = 1$) pour $\beta > (<) 1$, pourvu que Fr_1 soit fixe.

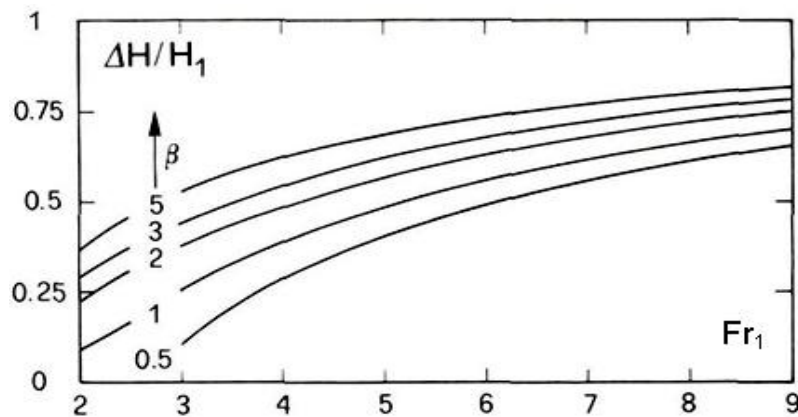


Figure 2.3 : Perte de charge relative $\Delta H/H_1$ en fonction du nombre de Froude $Fr_1 = Q/(gb_1^2h_1^3)^{1/2}$ et le rapport des largeurs pour des élargissements graduels ($\beta > 1$), des canaux prismatiques ($\beta = 1$) et des contractions graduels ($\beta < 1$).

II.2.4. Longueurs caractéristiques du ressaut

En ce qui concerne les caractéristiques de longueur d'un ressaut hydraulique, il faut distinguer la longueur du rouleau L_r et la longueur du ressaut L_j . Les deux longueurs sont mesurées à partir du pied de ressaut hydraulique; l'extrémité du rouleau est où la vitesse d'écoulement moyenne à la surface disparaît, tandis que l'extrémité du ressaut est où les ondulations de surface sont amorties Rajaratnam et Subramanya (1968). De toute évidence, les deux sections limitatives en aval sont sujettes à un jugement personnel; une définition correcte de l'extrémité aval de la longueur de ressaut n'existe pas.

En considérant les données de Koloseus et Ahmad (1969), on ne sait pas si L_r ou L_j ont été mesurées. Leur rapport L_r/h_2 a une valeur d'environ $4 (\pm 0,5)$, mais les profondeurs d'entrée sont extrêmement faibles, $0,002 < h_1 < 0,005$ m.

Arbhabhirama et Abella (1971) confirment avec leurs observations la relation habituelle $L_j/h_2(Fr_1)$ donnée ci-dessous. La diffusion est remarquable ($\pm 20\%$), mais aucune autre corrélation n'a pu être trouvée, comme l'indiquent les auteurs.

Les résultats de Khalifa et de McCorquodale concernant la longueur du ressaut sont semblables à ceux de (1969). On ne sait pas encore si L_r ou L_j ont été mesurés; de plus, on note à partir de leurs données que $L_j/h_2 = 3$ pour $\beta = 1,3$, qui est proche de $\beta = 1$, pour laquelle $L_j/h_2 = 6$.

Les seules données convaincantes concernant la longueur du ressaut ont été publiées par Rubatta. Un graphique pour L_j/h_2 en termes de Fr_1 est présenté dans la figure (2.4). Notons que le rapport de largeur β n'a pas d'effet évident sur la longueur de ressaut relative, mais que les résultats pour $\beta = 1$ sont du même ordre de grandeur que pour $\beta = 1$.

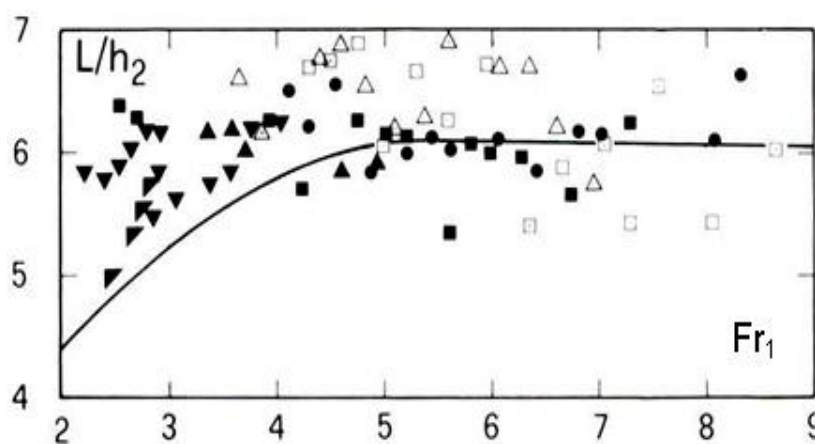


Figure 2.4 : Longueur du ressaut L_j/h_2 en canaux divergents ($\beta > 1$, signes pleins), convergents ($\beta < 1$, signes ouverts) et prismatique ($\beta = 1$, Peterka 1983) d'après Rubatta 1963, 1964; (\bullet) 2° , (\blacksquare) 4° , (\blacktriangle) 8° , (\blacktriangledown) 16° , (\blacktriangleright) 24° .

II.3. Canal rectangulaire brusquement élargi

II.3.1. Équations de l'écoulement

Un cas particulier de variation de largeur de canal linéaire se produit pour des élargissements brusques de 90 °; ici la largeur en amont sera notée b , tandis que la largeur en aval est B , voir (figure 2.5). En raison de la séparation, l'angle d'agrandissement $\omega = \omega(Fr_1, x)$ d'écoulement ne correspond pas à l'angle divergent du canal.

Les mesures de Rajaratnam et Subramanya (1968) indiquent que ω peut être considéré comme presque indépendant de la coordonnée longitudinale x , mais ne dépend que de nombre de Froude de l'écoulement incident Fr_1 . Les résultats sont reportés sur la figure (2.6) et corrélés favorablement avec la formule de Herbrand (1971).

$$\tan \omega = \frac{2L_0/b}{\beta-1} = 2Fr_1/3 \quad (2.10)$$

Évidemment, les écoulements seront séparés des parois latérales du canal chaque fois que $v > \tan \omega$, et ce cas sera traité ultérieurement. Les agrandissements graduels, en revanche, correspondent à l'autre possibilité.

Les profondeurs d'écoulement successives dans un agrandissement brusque peuvent être calculées à nouveau en appliquant le théorème de moment longitudinal. En supposant une pression hydrostatique et des distributions de vitesse uniformes aux sections amont et aval "1" et "2", le résultat est:

$$\frac{bh_1^2}{2} + \frac{Q^2}{gbh_1} + F_x = \frac{Bh_2^2}{2} + \frac{Q^2}{gBh_2} \quad (2.11)$$

Dans laquelle F_x est la force de pression relative sur les parois latérales de longueur $(B - b)$. Il peut être démontré expérimentalement que, pour des conditions d'écoulement données en amont et en aval, la configuration d'écoulement est invariante pour le cas tracé sur la figure (2.5) et lorsque le liquide dans la zone de séparation est enlevé par pompage. Par conséquent, la condition minimale est $F_x = 0$ (car aucune pression négative ne peut apparaître). En utilisant de nouveau les rapports (2.2), dans lesquels $\beta = B/b$ pour le cas présent, l'équation (2.11) devient:

$$Fr_1^2 = \frac{\beta Y(\beta Y^2 - 1)}{2(\beta Y - 1)} \quad (2.12)$$

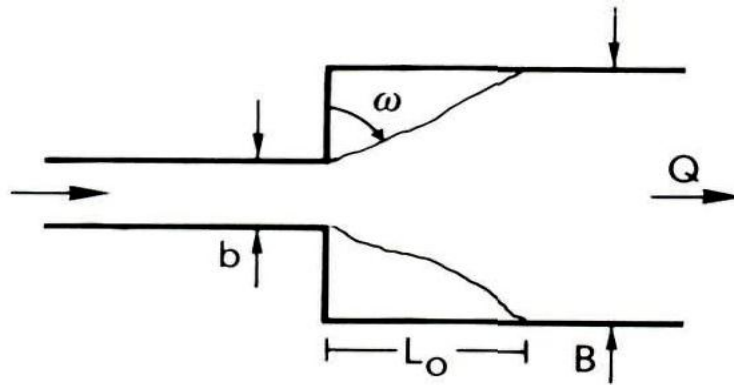


Figure 2.5 : Vue schématique de l'élargissement brusque des canaux avec b et B comme largeurs de canaux en amont et en aval; ω désigne l'angle d'élargissement moyen de la zone d'écoulement, et L_0 correspond à la longueur de la zone de séparation.

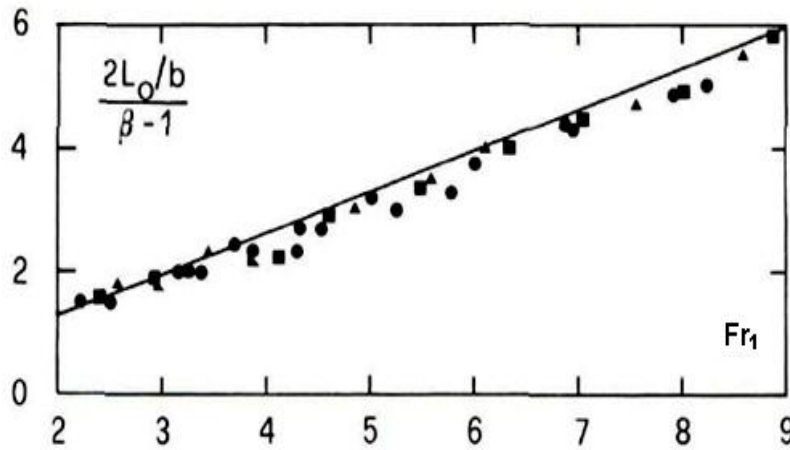


Figure 2.6 : Tangente de l'angle de divergence, $\tan \omega = 2L_0 / [b (\beta - 1)]$ en fonction du nombre de Froude amont Fr_1 d'après Rajaratnam et al. (1968). (\blacktriangle) $\beta = 3/2$, (\blacksquare) $\beta = 2$, (\bullet), $\beta = 3$, (\blacksquare) $\beta = 6$. (—) courbe d'après la relation (2.10).

Ceci est tracé sur la figure (2.7) et comparé à des observations de Herbrand (1971) et Rajaratnam et Subramanya (1968). On peut observer que les données d'Herbrand sont toujours légèrement supérieures à celles de Rajaratnam et al. Sont inférieures aux prédictions selon l'équation (2.12). Cela peut être expliqué en se référant aux positions de ressaut examinées par les deux études. Herbrand enquête sur les ressauts situant juste dans la zone de transition, $x \approx 0$, tandis que Rajaratnam et Subramanya considèrent des ressauts en aval de l'élargissement brusque, $x > L_0$, où $x = 0$ désigne la section de transition. Les données se

réfèrent donc aux deux conditions de débit limite, à savoir un ressaut hydraulique dans des canaux prismatiques de largeurs b et B . L'équation (2.12) peut être considérée comme une relation moyenne, ce qui explique un ressaut hydraulique dans la zone de transition. L'équation (2.12) peut être encore simplifiée en considérant des expansions asymptotiques pour $Y \rightarrow \infty$, le résultat étant :

$$Y = \frac{1}{\sqrt{\beta}} \left(\sqrt{2} Fr_1 - \frac{1}{2} \right) \tag{2.13}$$

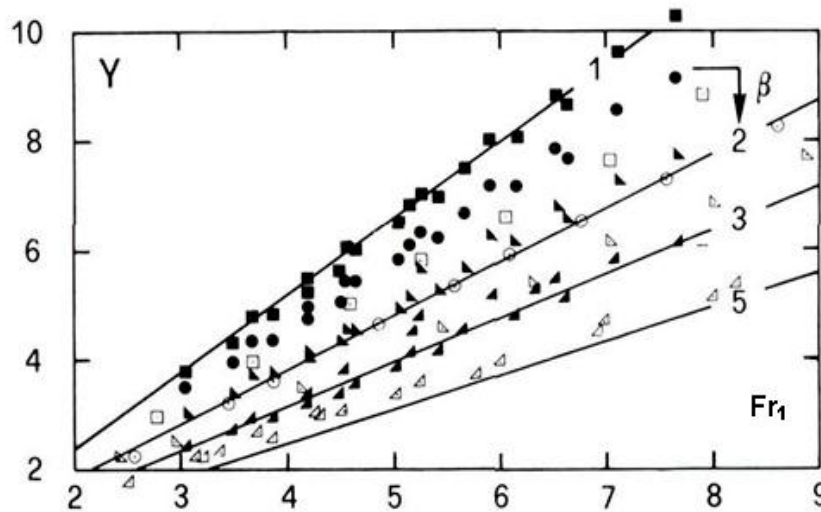


Figure 2.7 : Hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude amont $Fr_1 = Q/(gb^2h_1^3)^{1/2}$, et le rapport des largeurs $\beta = B/b$ pour des canaux rectangulaires brusquement élargi: observations de Herbrand (1971) (■) $\beta = 1$; (●) $\beta = 1,4$; (▲) $\beta = 2$; (▲) $\beta = 3,5$; de Rajaratnam et Subramanya (1968) (□) $\beta = 1,2$; (○) $\beta = 1,5$; (▤) $\beta = 2$; (△) $\beta = 3$. (—) courbes d'après la relation (2.12).

II.3.2. Perte d'énergie relative

L'efficacité énergétique d'un ressaut hydraulique en élargissement brusque peut être calculée en appliquant les équations (2.9) et (2.12), dans lesquelles $\beta = B/b$. L'analogue de la figure (2.3) est présenté à la figure (2.8), et l'on observe que les élargissements brusques possèdent une dissipation d'énergie relative sensiblement plus élevée pour Fr_1 et β égaux, chaque fois que $\beta > 1$. Considérons par exemple le cas $Fr_1 = 4$, $\beta = 2$, pour lequel $\Delta H/H_1 = 0,48$ de la figure (2.3) et $\Delta H/H_1 = 0,62$ de la figure (2.8); la dissipation d'énergie relative, par conséquent, est augmentée de 30%. En outre, il faut se rappeler que l'effet de β sur $\Delta H/H_1$ apparaît pour tous $Fr_1 > 1$, tandis que pour les bassins dissipations dans les canaux prismatiques ayant des pentes positives et négatives, il est limité au faible nombre de Froude $1 < Fr_1 < 4$. Par conséquent, les deux types de bassins de dissipation non prismatiques, et en

particulier la version brusquement élargie, sont de puissants dissipateurs d'énergie. En éliminant Yen (2.5) par la relation (2.13), l'équation asymptotique pour la dissipation d'énergie relative devient :

$$\frac{\Delta H}{H_1} = \left(1 - \frac{1}{\sqrt{\beta}} \frac{\sqrt{2}}{Fr_1}\right)^2 \quad (2.14)$$

En comparant ceci avec (2.9) et le cas où $\beta = 1$ on observe que, pour un nombre de Froude égal Fr_1 l'efficacité du ressaut hydraulique est la plus élevée pour les élargissements brusques, suivis d'élargissements graduels et enfin, le ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires prismatiques a une dissipation d'énergie minimale, pourvu que $\beta \geq 1$.

Évidemment, l'efficacité du bassin de dissipation disparaît chaque fois que la transition entre les états d'écoulement super- et sous-critique n'apparaît pas. Il a été démontré expérimentalement par Herbrand (1971), que les bassins de dissipation étudiés souffrent du fait que de petites variations en aval de h peuvent modifier de manière significative la configuration d'écoulement. Un résultat possible est le soufflage du ressaut hydraulique, conduisant ainsi à des conditions d'écoulement supercritiques sur une portée étendue du canal aval. Ce phénomène dangereux ne peut être évité qu'en prévoyant des dispositions supplémentaires dans le bassin de dissipation, telles que des seuils, des marches ou des blocs de déflecteur.

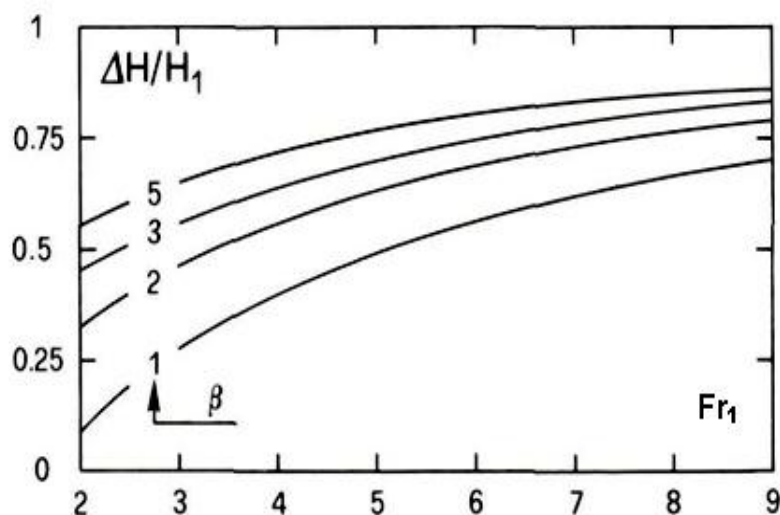


Figure 2.8: Perte de charge relative $\Delta H/H_1$, dans des dissipateurs horizontaux et rectangulaires avec des élargissements brusque $\beta = B/b$ en fonction de divers nombres de Froude Fr_1

II.3.3. Longueurs caractéristiques du ressaut

Comme la description complète de la structure de l'écoulement interne est impossible, la longueur du rouleau L_r et la longueur du ressaut L_j doivent être déterminées expérimentalement. Cependant, les résultats sont à nouveau caractérisés par une dispersion significative des données. Les seules données disponibles pour les ressauts hydrauliques dans les canaux rectangulaires avec élargissement brusque sont celles de Rajaratnam et Subramanya (1968). La figure (2.9) représente un tracé des grandeurs non dimensionnelles L_r/h_2 et L_j/h_2 dans les plages $1,2 \leq \beta \leq 6$ et $2 \leq Fr_1 \leq 9$. On note que les données relatives à la longueur du rouleau suivent celles des canaux prismatiques, $\beta = 1$ Peterka (1983), et que la diffusion est d'environ $\pm 0,5$ de la courbe moyenne $L_r/h_2 (Fr_1)$; par contre la diffusion devient significative en ce qui concerne la longueur du ressaut, pour laquelle $L_j/h_2 \approx 8 (\pm 2)$. Notons que les effets de β et de Fr_1 sur L_r/h_2 et L_j/h_2 ne sont pas détectables.

Une comparaison des résultats ci-dessus avec la figure (2.4) indique que L_r/h_2 et L_j/h_2 sont presque invariants pourvu que β soit de l'ordre de l'unité. Pour $Fr_1 > 3$, les estimations approximatives sont $L_r/h_2 \approx 3,5$ et $L_j/h_2 \approx 6$. Ces observations sont étayées par les résultats de Peterka (1983).

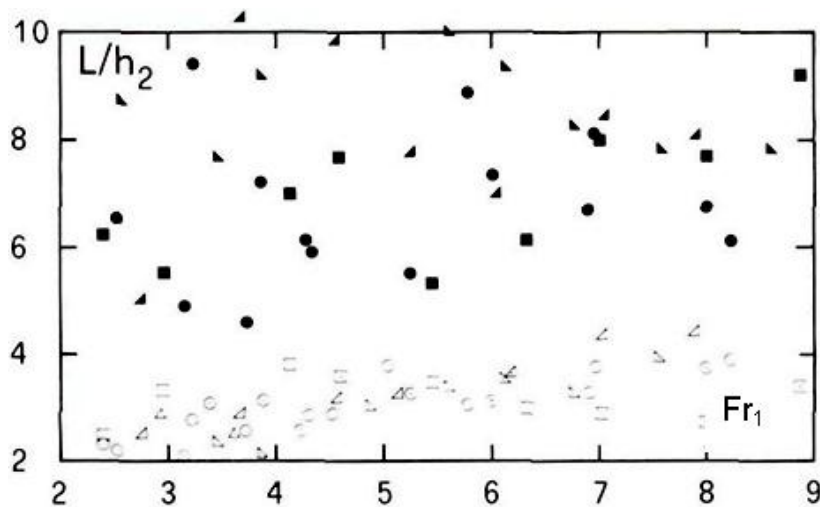


Figure 2.9 : Caractéristiques de longueurs des ressauts hydrauliques dans des canaux rectangulaires et horizontaux avec un élargissement brusque; mesures de Rajaratnam et Subramanya (1968) pour : a) longueur relative du rouleau L_r/h_2 , (signes ouverts), et b) longueur relative du ressaut L_j/h_2 , (signes pleins) avec (\blacktriangle) $\beta = 1,2$; (\blacktriangleright) $\beta = 1,5$; (\blacksquare) $\beta = 2$; (\bullet) $\beta = 3$; (\blacktriangle) $\beta = 6$.

II.3.4. Volume du ressaut hydraulique

Limitant les considérations des nombres de Froude à l'entrée pour $Fr_1 > 3$ et en choisissant $L_j/h_2 \approx 6$ comme indiqué ci-dessus, le volume d'un ressaut hydraulique V_j peut être exprimé par la relation (2.15) suivante:

$$V_j = h_a B L_j \quad (2.15)$$

Dans lequel h_a désigne la profondeur moyenne du ressaut. Comme le profil d'écoulement longitudinal a une forme proche de la parabole, on obtient:

$$h_a = h_1 + \frac{2}{3}(h_2 - h_1) \quad (2.16)$$

En insérant ceci dans (2.15), le volume de ressaut non dimensionnel devient:

$$V_j/(bh_1^2) = \left[1 + \frac{2}{3}(Y - 1)\right] \beta Y \cdot L_j/h_2 \quad (2.17)$$

Ou, en exprimant Y en fonction de Fr_1 selon (2.13) et portant approximations dans le même ordre:

$$V_j/(bh_1^2) = 8Fr_1^2 \quad (2.18)$$

Ceci est indépendant du rapport de largeur β et permet une estimation préliminaire du volume de ressaut. Il est intéressant de noter que Khalifa et McCorquodale (1975) arrivent à la même conclusion en comparant les volumes des ressauts hydrauliques dans les canaux rectangulaires prismatiques et graduellement divergents.

II.4. Canal trapézoïdal graduellement élargi (Approche d'Omid, Esmaelivaraki et Narayanan 2007)

On présente ici une étude sur le ressaut hydraulique formé dans un bassin d'amortissement s'étendant graduellement avec une section transversale trapézoïdale. L'expansion du bassin est due à l'augmentation de la largeur de lit dans la direction du courant. Les angles étudiés pour cette expansion vont de 3° à 9° . Des expériences ont été également menées pour étudier ces ressauts hydrauliques avec trois pentes de talus différentes. Les nombres de Froude considérés sont de 3 à 10. Pour une pente de talus donnée,

le ressaut dans le bassin d'amortissement reste stable avec l'augmentation de l'angle d'expansion, en particulier aux grands nombres de Froude. L'élargissement du bassin pour une pente du talus donnée entraîne des réductions de la profondeur résultante et de la longueur du ressaut, et une augmentation de la perte d'énergie par rapport à ceux observés dans des canaux de sections transversales rectangulaires ou trapézoïdales invariables.

On a également constaté qu'une diminution de la pente des parois latérales pour un angle donné de l'expansion du bassin conduit à une plus petite profondeur résultante et de plus grande longueur de ressaut et de perte d'énergie que dans les canaux avec le même angle de divergence, mais avec des murs latéraux verticaux.

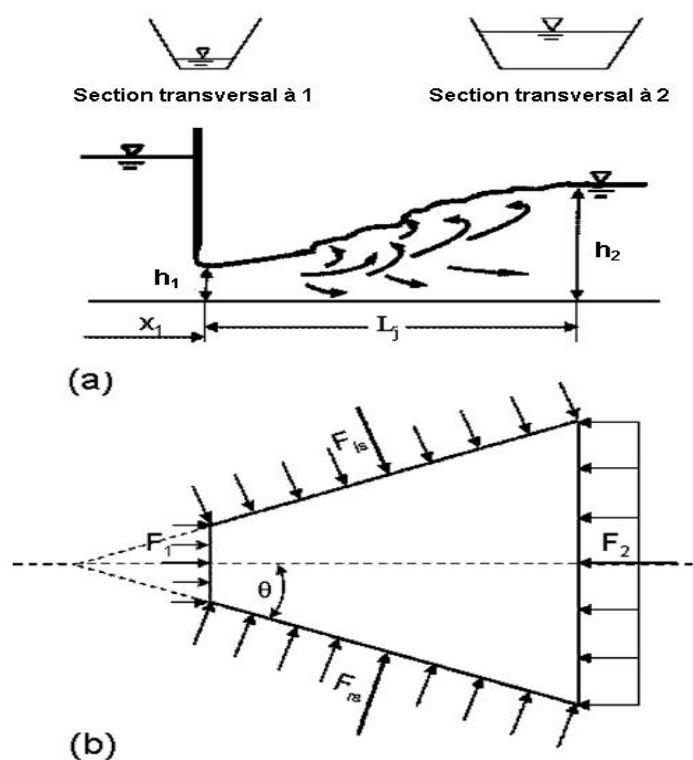


Figure 2.10 : Esquisse de définition du ressaut hydraulique dans le canal en expansion. (a) Ressaut hydraulique en coupe transversale. (b) forces de pression agissant sur la périphérie du volume de commande.

II.4.1. Principe de dynamique unidimensionnelle

Le débit considéré dans la présente étude est le ressaut hydraulique d'un écoulement régulier s'effectuant dans un canal en élargissement avec des parois latérales inclinées, comme représenté sur la figure (2.10). Les hypothèses suivantes sont faites dans l'analyse: les lignes de courant sont radiales et la pression partout est hydrostatique. Dans les ressauts

hydrauliques, les forces de frottement résultant des limites solides et les effets de l'entraînement d'air sont petits et habituellement négligés.

On suppose également que la surface du ressaut s'approche d'une forme elliptique. Pour le volume de contrôle entourant le ressaut, comme illustré dans la figure (2.10.b), la force nette agissant le long de l'axe du canal est:

$$\sum F_x = F_{1x} - F_{2x} + F_{sx} = \rho Q(V_2 - V_1)_x \quad (2.19)$$

Où F_x est la composante x nette de la force de pression hydrostatique, F_{sx} est la force de pression des côtés dans la direction x, Q est la décharge, ρ est la densité de l'eau, V est la vitesse moyenne en profondeur dans la direction x, et les indices 1 et 2 se réfèrent respectivement aux extrémités amont et aval du ressaut.

Le second indice x désigne la direction le long de l'axe du canal. Les forces de pression hydrostatique sont calculées comme suit:

$$F_{1x} = \delta \bar{h}_1 A_1 = \frac{1}{2} \delta \left(b_1 h_1^2 + \frac{2}{3} m h_1^3 \right) \quad (2.20)$$

$$F_{2x} = \delta \bar{h}_2 A_2 = \frac{1}{2} \delta \left(b_2 h_2^2 + \frac{2}{3} m h_2^3 \right) \quad (2.21)$$

Dans laquelle δ est le poids spécifique de l'eau, h est la profondeur de l'eau, b est la largeur du lit, A est l'aire d'écoulement, m est la pente latérale, $\bar{h} = Kh$ est la position du centre de pression sur la surface de l'eau où $K = \frac{1}{3} + \frac{b}{6W}$, et W est la largeur équivalente ($b + mh$).

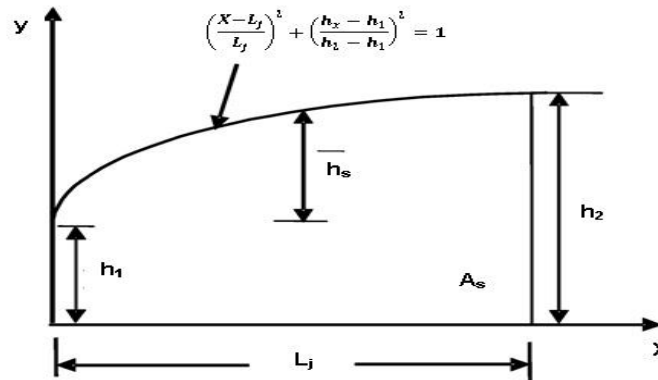


Figure 2.11 : Esquisse de définition du profil de surface du ressaut.

La force totale agissant sur les côtés du ressaut $F_s = F_{rs} + F_{ls}$

Où:

$$F_{rs} = F_{ls} = \gamma \bar{h}_s \frac{A_s}{\sin(\cotg^{-1}m)} \quad (2.22)$$

Dans laquelle A_s est la section longitudinale du ressaut et \bar{h}_s est le centroïde de cette section à partir de la surface de l'eau comme montrée à la figure (2.11).

Les indices rs et ls se réfèrent à la droite et à la gauche du ressaut. Le profil de la surface de l'eau est supposé quart-elliptique avec le demi-axe principal horizontal égal à la longueur du ressaut à l'axe L_j et le demi-axe vertical égal à la différence entre les deux hauteurs conjuguées ($h_2 - h_1$). L'équation du profil de surface est:

$$\left(\frac{x-L_j}{L_j}\right)^2 + \left(\frac{h_x-h_1}{h_2-h_1}\right)^2 = 1 \quad (2.23)$$

Où h_x est utilisé pour désigner la profondeur au point x dans le ressaut. Le centroïde du profil de surface de ressaut figure (2.11) aux parois latérales, \bar{h}_s , est:

$$\bar{h}_s = \frac{L_{js} \left[\frac{h_2^2}{3} + 0.048h_1^2 + 0.118h_1h_2 \right]}{A_s} \quad (2.24)$$

Où $A_s = L_{js} [\pi/4 \cdot (h_2 - h_1) + h_1]$, et L_{js} est la longueur du ressaut aux côtés = $L_j/\cos\theta$. La force de pression latérale est alors:

$$F_{rs} = F_{ls} = F_s = \frac{\delta L_{js} \left[\frac{h_2^2}{3} + 0.048h_1^2 + 0.118h_1h_2 \right]}{\sin(\cotg^{-1}m)} \quad (2.25)$$

L'amplitude de la force totale F_{sx} agissant sur les côtés du ressaut dans la direction de x est:

$$F_{sx} = F_{ls}\sin\theta + F_{rs}\sin\theta = 2F_s\sin\theta \quad (2.26)$$

Où θ est l'angle des parois latérales à partir de l'axe des x au niveau de l'axe central comme montré sur la (figure 2.10.b). Donc,

$$F_{sx} = \frac{2\delta L_{js} \left[\frac{h_2^2}{3} + 0.048h_1^2 + 0.118h_1h_2 \right]}{\sin(\cotg^{-1}m)} \sin \theta \quad (2.27)$$

En remplaçant les équations (2.20), (2.21) et (2.27) dans l'équation (2.19), on obtient:

$$\left(b_1 h_1^2 + \frac{2}{3} m h_1^3 \right) + \frac{Q^2}{gA_1} + \frac{4L_{js} \left(\frac{h_2^2}{3} + 0.048h_1^2 + 0.118h_1h_2 \right) \sin \theta}{\sin(\cotg^{-1}m)} = \left(b_2 h_2^2 + \frac{2}{3} m h_2^3 \right) + \frac{Q^2}{gA_2} \quad (2.28)$$

Notant que l'approche du nombre de Froude incident et la profondeur conjuguée amont peuvent être définis comme suit : $Fr_1^2 = \frac{Q^2 T}{A^3 g}$, $T_1 = b + 2mh_1$, et $D = (A/T)$, où g est l'accélération de la gravité, après quelques manipulations l'équation suivante est obtenue:

$$\frac{h_2}{h_1} = \left[Fr_1^2 \frac{D_1}{h_1} \left(1 - \frac{A_1}{A_2} \right) + K_1 \right] \frac{A_1}{A_2 K_2} + \frac{2L_{js} \left(\frac{h_2^2}{3} + 0.048h_1^2 + 0.118h_1h_2 \right) \sin \theta}{A_2 K_2 h_1 \sin(\cotg^{-1}m)} \quad (2.29)$$

L'équation (2.29) est l'équation générale du rapport de profondeur conjuguée du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal graduellement élargi.

La perte d'énergie dans le ressaut hydraulique divergent est calculée à partir des équations d'énergie et de continuité:

$$\Delta H = H_L = H_1 - H_2 = \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \right) - \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \right) \quad (2.30)$$

$$H_L = h_1 - h_2 + \frac{Fr_1^2 D_1}{2} \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right] \quad (2.31)$$

Où H est l'énergie totale et H_L est la perte d'énergie dans le ressaut hydraulique. La perte d'énergie relative, R_L , est alors:

$$R_L = \frac{h_1 - h_2 + \frac{Fr_1^2 D_1}{2} \left[1 - \left(\frac{A_1}{A_2} \right)^2 \right]}{h_1 + \frac{Fr_1^2 D_1}{2}} \quad (2.32)$$

II.4.2. Dispositif expérimentale

Le dispositif expérimental est représenté sur la figure (2.12). Les expériences ont été réalisées dans un canal horizontal avec des talus en verre et un fond lisse avec une section rectangulaire de 0,50 m de largeur et 9 m de long. À l'extrémité amont du canal, l'auteur a placé un réservoir d'alimentation équipé d'un déversoir rectangulaire à crête pointue et d'une ouverture submersible réglable pour obtenir différents profondeurs et nombres de Froude incident.

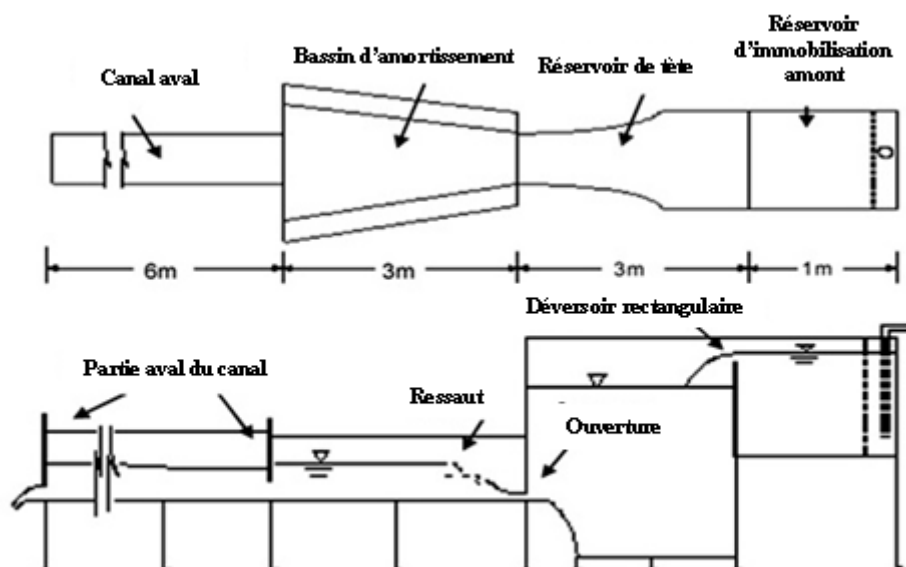


Figure 2.12 : Appareil expérimental pour le ressaut hydraulique graduellement élargi.

Tableau 2.1 : Conditions expérimentales

Variables	Gamme
Profondeur amont, h_1	19 - 23 mm
Profondeur aval, h_2	69 - 26 mm
Nombre de Froude incident, Fr_1	2.99 - 9.83
Longueur du ressaut, L_j	150 - 1700 mm
Débit, Q	15,9 - 44,9 l/s
Pente latérale, m	0,5 : 1 ; 1 : 1 ; 1,5 : 1
Angle de divergence, θ	3, 5, 7, 9°

À l'extrémité aval du canal, une ouverture réglable était utilisée pour ajuster la profondeur de l'eau. Les parois latérales ont été conçues de telle sorte qu'une gamme de pentes latérales et d'angles de divergence du canal ont été atteints. Un débit constant a été fourni par un réservoir à une crête constante. La profondeur de l'écoulement a été mesurée à l'aide d'une jauge ponctuelle avec une précision de lecture de $\pm 0,1$ mm.

Pour une pente de paroi latérale donnée, un débit et un angle de divergence, l'ouverture a d'abord été ajustée pour établir un ressaut hydraulique au début du bassin. Les profondeurs d'écoulement ont été mesurées le long du ressaut en plusieurs points depuis le début du ressaut jusqu'au point où la profondeur était presque uniforme et les ondulations de la surface de l'eau avaient pratiquement disparu. Au total 114 séries d'essais ont été effectuées. Les conditions expérimentales sont énumérées dans le tableau (2.1).

Le nombre de Reynolds basé sur la profondeur d'écoulement en amont est supérieur à 2×10^5 pour toutes les expériences. À ces nombres de Reynolds la turbulence dans le ressaut hydraulique est très développée et donc les flux expérimentaux sont considérés comme Reynolds nombre indépendant. Certains effets d'échelle sont probablement dus au frottement le long du lit du canal. Mais, ils sont d'importance secondaire et sont négligés.

On a observé que les ressauts hydrauliques étaient stables dans le sens où la position moyenne du pied en amont était stationnaire avec une tendance à faire un front diagonal. Ces caractéristiques ont été observées par Wanoschek et Hager (1989) dans leurs études sur les ressauts hydrauliques dans les canaux trapézoïdaux. Le ressaut hydraulique dans le canal trapézoïdal de section transversale élargi est réellement plus stable.

II.4.3. Résultats expérimentaux

Les profils de surface de l'eau en termes de profondeur h_x le long du ressaut sont représentés sur la figure (2.13) sous forme adimensionnelle comme $(h_x - h_1)/(h_2 - h_1)$ en fonction de x/L_j pour toutes les expériences. Dans cette figure, le profil de surface elliptique tel que donné par l'équation (2.23) est également représenté pour comparaison y compris le profil linéaire de Koloseus et Ahmad (1969). Comme est indiqué sur la figure (2.13), l'équation parabolique s'accorde assez bien avec les profils expérimentaux de la surface d'eau du ressaut dans le canal trapézoïdal élargi pour différents angles de divergence, θ , pente des parois latérales, m , et de nombre de Froude incident Fr_1 .

La validité des équations (2.29) et (2.32) pour le rapport des profondeurs conjuguées et la perte d'énergie relative est évaluée au moyen du rapport des valeurs calculées et observées de la profondeur conjuguée et de la perte d'énergie relative. En utilisant les indices «exp» et «th» pour décrire respectivement les résultats expérimentaux et théoriques, les rapports (h_{2exp}/h_{2th}) et (R_{Lexp}/R_{Lth}) sont représentés sur les figures (2.14) et (2.15) en fonctions de Froude pour toutes les expériences.

Les figures (2.14) et (2.15) montrent une concordance raisonnable entre les résultats calculés et les résultats empiriques. Il est intéressant de noter que dans la figure (2.15) la

dispersion des points est moins prononcée à des nombres de Froude plus importants auxquels le ressaut devient beaucoup plus stable.

La figure (2.16) et (2.17) montrent respectivement les résultats expérimentaux des rapports des profondeurs conjuguées h_2/h_1 et la perte d'énergie relative R_L comme fonctions du nombre de Froude d'approche Fr_1 pour un angle de divergence de 5° avec différentes pentes latérales. L'équation (2.29) de la figure (2.16) et l'équation (2.32) sur la figure (2.17) sont représentées sous forme de traits pleins. La figure (2.18) montre la relation entre la longueur relative du ressaut L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude incident pour un angle de divergence de 5° avec des pentes latérales différentes.

Le comportement des ressauts voir les figures (2.16) (2.18) et (2.18) peut être résumée comme suit: lorsque la pente latérale diminue, le rapport de profondeur conjuguée (h_2/h_1) diminue et la perte d'énergie relative R_L augmente. La longueur relative du ressaut L_j/h_1 pour les sections trapézoïdales est observée pour être plus grande que celle dans un canal rectangulaire pour le même nombre de Froude; et augmente avec la diminution de la pente latérale.

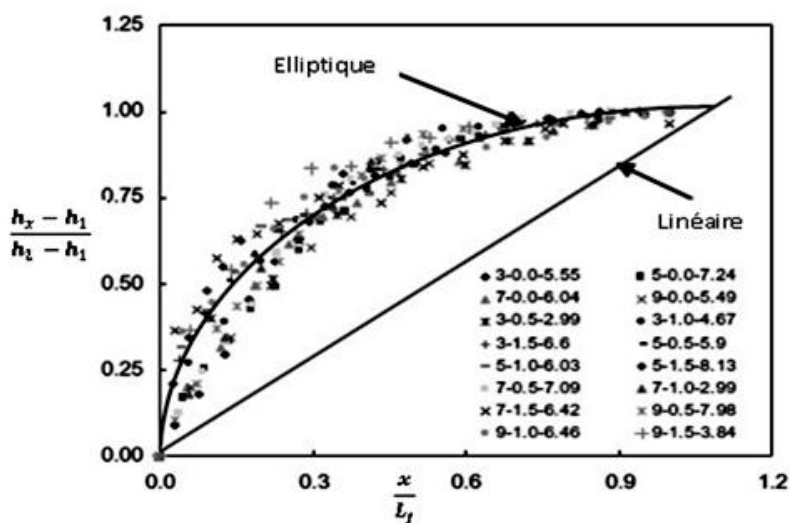


Figure 2.13 : Profils de surface d'eau non dimensionnels supposés et expérimentaux pour différents angles de divergence (θ), pente latérale et nombre de Froude incident.

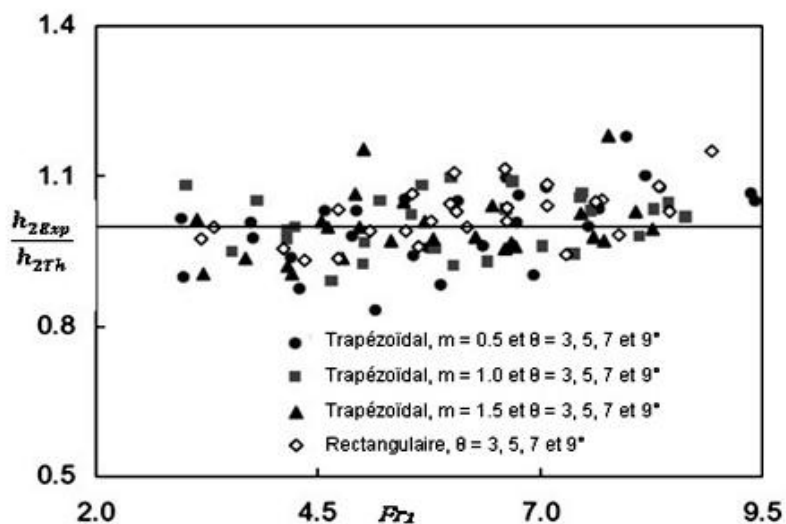


Figure 2.14: Rapport des profondeurs conjuguées expérimentale et théorique en fonction du nombre de Froude incident pour différents angles de divergence (θ) et pentes latérales (m).

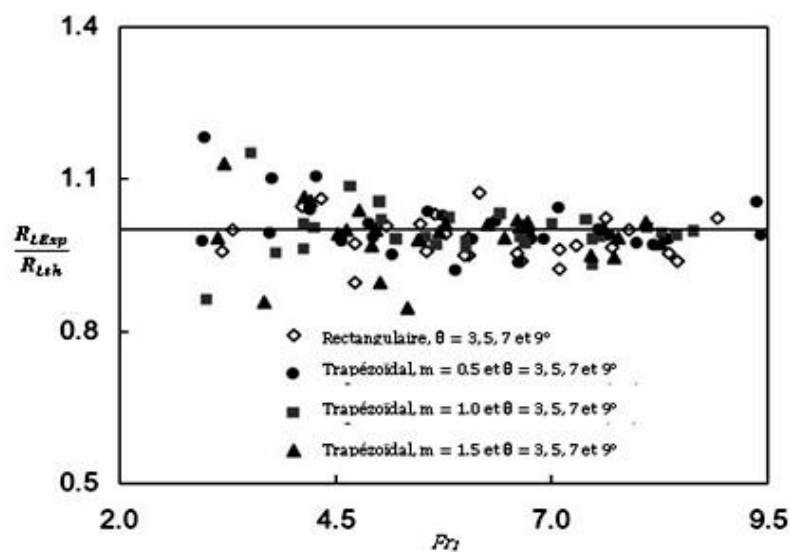


Figure 2.15: Rapport de la perte d'énergie relative expérimentale et théorique en fonction du nombre de Froude pour différents angles de divergence (θ) et la pente latérale (m).

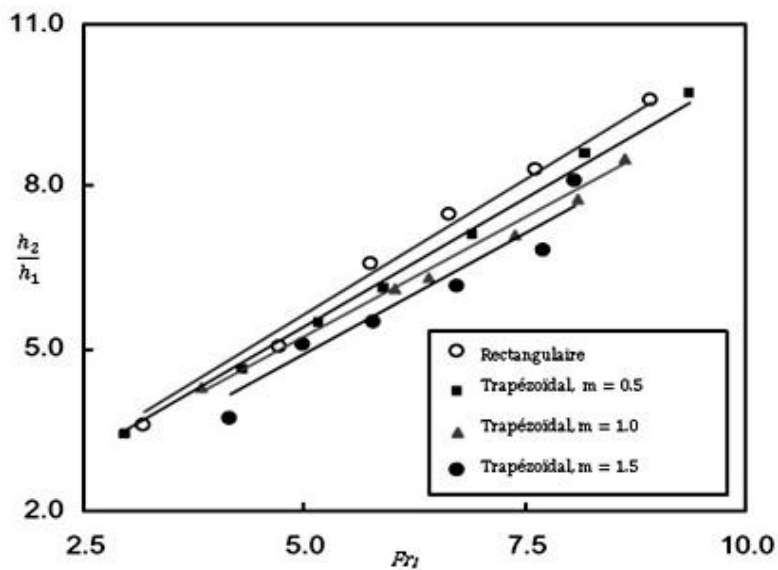


Figure 2.16: Rapport des profondeurs conjuguées en fonction du nombre de Froude pour un angle de divergence de 5°, où les lignes pleines sont calculées avec équation (2.29).

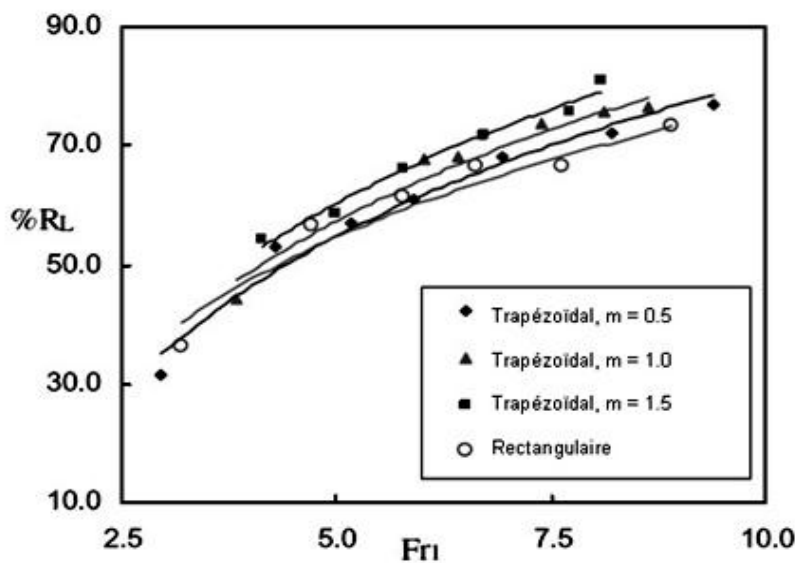


Figure 2.17: Perte d'énergie relative par rapport au nombre de Froude pour un angle de divergence de 5°, où les lignes pleines sont calculées avec équation (2.32).

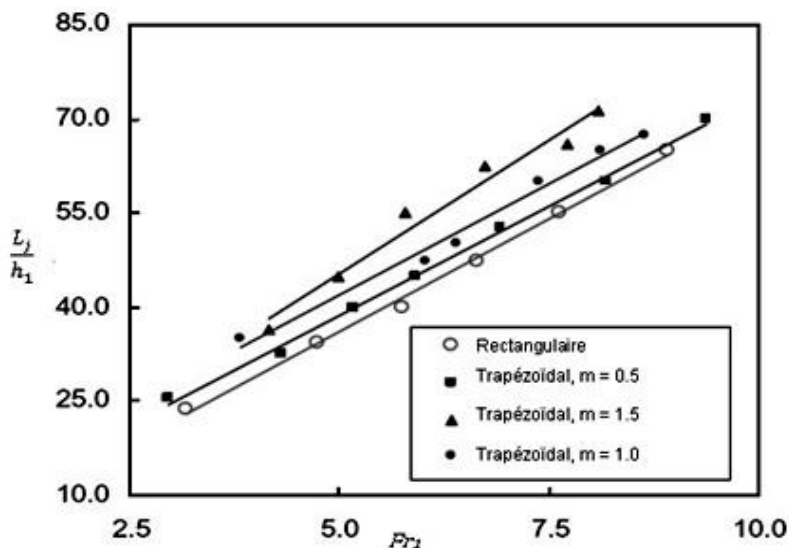


Figure 2.18: Longueur non-dimensionnelle du ressaut par rapport au nombre de Froude avec angle de divergence de 5°.

La figure (2.19) et (2.20) montrent respectivement les résultats expérimentaux du rapport des hauteurs conjuguées et la perte d'énergie relative pour un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire graduellement élargi avec des angles de divergence différents en fonctions du nombre de Froude. Les figures (2.19) et (2.20) incluent les résultats de l'étude théorique telle que donnée par les équations (2.29) et (2.32). Comme représenté sur ces figures, des parois latérales divergentes provoquent une réduction du rapport de profondeur conjugué et une augmentation de la perte d'énergie par rapport à un ressaut hydraulique classique.

La longueur relative en fonction du Froude incident dans une section rectangulaire graduellement élargie est montrée à la figure (2.21). La figure (2.22) montre une comparaison entre les résultats expérimentaux et la courbe proposée par USBR qui montre que la longueur de ressaut dans un canal divergent peut être presque 30% inférieure à celle donnée par la courbe USBR pour les ressauts classiques.

Le rapport de profondeur conjuguée et la perte d'énergie relative en fonction de nombre de Froude incident pour le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal graduellement élargi avec une pente latérale de 0,5: 1 sont respectivement représentés sur la figure (2.23) et (2.24). Dans ces figures sont également représentés les résultats prévus des équations (2.29) et (2.32). La divergence des parois latérales entraîne une réduction du rapport de profondeur conjugué et augmente la perte d'énergie par rapport au ressaut hydraulique classique.

La longueur relative en fonction du nombre de Froude d'un ressaut hydraulique en section trapézoïdale avec une pente latérale de 0,5: 1 pour différents angles de divergence θ est représentée sur la figure (2.25). La divergence des parois latérales dans les bassins de section trapézoïdale réduit également la longueur du ressaut comme cela se produit dans les canaux de section rectangulaire élargie.

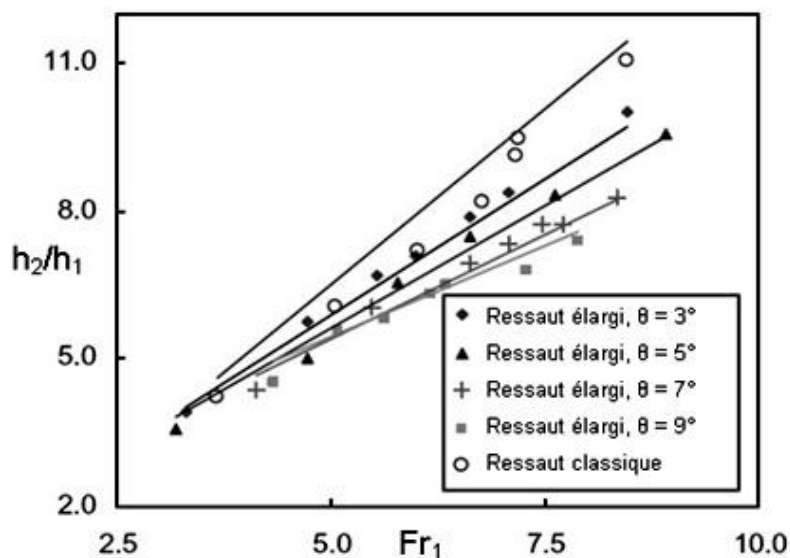


Figure 2.19: Rapport de profondeur conjuguée en fonction du nombre de Froude pour un canal rectangulaire, où les lignes continues sont calculées avec l'équation (2.29).

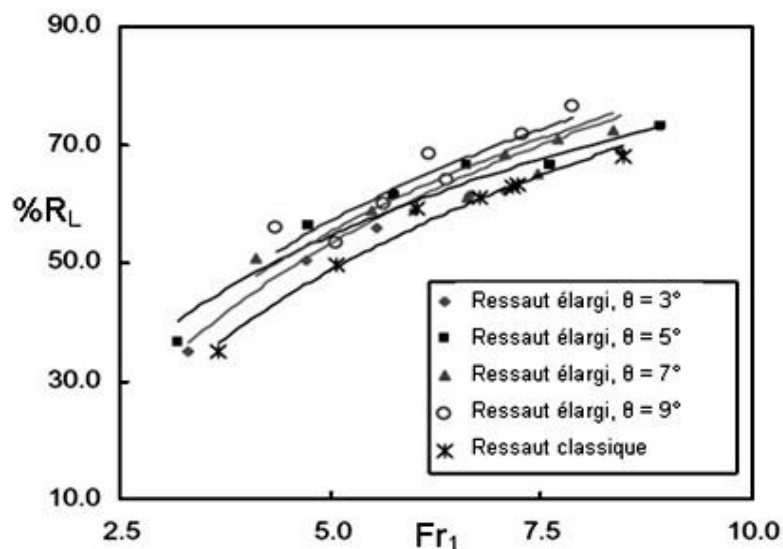


Figure 2.20: Perte d'énergie relative en fonction du nombre Froude pour un canal rectangulaire, où les lignes continues sont calculées avec l'équation (2.32).

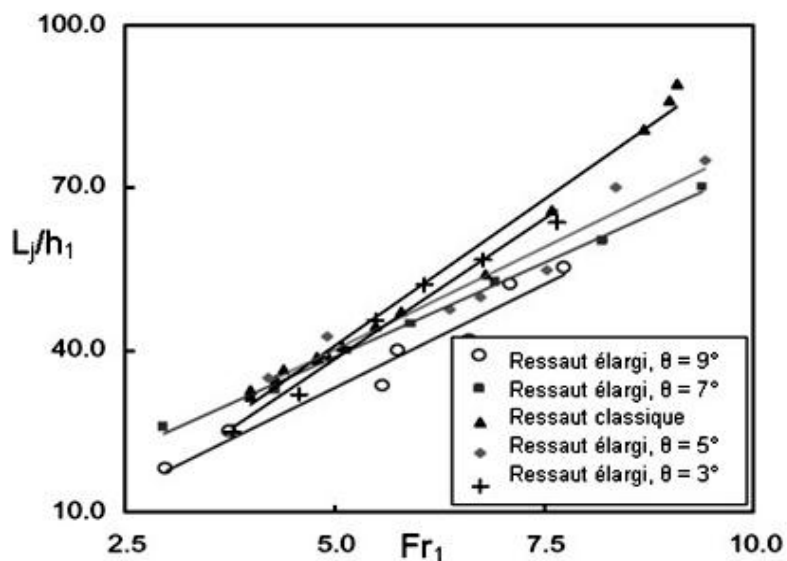


Figure 2.21: Longueur non dimensionnelle du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour un canal rectangulaire avec différents angles de divergence y compris le ressaut classique.

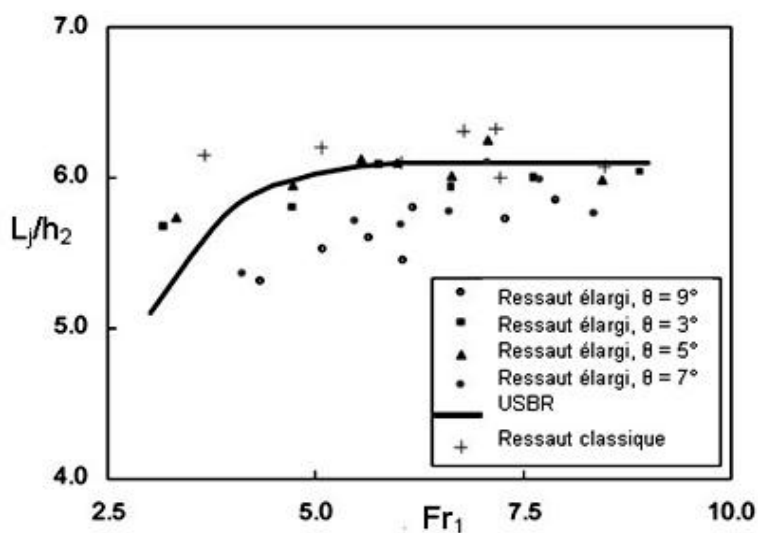


Figure 2.22: Longueur non dimensionnelle du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour un canal rectangulaire avec différents angles de divergence, y compris le ressaut classique et le guidage du Bureau de Récupération des États-Unis (USBR).

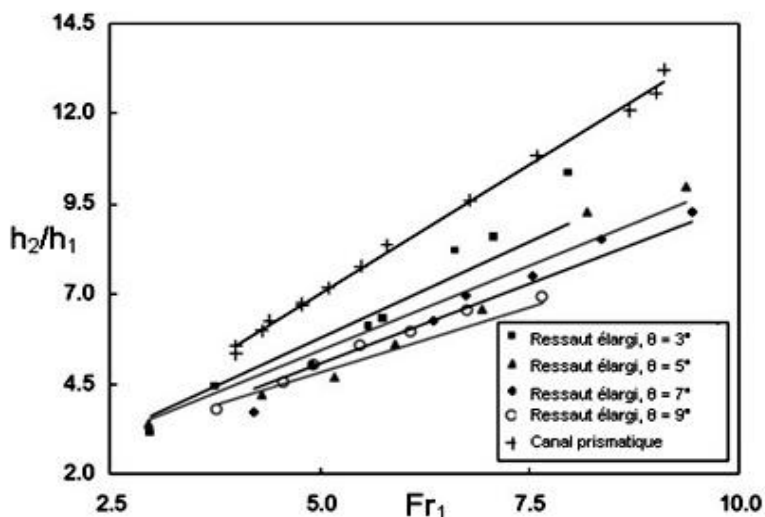


Figure 2.23: Rapport des profondeurs conjuguées en fonction du nombre de Froude dans un canal trapézoïdal graduellement élargi pour $m = 0,5$; où les lignes continues sont calculées avec équation (2.29).

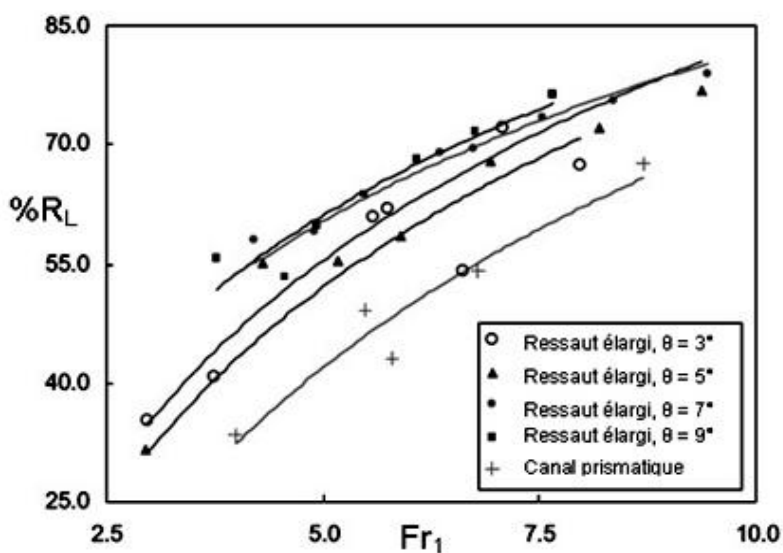


Figure 2.24: Perte d'énergie relative en fonction du nombre de Froude dans un canal trapézoïdal graduellement élargi pour $m = 0,5$; où les lignes continues sont calculées avec équation (2.32).

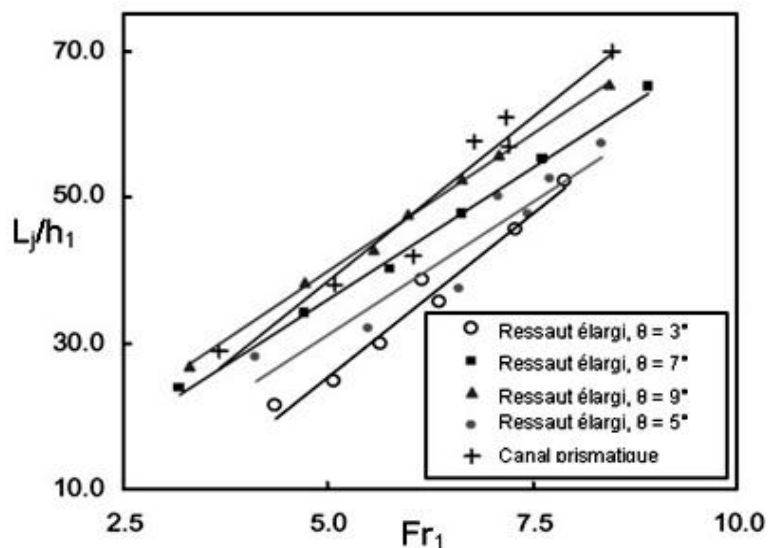


Figure 2.25: Longueur non dimensionnelle d'un ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour un canal trapézoïdal graduellement élargi avec une pente latérale de 0,5: 1.

II.5. Conclusion

Le présent chapitre porte sur les ressauts hydrauliques dans des canaux horizontaux, rectangulaires et non prismatiques. On distingue les conditions d'écoulement non séparées et séparées; le premier type est appelé un ressaut hydraulique dans un canal graduellement élargi, tandis que le second est un ressaut dans un élargissement brusque. Les résultats incluent une prédiction rationnelle du rapport des hauteurs conjuguées, de la perte d'énergie relative et des caractéristiques de longueur. Les principales conclusions sont les suivantes:

1. Comparé au ressaut hydraulique classique dans un canal prismatique rectangulaire, un ressaut dans un canal élargi nécessite une profondeur d'écoulement initial minimal pour des conditions d'admission identiques.
2. La perte d'énergie relative dans le cas non prismatique est la plus faible pour le ressaut hydraulique classique et importante pour un élargissement brusque.
3. Les caractéristiques de longueur sont presque indépendantes du rapport de largeur et ont le même ordre de grandeur que dans les canaux prismatiques.
4. Le volume des ressauts hydrauliques dans les canaux rectangulaires horizontaux dépend uniquement du nombre de Froude incident, mais pas du rapport de largeur.

5. Les ressauts hydrauliques dans les canaux horizontaux sont assez instables par rapport à la position longitudinale; la stabilisation peut être obtenue en fournissant des irrégularités de fond telles que des seuils, des marches positives ou négatives, ou d'autres obstacles.

De même pour ce type de ressaut, des mesures approfondies ont été effectuées pour étudier les effets des pentes latérales et le degré d'élargissement d'un bassin de dissipation sur les caractéristiques d'écoulements moyens des ressauts hydrauliques en canal trapézoïdal graduellement élargi. Les caractéristiques du ressaut étudié sont la profondeur en aval, la perte d'énergie et la longueur du ressaut.

En raison de la profondeur conjuguée dans un ressaut hydraulique en canal graduellement élargi dépend de la longueur de ressaut, la longueur de ressaut et le profil de surface de l'eau ont été prédits avec une équation pour le rapport de profondeur conjuguée. Dans cette étude, un profil quart-elliptique a été utilisé et une équation implicite a été proposée pour la profondeur conjuguée et la perte d'énergie dans un ressaut hydraulique dans un canal graduellement élargi de toute pente latérale et angle de divergence. Les résultats montrent un assez bon accord entre le profil proposé et les données expérimentales dans la gamme des expériences réalisées.

Dans un élargissement de canal rectangulaire, la profondeur conjuguée et la longueur du ressaut se réduisent et la perte d'énergie relative augmente. Par exemple, pour un angle de divergence de 9° , le rapport de profondeur conjuguée et la longueur de ressaut relative sont environ 30 % et 22 % inférieurs à ceux d'un ressaut hydraulique classique.

Pour chaque angle de divergence, une réduction de la pente latérale entraîne une réduction de la profondeur et une augmentation de la perte d'énergie relative et de la longueur du ressaut. Toute augmentation de l'angle de divergence entraîne une réduction de la profondeur et de la longueur du ressaut et une augmentation de la perte d'énergie relative. Par conséquent, pour un bassin de dissipation trapézoïdal, l'élargissement peut être utilisé pour réduire la profondeur d'écoulement et la longueur du ressaut hydraulique.

chapitre III

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé

Chapitre III**Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé****(Approche de Khattaoui et Achour 2012)****III.1. Introduction**

L'étude des écoulements uniformes, ou plus encore les écoulements non uniformes en lit composé sont très compliqués à cause du transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2005). Ces deux phénomènes, se manifestant de différentes façons, sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaire de l'écoulement.

Il peut être donc intéressant de voir la grandeur de ces dissipations dans le cas où il se produit un ressaut hydraulique dans le lit composé. Il est plus intéressant d'autant plus que le ressaut hydraulique est utilisé justement pour la dissipation d'énergie. Cette dissipation supplémentaire est donc la bienvenue. En s'inspirant du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, une approche théorique est proposée dans ce présent travail pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en lit composé. Le rendement du ressaut est lui aussi quantifié. Toutes les équations sont présentées en termes adimensionnels afin de leur donner un caractère de validité général.

III.2. Rapport des hauteurs conjuguées

La figure (3.1) montre les différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit composé droit.

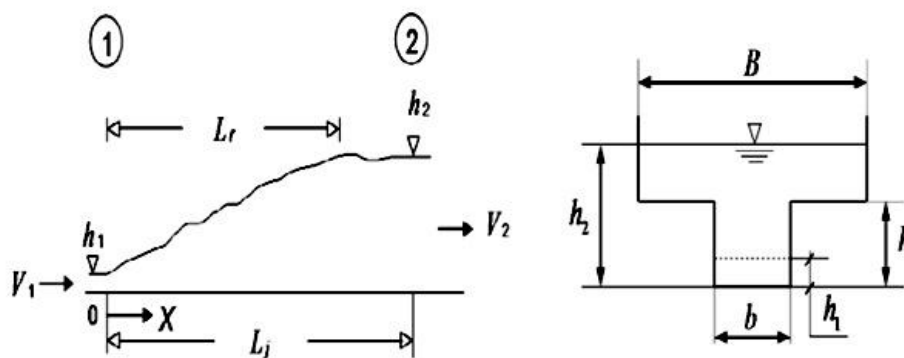


Figure 3.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit

Le transfert de masse et de quantité de mouvement se produit à l'interface entre le lit mineur et le lit majeur (Bousmar et al. 2004).

L'équation de la quantité de mouvement appliquée entre le pied et la fin du ressaut, défini par la figure 1, s'écrit comme suit :

$$PQ(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = f_1 - f_2 \quad (3.1)$$

En s'inspirant de l'article de Achour (2000), par analogie à la relation de Borda-Carnot et au vue de la forme de la relation 1, il paraît admissible de rajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme expression:

$$f_x = -k\omega(h_2 - h)^x h_1^y (B - b)^z \quad (3.2)$$

C'est une source de perte de charge liée nécessairement au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur. Les exposants x , y et z sont liés par la relation $x + y + z = 3$, le coefficient k est tel que $k = \varphi(L_j$ ou $L_r, h_2, h_1, h)$.

En tenant compte de f_x , l'équation d'Euler devient :

$$\rho Q^2(1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 + f_x \quad (3.3)$$

Analysons l'équation pour la fonction $f_x = (1/2)\omega(h_2 - h)h_1(B - b)$: L'hypothèse d'une distribution uniforme pour les vitesses dans les sections transversales correspondant au pied et à la fin du ressaut implique que $\beta_1 = \beta_2 = 1$. Les sections A_1 et A_2 sont données respectivement par : $A_1 = bh_1$ et $A_2 = B(h_2 - h) + bh$. Prenons comme hypothèse aussi que la distribution des pressions est hydrostatique dans les sections 1 et 2 du ressaut, ce qui donne les expressions des forces :

$$f_1 = \omega(h_1/2)bh_1 \text{ et } f_2 = \omega(h_2 - h/2)bh + \omega[(h_2 - h)/2]B(h_2 - h)$$

En tenant compte de toutes ces hypothèses et informations ainsi que de l'équation de continuité, $V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$, l'équation (3.3) s'écrit en définitive, après réarrangement, comme suit :

$$2Fr_1^2 \left(\frac{\beta}{Y - \frac{1-\beta}{\tau}} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} - \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta} - \left(Y - \frac{1}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (3.4)$$

Où :
$$Fr_1 = Q/\sqrt{b^2h_1^2g} \tag{3.5}$$

En négligeant la force de résistance f_x , l'équation résultante aurait comme expression :

$$2Fr_1^2 \left(\frac{\beta}{Y-(1-\beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} \tag{3.6}$$

Les relations (3.3) et (3.4) sont des équations fonctionnelles de forme $\phi(Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

Notons que les équations (3.4) et (3.6) peuvent s'écrire sous la forme $Y^3 + aY^2 + bY + c = 0$.

En faisant le changement de variable $Y = x - a/3$, l'équation de troisième degré devient sous la forme $Y^3 + pq + q = 0$ dont la résolution peut se faire aisément en utilisant la méthode trigonométrique.

La figure (3.2) illustre la variation de Y, calculé par l'équation (3.6), en fonction de Fr_1 . L'une des variables, β ou τ , est fixée, l'autre varie avec un pas de 0,2. Pour que le ressaut se produise effectivement dans le canal composé ($h_2 > h$), les valeurs de Fr_1 à considérer doivent être

strictement supérieures à la valeur minimal $Fr_{1min} = \left[\frac{1}{(2\sqrt{2})} \right] \sqrt{\left(\frac{2}{\tau} + 1 \right)^2 - 1}$ correspondant à ($h_2 = h$).

On s'aperçoit de ces figures, que pour un τ et β données, Y augmente continuellement avec l'accroissement de Fr_1 . L'augmentation du rapport Y en fonction de Fr_1 est plus rapide pour de grandes valeurs de β . Pour un Fr_1 fixé, Y croît avec l'accroissement de β et diminue avec l'augmentation de τ .

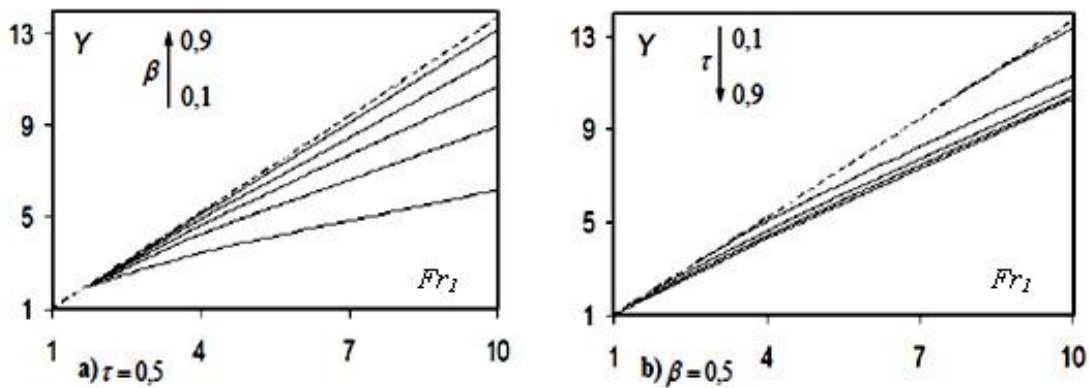


Figure 3.2 : Variation de Y, calculé par (3.4), en fonction de Fr_1 . (---) : $\beta = 1$.

Sur la (figure 3.2) nous avons représenté la variation de Y en fonction de Fr_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. On voit clairement que les Y calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont inférieures à celles calculées en l'a négligeant. La différence est plus claire au fur et à mesure que le nombre de Froude Fr_1 augmente. La force f_x traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

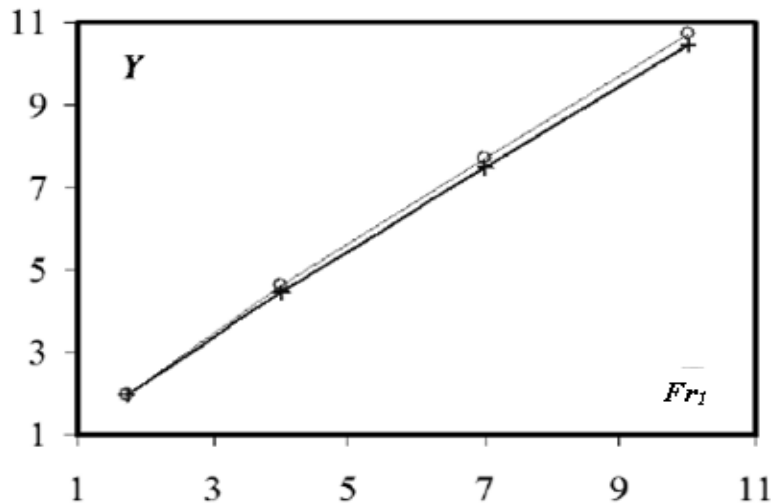


Figure 3.3 : Variation de Y en fonction de Fr_1 . (o) : équation (3.6), (+) : équation (3.4).

III.3. Rendement du ressaut

En considérant les mêmes hypothèses que pour le rapport des hauteurs conjuguées, le rendement, $\eta = \Delta H/H_1$, peut s'exprimer par :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{Fr_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + Fr_1^2/2} \quad (3.7)$$

L'équation (3.7) permet le calcul, d'une manière explicite, le rendement du ressaut se produisant en lit composé droit, connaissant Fr_1 , Y ainsi que β et τ . En considérant les valeurs de Y calculées avec la relation (3.6), nous avons représenté sur la figure (3.4) la variation de η en fonction de Fr_1 . Pour un τ et un β fixés, il est clairement illustrer sur la figure que le rendement η d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de Fr_1 .

Pour un τ connu, en fixant Fr_1 , η diminue avec l'augmentation de β . Pour un β et un Fr_1 fixés, on peut aisément voir que le η augmente avec l'accroissement de τ .

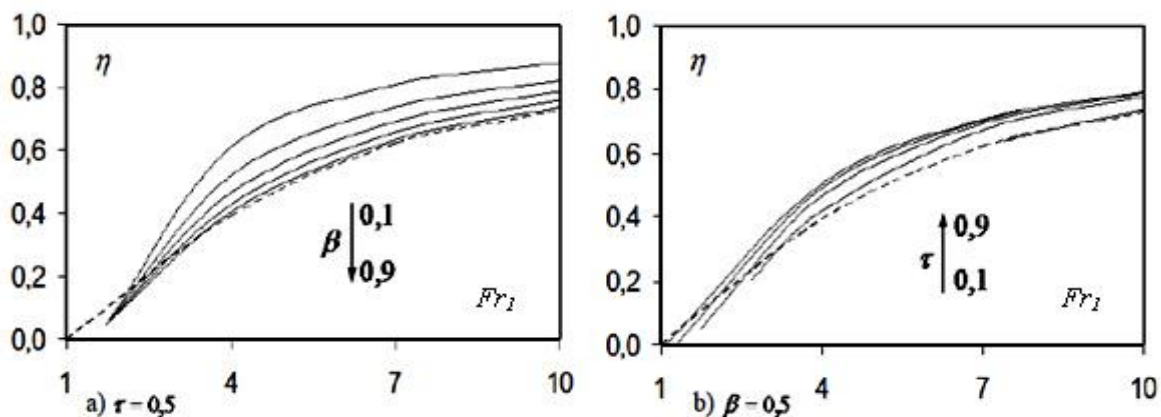


Figure 3.4 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (---) : $\beta = 1$. η est calculé par l'équation (3.3).

Sur la figure (3.5) est représentée la variation de η en fonction de Fr_1 pour $\beta = \tau = 0,5$. Il est bien illustré que les η calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont supérieures à celles calculées en l'a négligeant.

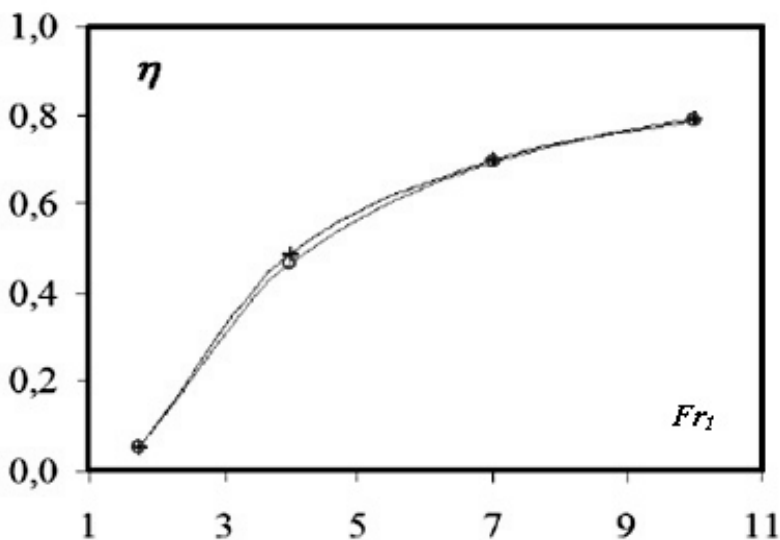


Figure 3.5 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (o) : équation (3.2), (+) : équation (3.1)

III.4. Conclusion

L'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit a abouti à une équation fonctionnelle de forme $\phi(Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

Une nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans nos développements, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapproché de la réalité.

Afin de trouver l'expression définitive de cette force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures, sur modèle réduit au laboratoire, sont indispensables.

chapitre IV

Compacité du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire

Chapitre IV**Compacité du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire****(Approche de Debabeche 2003)****IV.1. Introduction**

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse (Forster et Skrinde,1950; Achour,1997), continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative (Hager et Sinniger,1985). Tous ces obstacles ont pour fonction d'assurer la formation du ressaut par l'élévation du plan d'eau aval, de contrôler sa position lors des changements des paramètres de l'écoulement et contribuent enfin à une meilleure compacité du bassin amortisseur (Bretz,1987; Hager et Li,1992).

La présente étude se propose d'analyser expérimentalement, les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince, évoluant dans un canal rectangulaire. L'objectif principal de cette étude est de trouver les relations fonctionnelles, exprimées en termes adimensionnels, liant ces caractéristiques.

IV.2. Position du problème

Lorsque le ressaut contrôlé est entièrement formé sur le radier du bassin amortisseur correspondant à une hauteur géométrique s du seuil et une longueur x du bassin (figure 4.1), le déplacement du seuil vers l'aval ne modifie en rien la configuration du ressaut, ce qui revient à dire que la longueur L_j du ressaut est pratiquement assimilable à la position x du seuil. Par contre le déplacement du seuil vers l'amont ($L_j/x > 1$) provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci.

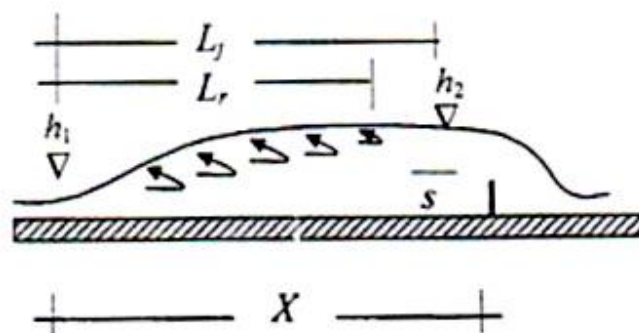


Figure 4.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince.

L'objectif principal de cette étude est de déterminer l'effet d'un seuil à paroi mince sur le profil du ressaut hydraulique dans un canal à section droite rectangulaire, et de trouver des relations empiriques exprimant la variation de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil ainsi que celle du rapport $Y=h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées, en fonction du nombre de Froude Fr_1 et du facteur de compacité γ défini comme le rapport de la longueur du rouleau Lr^* et de la position x du seuil.

IV.3. Rapport des hauteurs conjuguées

IV.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma \leq 0,90$

Pour une large gamme des nombres de Froude allant de 1.5 à 12 la mise en place d'un seuil mince à l'aval du bassin, à une distance x du seuil supérieur à la longueur Lr du rouleau, correspondant à un rapport de compacité $\gamma \leq 0,90$, n'a pratiquement aucune influence sur le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut classique.

Afin de mettre en évidence cette influence, on s'intéresse aux configurations du ressaut contrôlé relatives aux rapports de compacité $\gamma > 0,90$.

IV.3.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,90$

La figure (4.2) représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements. Les points de mesures expérimentales s'éloignent de la courbe théorique du ressaut classique selon Bélanger ($\gamma \leq 0,90$), au fur et à mesure que le rapport de compacité γ augmente. Cet éloignement commence à se faire remarquer à partir de $\gamma > 1,25$.

Par ailleurs, pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y=a Fr_1 + b$.

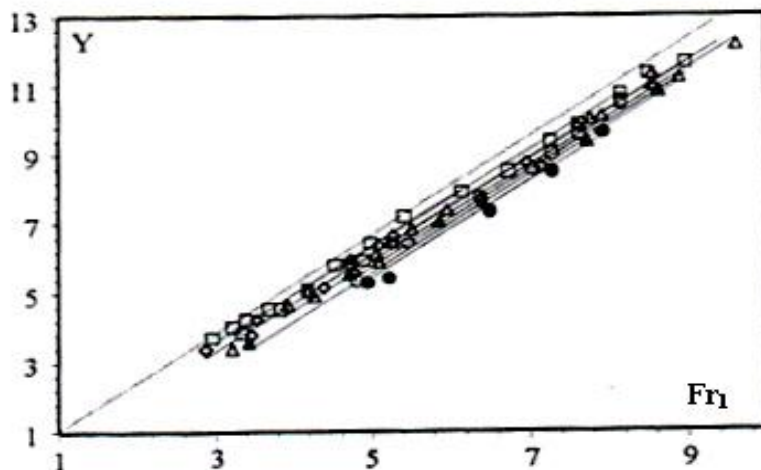


Figure 4.2 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction du nombre de Froude Fr_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (\square) 1, (\diamond) 1,15 ; (Δ) 1,3 ; (\circ) 1,45 ; (\blacktriangle) 1,6 ; (\bullet) 1,93. (- - -) Courbe théorique du ressaut classique selon Bélanger ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbe d'ajustements.

Une relation unique de la forme $Y = \Psi (Fr_1, \gamma)$ est alors proposée, permettant de déterminer le rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction de nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident pour toutes les configurations du ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$Y = 1,386Fr_1 - \sqrt{2}\text{Ln}(\gamma) - 0,617 \quad \text{Pour } 2,5 \leq Fr_1 \leq 11 \quad (4.1)$$

La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure 4.3.

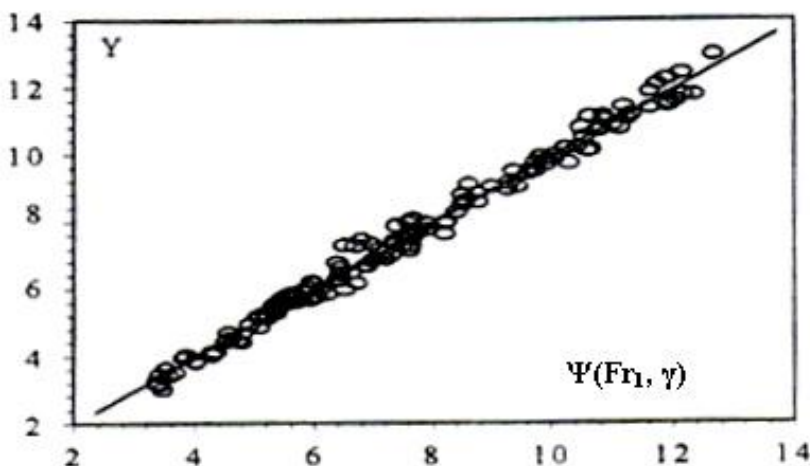


Figure 4.3 : Variation du rapport Y de hauteurs conjuguées en fonction de $(Y = 1,386Fr_1 - \sqrt{2}\text{Ln}(\gamma) - 0,617)$. (\circ) points expérimentaux. (—) droite d'équation : $h_2/h_1 = 1,386Fr_1 - \sqrt{2}\text{Ln}(\gamma) - 0,617$

IV.4. Hauteur relative du seuil

La figure (4.4) montre la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident.

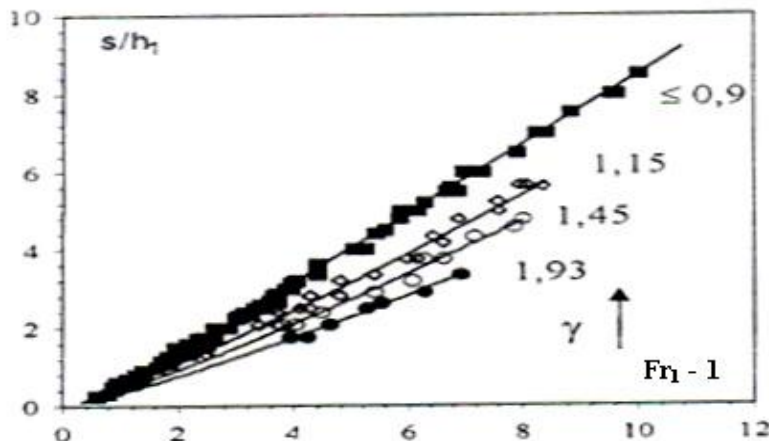


Figure 4.4 : Variation de s/h_1 en fonction du nombre de Froude Fr_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (■) 0,9 ; (◇) 1,15 ; (○) 1,45 ; (●) 1,93. (—) Courbes d'ajustements.

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation $S = f(Fr_1)$ est quasi-linéaire pour chaque configuration du ressaut.

Par ailleurs, pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente. L'auteur a établi une autre relation linéaire traduisant la variation de s/h_1 en fonction de Fr_1 et de rapport γ de compacité :

$$S = (1,07 - 0,29\gamma)(Fr_1 - 1) - 0,48 \quad \text{Pour } 2,5 < Fr_1 < 12 \quad (4.2)$$

La représentation graphique des points de mesures de coordonnées $[Fr_1-1, \xi(S, \gamma)]$, ou $\xi(S, \gamma) = (S + 0,48)/(1,07 - 0,29\gamma)$ et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure (4.5).

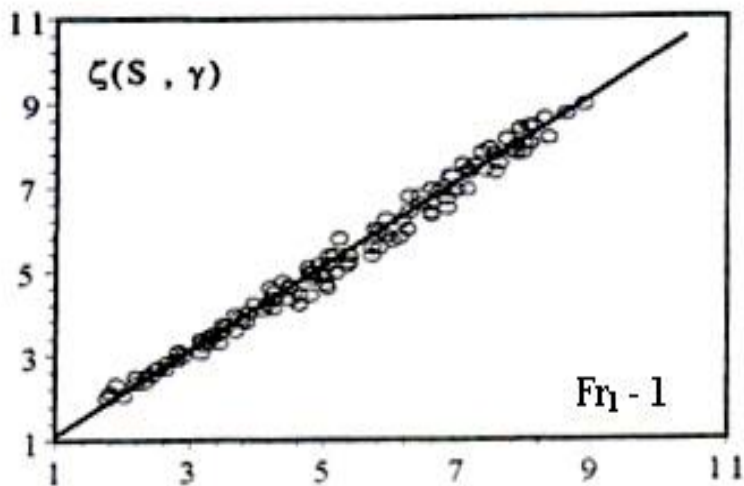


Figure 4.5 : Variation de $\zeta(S, \gamma)$ en fonction de $Fr_1 - 1$. (○) points expérimentaux.
 (—) Droite d'équation : $(S + 0,48)/(1,07 - 0,29\gamma) = Fr_1 - 1$.

IV.5. Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du seuil

La figure (4.6) représente la variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ .

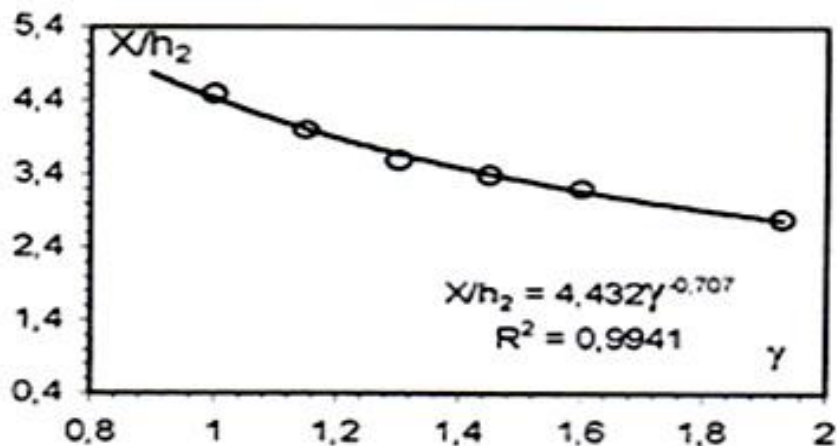


Figure 4.6 : Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . (—) Courbe d'ajustement.

L'équation de la courbe d'ajustement est ainsi :

$$x/h_2 = 4,432\gamma^{0,707} \tag{4.3}$$

Pour un rapport γ de compacité égale à l'unité, l'équation (----) donne un rapport $Lr^*/h_2=4,432$. Ce dernier est très proche de celui proposé par Safranez (1955) : $Lr/h_2=4,5$.

IV.6. Profil de surface du ressaut

La figure (4.7) représente les profils du surface du ressaut relatifs à quelques rapports intermédiaires de compacité du ressaut, à savoir : $\gamma \leq 0,9$; $\gamma = 1,15$; $\gamma = 1,45$; $\gamma = 1,93$.

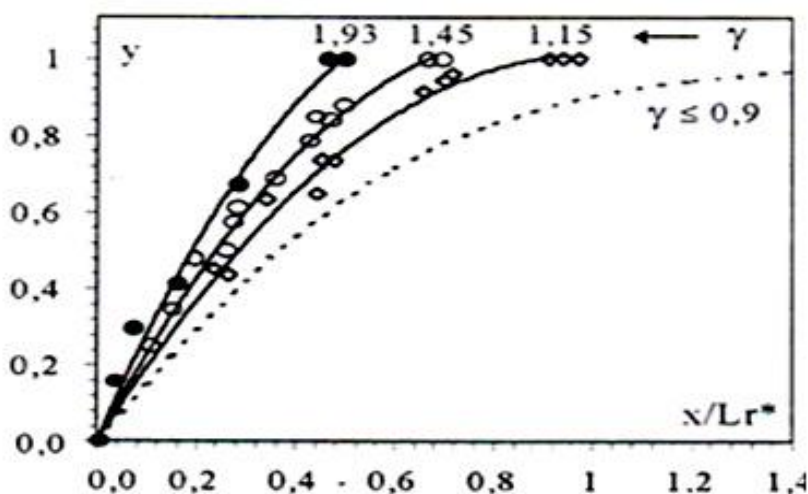


Figure 4.7 : Variation expérimentales du profil de surface ($y=f(X)$) du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire, pour trois rapports intermédiaires de compacité. (—) courbes d'ajustements. (---) courbe selon l'équation $y=\text{Tanh}(1,5X)$.

La courbe en traitillé correspondant au profil du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$) possède une allure courbée, celle-ci se redresse progressivement en allant vers un rapport γ de compacité supérieur, jusqu'à ce qu'elle avoisine une forme linéaire pour un fort rapport de compacité ($\gamma = 1,93$).

L'analyse des mesures expérimentales a permis d'aboutir à une équation généralisée tenant compte du rapport γ de compacité du ressaut. Les points expérimentaux se situent alors sur une courbe d'équation :

$$y = \text{Tanh}[(2\gamma - 0,3)X] \quad (4.4)$$

Si l'on remplace, dans cette équation, le rapport γ par 0.9 on retrouve l'équation de BAKHMETEEF et MATZKE (1936) relative au ressaut classique. L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure (4.8).

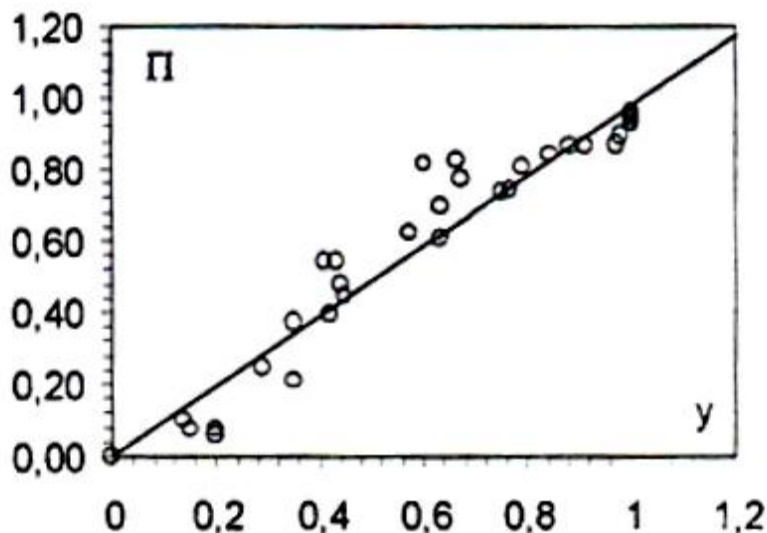


Figure 4.8 : Variation expérimentale de Π en fonction de y , pour différentes configurations de ressaut contrôlé dans un canal rectangulaire. (—) première bissectrice. (○) point expérimentaux. $\Pi = \text{Tanh}[(2\gamma - 0,3)X]$.

IV.7. Conclusion

L'étude s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident. Il a été montré que pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y = a Fr_1 + b$.

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un second temps, à la variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport S en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident suit une loi de type quasi linéaire.

Dans un troisième temps, l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . Il a été montré que pour un rapport γ de compacité égale à l'unité, la relation donne un rapport $Lr^*/h_2 = 4,432$. Ce dernier est très proche de celui proposé par Safranez (1955) : $Lr/h_2 = 4,5$.

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un quatrième temps, à la variation expérimentale du profil de surface $y = f(X)$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire, pour trois rapports intermédiaires de compacité.

Conclusion de la première partie

Dans le premier chapitre, on a abordé les travaux de Wanoschek et Hager (1989) où le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique de 45° de pente latérale est analysé. Sur la base de l'approche de la dynamique unidimensionnelle, ils ont montré que le rendement est significativement plus élevé que pour les ressauts dans des canaux rectangulaires. Cette propriété attire l'attention sur ses caractéristiques hydrauliques, soit un niveau d'eau amont réduit et des avantages sur la construction des parois latérales inclinées.

Par rapport au ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires, les ressauts trapézoïdaux sont régis par des caractéristiques importantes d'écoulement spatial.

Une autre propriété particulière des ressauts trapézoïdaux est la présence d'un rouleau de fond et de zones de retour latéral. D'autres considérations se rapportent au rapport des profondeurs conjuguées, aux principales caractéristiques du rouleau de fond, au retour latéral et à la longueur du ressaut. Les auteurs ont décrit d'une manière détaillée, les différents types d'instabilités inhérentes à ces ressauts. Ainsi, ils ont présenté un aperçu complet du schéma d'écoulement interne des ressauts dans les canaux trapézoïdaux, au moins en ce qui concerne les propriétés temporelles.

L'étude de Kateb, Debabeche et Benmalek (2013) qui a permis d'analyser expérimentalement trois types de ressauts à savoir : le ressaut contrôlé par seuil mince, ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut force type A. En effet, il a été trouvé, pour les trois configurations de ressaut, des relations empiriques permettant le dimensionnement du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Une étude comparative a été effectuée entre ces trois types de ressauts et il ressort que pour le même nombre de Froude Fr_1 , la profondeur conjuguée d'aval, la position de la marche et la hauteur du seuil sont plus réduites dans le ressaut force de type A, que pour leurs homologues contrôlés par marche positive et par seuil mince. L'étude a abordé ensuite, la variation du rendement η en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, et ceci pour les trois configurations de ressauts étudiées.

L'étude a montré que les points de mesures expérimentales du ressaut de type A, force par marche positive se présente légèrement au-dessus de ceux contrôlés par marche positive, par conséquent, l'effet de la dissipation de l'énergie, pour les trois configurations de ressauts, est quasi identique.

Le deuxième chapitre porte sur les ressauts hydrauliques dans des canaux horizontaux, rectangulaires et non prismatiques. On a distingué les conditions d'écoulement non séparées et séparées; le premier type est appelé un ressaut hydraulique dans un canal graduellement

élargi, tandis que le second est un ressaut dans un élargissement brusque. Les résultats incluent une prédiction rationnelle du rapport des profondeurs conjuguées, de la perte d'énergie relative et des caractéristiques de longueur. Les principales conclusions tirées sont les suivantes:

- Comparé au ressaut hydraulique classique dans un canal prismatique rectangulaire, un ressaut dans un canal élargi nécessite une profondeur d'écoulement initial minimal pour des conditions d'admission identiques.
- La perte d'énergie relative dans le cas non prismatique est la plus faible pour le ressaut hydraulique classique et importante pour un élargissement brusque.
- Les caractéristiques de longueur sont presque indépendantes du rapport de largeur et ont le même ordre de grandeur que dans les canaux prismatiques.
- Le volume des ressauts hydrauliques dans les canaux rectangulaires horizontaux dépend uniquement du nombre de Froude incident, mais pas du rapport de largeur.
 - Les ressauts hydrauliques dans les canaux horizontaux sont assez instables par rapport à la position longitudinale; la stabilisation peut être obtenue en fournissant des irrégularités de fond telles que des seuils, des marches positives ou négatives, ou d'autres obstacles.

De même pour ce type de ressaut, des mesures approfondies ont été effectuées pour étudier les effets des pentes latérales et le degré d'élargissement d'un bassin de dissipation sur les caractéristiques d'écoulements moyens des ressauts hydrauliques en canal trapézoïdal graduellement élargi. Les caractéristiques du ressaut étudié sont la profondeur en aval, la perte d'énergie et la longueur du ressaut.

En raison de la profondeur conjuguée dans un ressaut hydraulique en canal graduellement élargi dépend de la longueur de ressaut, la longueur de ressaut et le profil de surface de l'eau ont été prédits avec une équation pour le rapport de profondeur conjuguée. Dans cette étude, un profil quart-elliptique a été utilisé et une équation implicite a été proposée pour la profondeur conjuguée et la perte d'énergie dans un ressaut hydraulique dans un canal graduellement élargi de toute pente latérale et angle de divergence. Les résultats montrent un assez bon accord entre le profil proposé et les données expérimentales dans la gamme des expériences réalisées.

Dans un de canal rectangulaire élargi, la profondeur conjuguée et la longueur du ressaut se réduisent et la perte d'énergie relative augmente.

Pour chaque angle de divergence, une réduction de la pente latérale entraîne une réduction de la profondeur et une augmentation de la perte d'énergie relative et de la longueur

du ressaut. Toute augmentation de l'angle de divergence entraîne une réduction de la profondeur et de la longueur du ressaut et une augmentation de la perte d'énergie relative. Par conséquent, pour un bassin de dissipation trapézoïdal, l'élargissement peut être utilisé pour réduire la profondeur d'écoulement et la longueur du ressaut hydraulique.

Dans le troisième chapitre, l'approche de Khattaoui et Achour 2012 a montré que l'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit a abouti à une équation fonctionnelle de forme $\phi (Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

Une nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans nos développements, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapproché de la réalité.

Afin de trouver l'expression définitive de cette force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures, sur modèle réduit au laboratoire, sont indispensables.

Dans le quatrième chapitre, l'étude de Debabeche 2003 sur l'effet de la compacité du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident. Il a été montré que pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y = a Fr_1 + b$.

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un second temps, à la variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport S , en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident suit une loi de type quasi linéaire.

Dans un troisième temps, l'expérimentation a eu pour objectif d'évaluer la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . Il a été montré que pour un rapport γ de compacité égale à l'unité, la relation donne un rapport $Lr^*/h_2 = 4,432$. Ce dernier est très proche de celui proposé par Safranez (1955) : $Lr/h_2 = 4,5$.

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un quatrième temps, à la variation expérimentale du profil de surface $y = f(X)$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire, pour trois rapports intermédiaires de compacité.

Deuxième partie

Etude expérimentale

Deuxième Partie

Étude expérimentale

Introduction

Dans la deuxième partie de cette étude, une analyse expérimentale sur l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique évoluant dans trois types de canaux sera analysée, à savoir, le canal trapézoïdal, le canal trapézoïdal brusquement élargi à un canal rectangulaire et le canal rectangulaire composé.

La recherche bibliographique a montré que le déplacement du seuil vers l'aval provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci (Debabeche 2003). Ces constatations mènent à trouver des relations empiriques adimensionnelles liants les différentes caractéristiques du ressaut au rapport de compacité $\gamma = Lr/x$, défini comme le rapport de la longueur du rouleau Lr^* et de la position x du seuil. En effet, le premier chapitre sera consacré à l'analyse expérimentale, de l'effet du seuil contenu à paroi mince sur le ressaut hydraulique en un canal de section droite trapézoïdale. Ce type de ressaut n'a connu que très peu d'étude. Les travaux les plus reconnus sur le ressaut hydraulique en canal trapézoïdal sont ceux effectués par Poisey et Hsing (1938), Silvester (1964), Wanoschek et Hager (1989) et ceux de Kateb, Debabeche et Benmalek (2013) sur l'effet de la marche positive.

Le but est de trouver des relations empiriques exprimant la variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil ainsi que celle du rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées, en fonction du nombre de Froude Fr_1 et du facteur de compacité γ .

Le deuxième chapitre s'occupe du ressaut hydraulique évaluant en canal trapézoïdal brusquement élargi à un canal rectangulaire. L'étude des paramètres hydrauliques du ressaut dans les canaux non prismatique a fait l'objet de recherche pour plusieurs hauteurs. Au premier lieu Herbrand (1973) a présenté les résultats d'une étude fondamentale approfondie relative au ressaut hydraulique dit spatial. Après une introduction portant sur les problèmes hydrauliques qui interviennent dans le calcul et dans la conception de bassins de dissipation comportant un élargissement soit brusque, soit progressif. Plutard Hager (1985) a analysé le phénomène du ressaut hydraulique sur fond horizontal en canal rectangulaire non prismatique. Et a distingué entre les cas où l'écoulement est non séparé et sépare des parois latérales. Les résultats contiennent des formules pour les hauteurs conjuguées en fonction du nombre de

Froude incident et du rapport des largeurs correspondantes, la dissipation relative et les caractéristiques de la longueur du ressaut.

Le troisième chapitre de cette étude expérimentale sera consacré au ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé, les seuls travaux existants pour ce type de ressaut c'est ceux du ressaut classique (Khattaoui et Achour 2012). Donc et à travers cette contribution expérimentale on va analyser l'effet du seuil sur les caractéristiques du ressaut hydraulique et pour atteindre cet objectif deux cas seront présenter : cas où l'écoulement s'effectuera au niveau du lit mineur du canal, et le deuxième cas, où le ressaut se forme au niveau du lit majeur. Des relations fonctionnelles seront établies, exprimant en termes adimensionnels, le rapport de compacité en fonction de :

- ✓ Rapport des hauteurs conjuguées.
- ✓ Hauteur relative du seuil.
- ✓ Position relative du seuil.
- ✓ Profil de surface du ressaut.

Chapitre I

Étude de la compacité du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

Chapitre I

Étude de la compacité du ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal

I.1. Introduction

Le présent chapitre se propose d'analyser expérimentalement, les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal. En basant sur l'unique étude de Debabeche 2003 cité au quatrième chapitre de l'étude bibliographique, en examinera l'effet du rapport de compacité sur les différents paramètres hydrauliques caractérisant ce type de ressaut.

L'objectif principal de cette partie de notre étude expérimentale est de trouver les relations fonctionnelles, exprimées en termes adimensionnels, liant le rapport de compacité aux : rapport des hauteurs conjuguées, hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, la position relative du seuil et le profil de surface du ressaut.

I.2. Description du modèle expérimental

I.2.1. Description du canal

Le canal expérimental (figure 1.1) et (figure 1.2) est constitué d'un bassin d'alimentation, relié à un canal de mesure de section droite trapézoïdal symétrique d'angle d'inclinaison des talus de 73° , par une conduite de PVC circulaire de 115 mm de diamètre. L'ensemble fonctionne en circuit fermé dans lequel est insérées deux pompes en parallèle (figure 1.3) alimentant un convergent en charge débouchant dans le canal de mesure. Le canal de mesure de section trapézoïdal et de longueur 5 m est relié, dans sa partie d'aval, à un second canal de section droite rectangulaire, dans lequel est inséré un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (figure 1.5), permettant la mesure directe du débit.

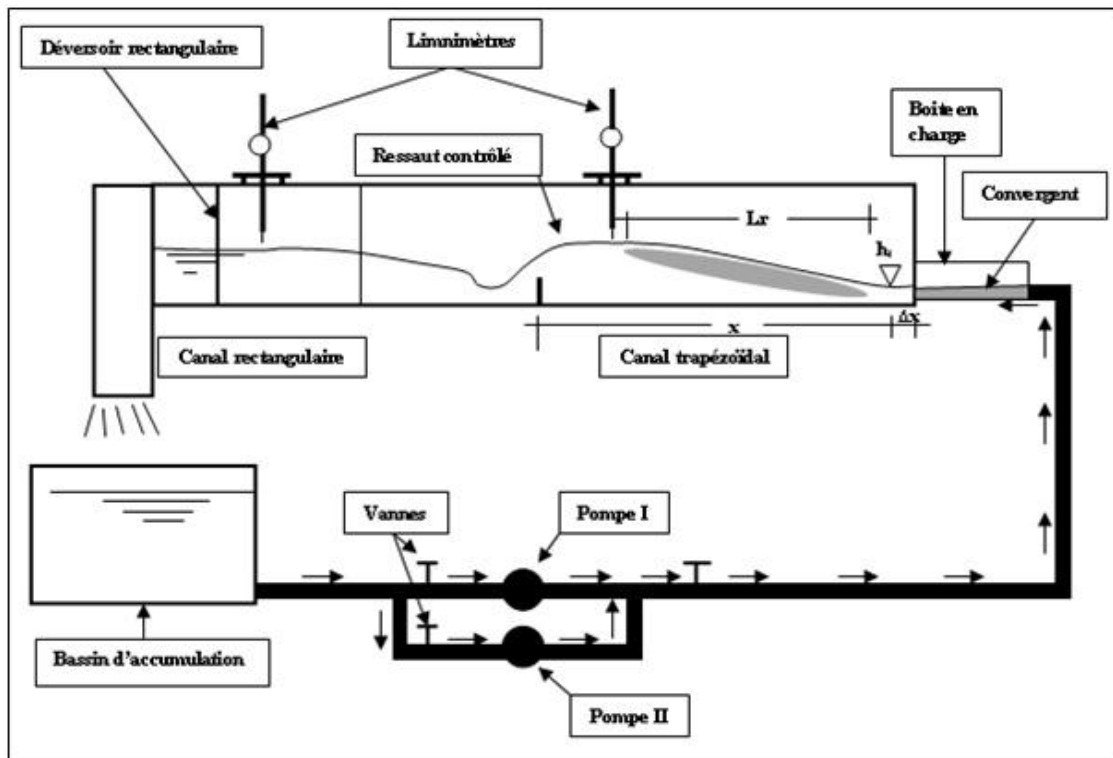


Figure 1.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation.



Figure 1.2: Photographie du modèle expérimental du canal.



Figure 1.3 : Photographie montre le raccordement des pompes

Le canal trapézoïdal est relié, dans sa partie amont, à une boîte en charge (figure 1.7). Le rôle de ce convergent est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie du convergent est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale h_1 du ressaut.



Figure 1.4 : Photographie d'une boîte en charge.

I.2.2. Mesure du débit, niveau d'eau et longueurs caractéristiques

Le débit volume Q ainsi que la profondeur h_2 sont les seules grandeurs qui nécessitent un appareillage spécifique. Mais la position x du seuil mince ainsi que sa hauteur géométrique s sont simplement mesurées à l'aide d'un ruban gradué et la hauteur initiale h_1 du ressaut est assimilée à l'ouverture du convergent en charge générant l'écoulement incident ($h_1 = 2 \text{ cm}$; 3 cm ; 4 cm ; 5 cm et 6 cm) (figure 1.6), après avoir positionné le pied du ressaut à environ $\Delta x \approx 5 \text{ cm}$. En mesure la profondeur h_2 à l'aide d'un Limnimètre à vernier à double précision (figure 1.6). Les mesures de h_2 obtenues seront injectées plus tard dans la formule de Hachemi Rachedi L. (2006), pour le débitmètre à déversoir rectangulaire (figure 1.5).

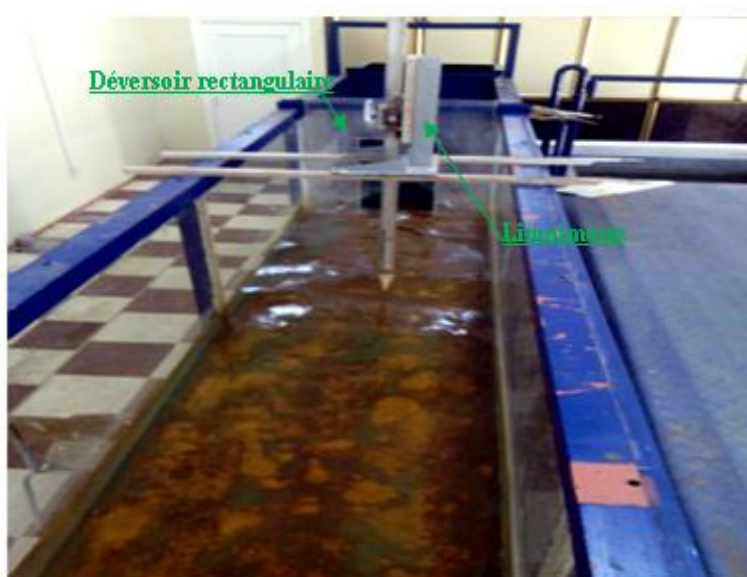


Figure 1.5 : Photographie du déversoir rectangulaire.



Figure 1.6 : Photographie d'une série de convergent.

I.2.2.1. Limnimètre

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

L'instrument est formé d'une règle métallique graduée sur une seule face et munie à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau (figure 1.7).

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 de zéro du vernier, puis on effectue la lecture du nombre de cinquantièmes en face de la division qui coïncide ou qui est la plus rapprochée d'une division de la règle.

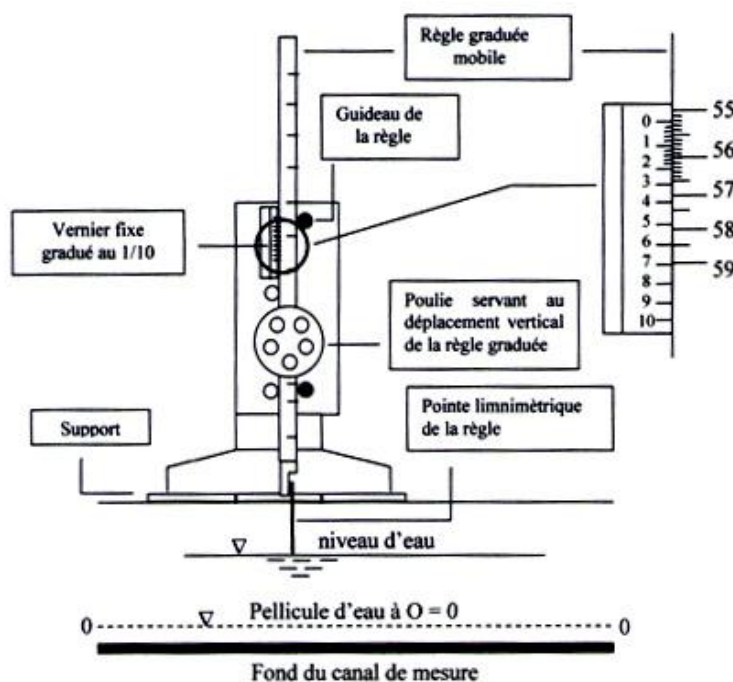


Figure 1.7: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.

I.2.3. Seuils

Les seuils utilisés (figure 1.8) dans notre dispositif expérimental, sont façonnés de fer en forme trapézoïdale, leurs fixations est effectué par un support métallique mince (figure 1.9). Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures, nous avons préparé 18 seuils minces de différentes hauteurs: $s = 5 \text{ cm}$; 6 cm ; 7 cm ; 8 cm ; 9 cm ; 10 cm ; 11 cm ; 12 cm ; 13 cm ; 14 cm ; 15 cm ; 16 cm ; 17 cm ; 18 cm ; 19 cm ; 20 cm ; 21 cm et 22 cm .

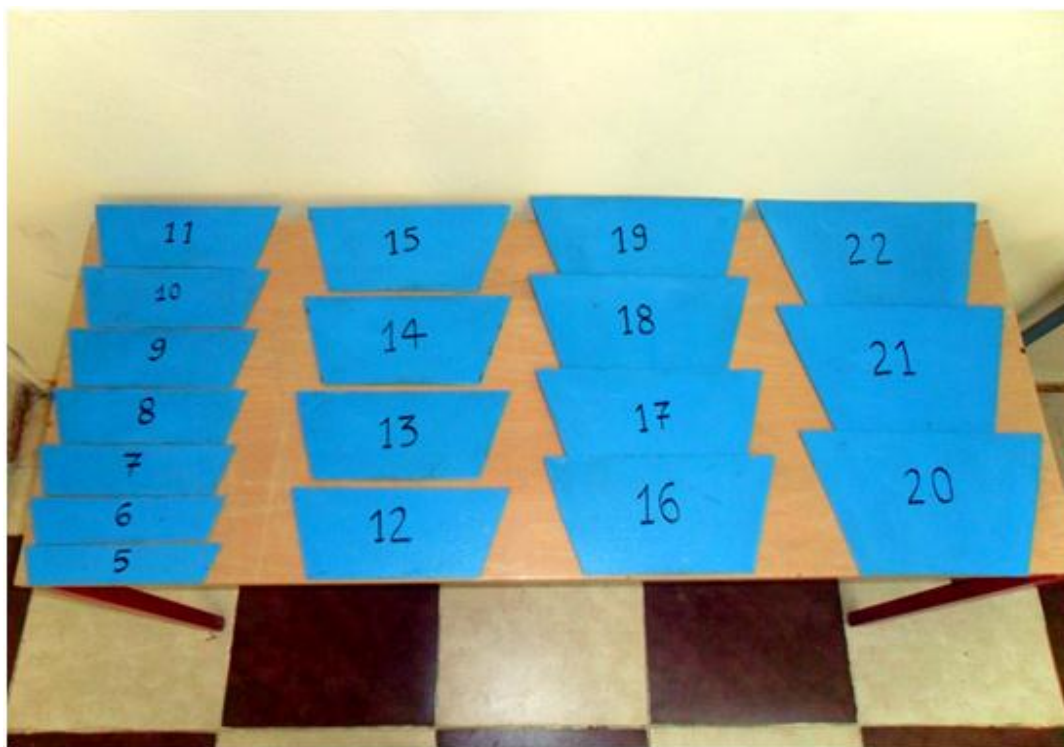


Figure 1.8 : Photographie des seuils minces testés.



Figure 1.9 : Photographie de support du seuil.

I.3. Position du problème

L'étude bibliographique montre, que lorsque le ressaut contrôlé est entièrement formé sur le radier du bassin amortisseur correspondant à une hauteur géométrique s du seuil et une longueur x de bassin (figure 1.10), le déplacement du seuil vers l'aval ne modifie en rien la

configuration du ressaut, ce qui revient à dire que la longueur L_j du ressaut est pratiquement assimilable à la position x du seuil.

Par contre le déplacement du seuil vers l'amont ($L_j/x > 1$) provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci (figure 1.11).

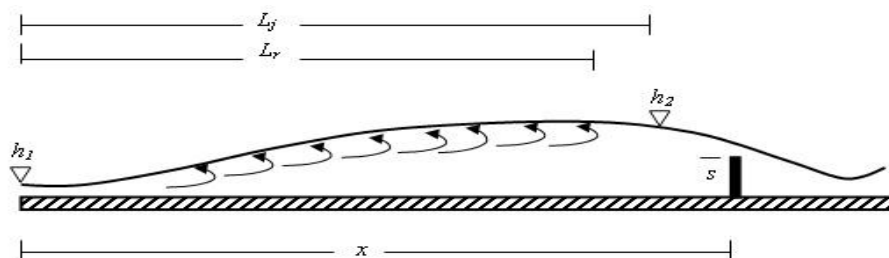


Figure 1.10 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince.

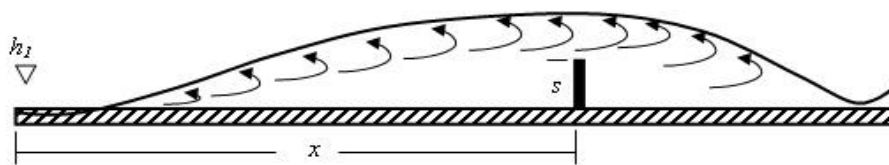


Figure 1.11 : Schéma de définition du ressaut forcé par seuil continu à paroi mince.

L'objectif principal de ce travail est de déterminer l'effet d'un seuil à paroi mince sur le profil d'un ressaut hydraulique dans un canal de section trapézoïdal, et de trouver des relations empiriques exprimant la variation de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil ainsi que celle du rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées, en fonction du nombre de Froude Fr_1 et du facteur de compacité γ défini comme le rapport de la longueur du rouleau L_r^* et de la position x du seuil.

I.4. Procédure expérimental

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince dans un canal trapézoïdal de lit horizontal et un angle d'inclinaison des talus de 73° (figure 1.2). L'expérimentation a été menée sous quatre hauteurs initiales de l'écoulement : h_1 (cm) = 2; 3; 4; 5 (figure 1.6). Une large gamme du nombre de Froude incident a été ainsi obtenue, correspondant à $2,75 < Fr_1 < 14,18$.

La formation du ressaut contrôlé (figure 1.10) est conditionnée par la mise en place d'un seuil à l'aval de l'écoulement. À cet effet, des seuils de différentes hauteurs ont été utilisés (figure 1.8).

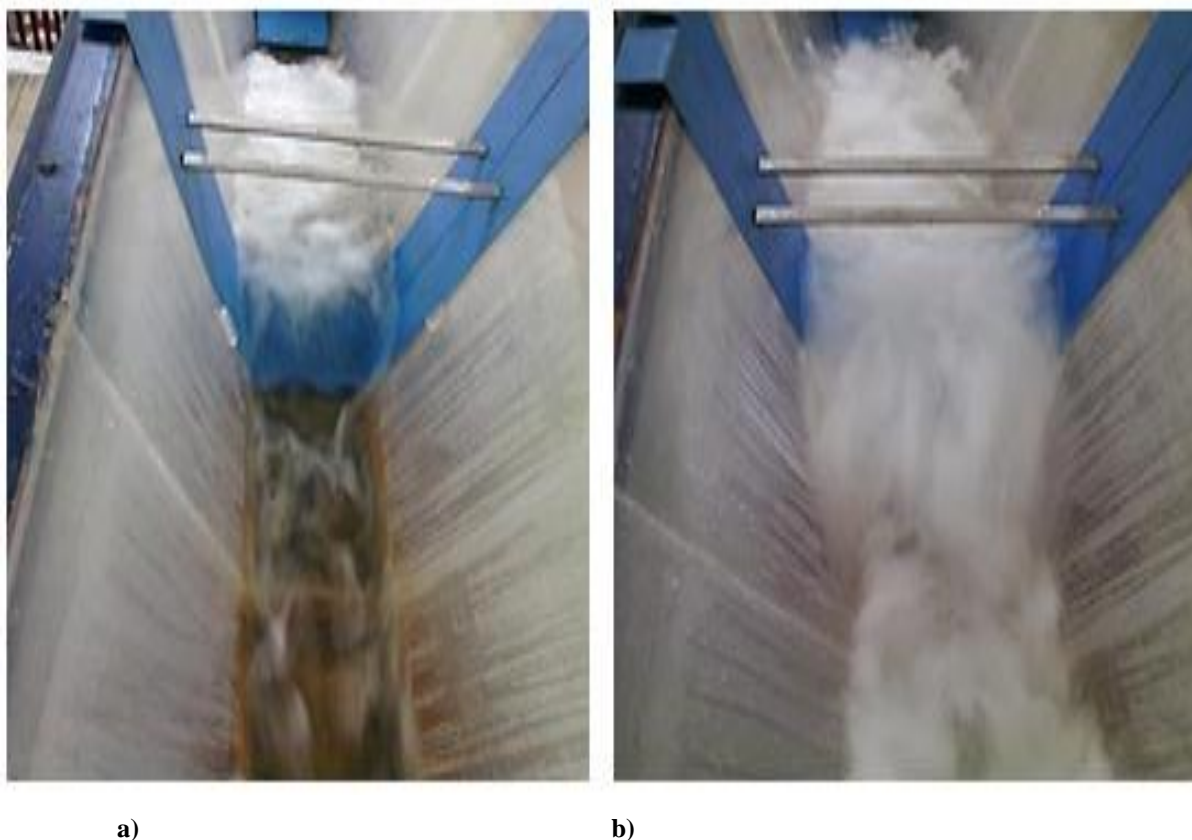


Figure 1.12 : Photographies du ressaut hydraulique a) avec $Fr_1 = 6,70$. b) avec $Fr_1 = 11,02$.

Un échantillon représentatif de points de mesures expérimentales, pour chacun des paramètres intervenant au phénomène, a permis également pour ce type de ressaut d'aboutir à des résultats significatifs. Ces paramètres sont : le débit Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la hauteur du seuil s et la position x du seuil par rapport au pied du ressaut. Ceux-ci permettent de composer les produits adimensionnels suivants : le nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2/h_1$ du seuil et le rapport de compacité $\gamma = Lr^*/x$, Lr^* étant la longueur du rouleau du ressaut classique. Le nombre de Froude Fr_1 est tel que :

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3} \quad (1.1)$$

Ces produits adimensionnels peuvent être liés par les relations fonctionnelles :

$$f_1(Fr_1, S, \gamma) = 0 \quad \text{et} \quad f_2(Fr_1, Y, \gamma) = 0$$

L'un des objectifs visés par la présente partie de notre étude est de définir, par la voie de l'expérimentation au laboratoire, les relations fonctionnelles f_1 et f_2 . Ceci permettra en outre d'évaluer le rapport γ de compacité du ressaut, connaissant l'un des deux couples de valeurs (Fr_1, S) ou (Fr_1, Y) .

Pour chaque couple de valeurs (h_1, Q) , le nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident est calculé en application de la relation : $Fr_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3}$. En fait, chaque série d'essais a été exécutée pour une ouverture donnée (a_0, h_1) et sous des débits volumes différents, tout en maintenant la longueur Δx environ égale à 5 cm. Ainsi, pour h_1 et x fixés, différents profils du ressaut sont obtenus à débit croissant correspondant chacun à une valeur donnée de la hauteur s du seuil. Ainsi lorsque nous obtenons une configuration du ressaut contrôlé (figure 1.12.a) et (figure 1.12.b), nous effectuons, pour une hauteur initiale h_1 et une position x de seuil fixé, les opérations suivantes :

1. Lecture de la hauteur déversante h_{dev} du déversoir rectangulaire.
2. Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation du débitmètre rectangulaire:

$$Q = 0,3794B(2g)^{1/2}\beta(1+0.1649\beta^{2.0716})^{3/2}h^{3/2} \quad (1.2)$$

Avec : $\beta = b/B$.

Q : le débit en (m^3/s).

B : la largeur du canal en (m).

G : l'accélération de la pesanteur (m/s^2).

β : rapport de forme.

b : Largeur de l'échancrure en (m).

h_{dev} : La hauteur de la lame déversante en (m).

La condition d'application de cette relation est satisfaite car : $\beta = b/B = 0,24/0,60 = 0,40 < 0,45$.

3. Calcul du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, par application de la relation :

$$Fr_1^2 = \frac{Q^2(b+2mh_1)}{g(bh_1+mh_1^2)^3}$$

4. Mesure de la longueur x de la position du seuil.

La connaissance des valeurs de Lr^* et de x permettent la détermination du rapport γ de compacité du ressaut, celui-ci étant égal à Lr^*/x .

5. Mesure de la hauteur géométrique s du seuil.

6. Mesure de la hauteur finale h_2 du ressaut.

Les valeurs du rouleau classique sont déterminées expérimentalement selon la relation exprimée par la longueur relative du rouleau classique ($\gamma \leq 0,90$) en fonction du nombre de Froude. L'ajustement de la fonction $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$ est représenté sur la figure (1.13).

Pour un canal trapézoïdal $M = (mh_1)/b$, où M est le rapport de forme $0,03 \leq M \leq 0,06$, b est la petite largeur du canal trapézoïdal ($b = 20$ cm) et m la cotangente de la pente latérale ($m = 0,31$).

$$Lr^*/h_1 = 7,6Fr_1 - 6,22 \quad R^2 = 0,99 \quad (1.3)$$

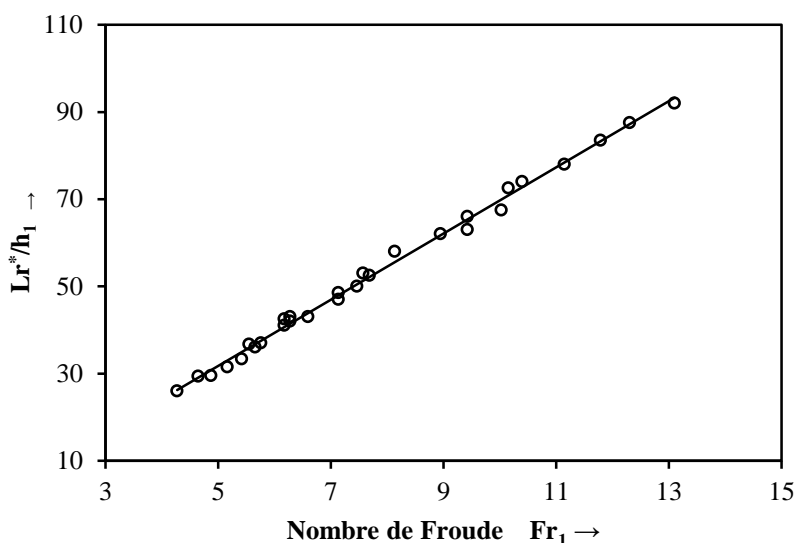


Figure 1.13 : Variation expérimentale de $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$. (-) Courbe d'ajustement.

Les valeurs expérimentales utilisées pour dessiner la ligne droite de la figure (1.13) sont donnés dans le tableau (1.1).

Tableau 1.1 : Valeurs expérimentales exprimant la relation entre Lr^*/h_1 et le nombre de Froude.

Fr_1	Lr^*/h_1	Fr_1	Lr^*/h_1	Fr_1	Lr^*/h_1	Fr_1	Lr^*/h_1
4,27	26,00	6,17	42,50	7,57	53,00	10,40	74,00
4,64	29,33	6,17	41,00	7,68	52,50	11,15	78,00
4,87	29,50	6,28	42,00	8,14	58,00	11,79	83,50
5,16	31,50	6,28	43,00	8,95	62,00	12,31	87,50
5,41	33,33	6,59	43,00	9,42	66,00	13,10	92,00
5,55	36,67	7,13	48,50	9,42	63,00		
5,66	36,00	7,13	47,00	10,03	67,50		
5,76	37,00	7,46	50,00	10,15	72,50		

Comme nous l'avons indiqué précédemment, le déplacement du seuil vers l'amont provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci (figure 1.14) et (figure 1.15). Les différentes configurations du ressaut peuvent être également obtenues, a

débit croissant, par la fixation de la hauteur s de seuil ce qui engendre une diminution progressive de la distance x entre le pied du ressaut et la position du seuil. Cette diminution est suivie d'une légère augmentation de la hauteur initiale h_1 . Cette dernière n'est significative que pour des distances Δx relativement importantes.

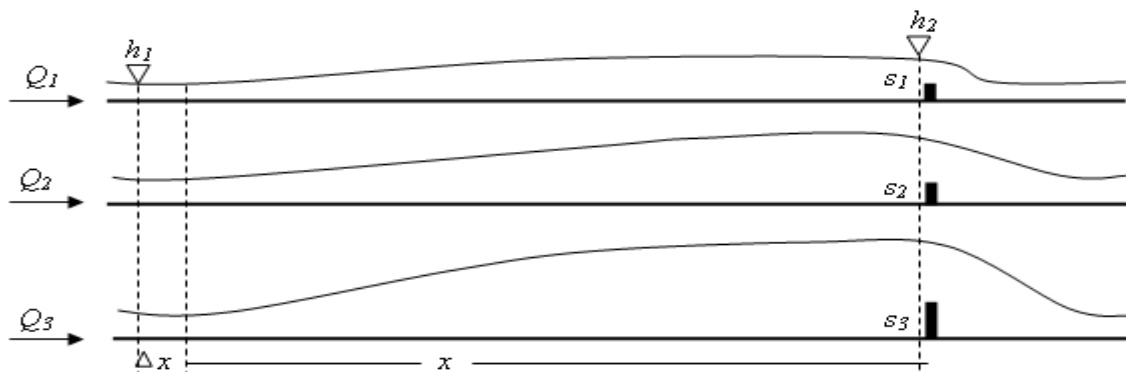
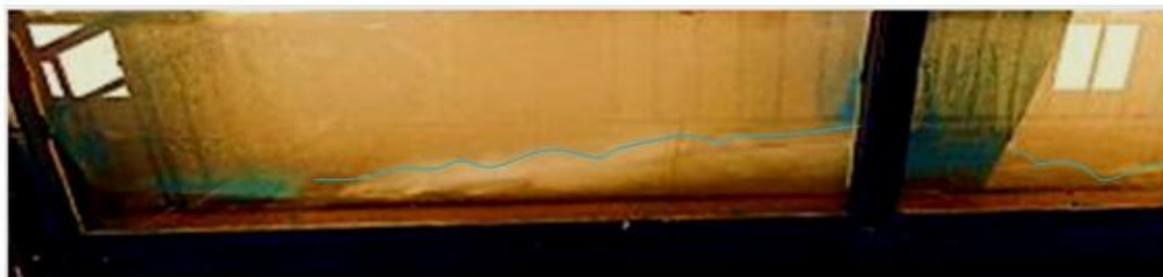
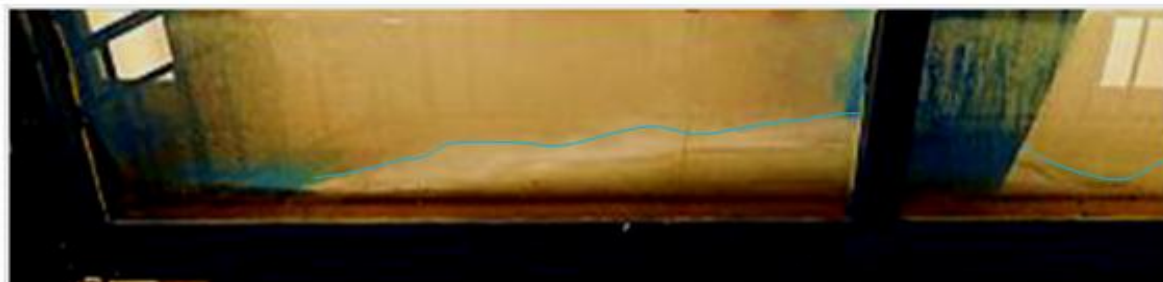


Figure 1.14: Différent configurations du ressaut contrôlé par seuil.



a) $Fr_1 = 6,70$; $s = 10$ cm ; $h_2 = 16,40$ cm ; $\gamma \approx 0,79$



b) $Fr_1 = 7,80$; $s = 12$ cm ; $h_2 = 18,20$ cm ; $\gamma \approx 1,03$



c) $Fr_1 = 11,02$, $s = 16$ cm , $h_2 = 26,90$ cm , $\gamma \approx 1,41$

Figure 1.15: Photos (a, b et c) pour différent configurations du ressaut contrôlé par seuil mince pour x et h_1 fixes.

La figure (1.15) représente trois configurations différentes du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite trapézoïdale, obtenues à débit croissant pour une position x de seuil et une hauteur initiale h_1 fixées. Cinq (05) intervalles de rapports γ de compacité, couvrant toute la gamme de points de mesures expérimentales, ont été analysés, correspondant chacun à une configuration intermédiaire du ressaut contrôlé. $\gamma \leq 0,90$; $0,91 \leq \gamma \leq 1,01$; $1,02 \leq \gamma \leq 1,12$; $1,13 \leq \gamma \leq 1,23$; $1,24 \leq \gamma \leq 1,34$; $1,35 \leq \gamma \leq 1,45$. Chaque classe de mesures est représentée par son centre comme l'indique le tableau 1.2:

Tableau 1.2: Centres des classes de valeurs du rapport de compacité.

Classe	$\leq 0,90$	0,91 – 1,01	1,02 – 1,12	1,13 – 1,23	1,24 – 1,34	1,35 – 1,45
Centre	-	0,96	1,07	1,18	1,29	1,40

Les valeurs de γ inférieures ou égales à 0,90 correspondent en fait à la configuration du ressaut classique.

I.5. Analyse des résultats

I.5.1. Rapports des hauteurs conjuguées du ressaut

I.5.1.1. Rapports des hauteurs conjuguées pour $\gamma \leq 0,90$

Comme nous l'avons montré au chapitre précédent, pour une large gamme des nombres de Froude allant de $3,57 \leq Fr_1 \leq 15,72$, la mise en place d'un seuil mince à l'aval du bassin, à une distance x du seuil supérieur à la longueur Lr^* du rouleau, correspondant à un rapport de compacité $\gamma \leq 0,90$, n'a pratiquement aucune influence sur le rapport Y^* des hauteurs conjuguées du ressaut classique. Afin de mettre en évidence cette influence, on s'intéresse aux configurations du ressaut contrôlé relatives aux rapports de compacité $\gamma > 0,90$.

I.5.1.2. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,90$

La figure (1.16) représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements. Les points de mesures expérimentales s'éloignent de la courbe théorique du ressaut classique ($\gamma \leq 0,90$), au fur et au mesure que le rapport de compacité γ augmente. Cet éloignement commence à se faire remarquer à partir de $\gamma \geq 0,96$. Par ailleurs, pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y = aFr_1$. La représentation graphique des points expérimentaux montre que l'équation $Y = f(Fr_1)$ est linéaire pour chaque configuration du ressaut. En outre, pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 , le

rapport des profondeurs conjuguées du ressaut Y diminue alors que le rapport de compacité γ augmente.

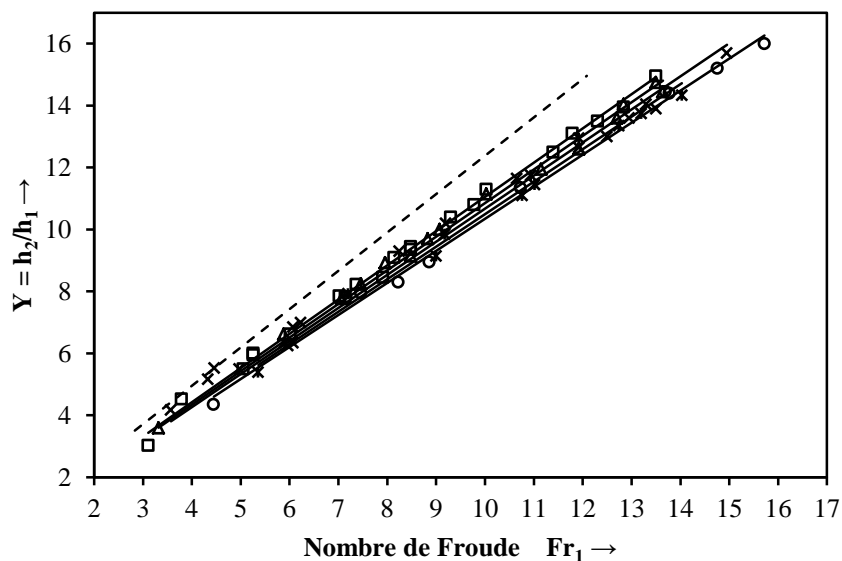


Figure 1.16 : Variation du rapport des profondeurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude Fr_1 et de cinq valeurs du rapport moyen de compacité: $\gamma = 0,96$ (\square); $1,07$ (Δ); $1,18$ (\times); $1,29$ ($*$); $1,40$ (o). (----) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,90$). (—) Courbe d'ajustement.

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$ pour chaque valeur de γ , sont consignées dans le tableau (1.3) :

Tableau 1.3 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$.

γ	Y	Fr_1	γ	Y	Fr_1	γ	Y	Fr_1	γ	Y	Fr_1
0,90	12,50	11,40	1,00	11,30	10,03	1,15	13,00	12,50	1,25	12,95	11,92
0,91	8,45	7,91	1,00	6,63	6,02	1,15	14,05	13,30	1,26	13,35	12,74
0,91	7,80	7,15	1,01	3,03	3,11	1,15	7,00	6,23	1,28	14,34	14,03
0,92	13,95	12,84	1,02	8,93	7,96	1,16	6,35	6,07	1,30	11,45	11,02
0,92	10,40	9,30	1,03	9,70	8,83	1,16	6,85	6,07	1,30	5,40	5,36
0,93	9,10	8,14	1,03	14,05	12,84	1,16	5,17	4,33	1,30	7,93	7,20
0,93	5,50	5,06	1,04	11,15	10,03	1,17	10,20	9,20	1,31	6,35	5,90
0,94	13,10	11,79	1,06	12,60	11,92	1,19	9,30	8,25	1,32	13,75	13,20
0,94	8,23	7,37	1,06	10,00	9,07	1,19	5,50	4,97	1,34	9,85	9,18
0,97	14,95	13,50	1,06	8,25	7,46	1,20	15,70	14,95	1,35	14,45	13,70
0,97	9,45	8,48	1,06	7,77	7,07	1,20	12,65	11,92	1,37	7,95	7,46
0,97	10,80	9,78	1,07	6,63	5,88	1,20	5,53	4,46	1,37	11,35	10,73
0,98	6,00	5,26	1,08	14,75	13,50	1,21	13,90	13,50	1,40	8,30	8,23
0,98	5,95	5,26	1,08	9,15	8,48	1,21	4,18	3,57	1,41	8,95	8,86
0,98	13,50	12,31	1,10	3,60	3,32	1,23	11,65	10,65	1,41	4,35	4,45
0,98	4,53	3,79	1,12	11,95	11,15	1,25	11,75	10,94	1,42	16,00	15,72
0,98	14,45	13,64	1,13	6,25	5,97	1,25	11,10	10,76	1,43	14,40	13,78
0,99	9,35	8,48	1,14	13,60	12,70	1,25	9,15	9,00	1,44	15,20	14,76
0,99	7,85	7,02	1,14	13,60	12,95						

Le tableau (1.4) regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées au nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, pour différents rapports moyens de compacité :

Tableau 1.4 : Coefficients des relations expérimentales issues de l'ajustement de la relation liant Y au nombre de Froude Fr_1 pour différents rapport moyens de compacité γ .

Intervalles des rapports de compacité	Rapports moyens γ de compacité	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,01$	0,96	$Y = 1,10Fr_1$	0,990
$1,02 \leq \gamma \leq 1,12$	1,07	$Y = 1,08Fr_1$	0,981
$1,13 \leq \gamma \leq 1,23$	1,18	$Y = 1,07Fr_1$	0,973
$1,24 \leq \gamma \leq 1,34$	1,29	$Y = 1,05Fr_1$	0,978
$1,35 \leq \gamma \leq 1,45$	1,40	$Y = 1,03Fr_1$	0,981

Le tableau (1.4) montre que la pente à des droites diminue progressivement d'une configuration à l'autre avec un pas quasi constant.

Ces constatations montrent la possibilité de l'existence d'une relation unique de type linéaire rassemblant cinq (05) configurations intermédiaires de ressaut contrôlé, liant le rapport Y des hauteurs conjuguées au nombre de Froude Fr_1 et au rapport γ de compacité du ressaut.

La figure (1.17) montre que le coefficient « a » varie en fonction du rapport γ de compacité γ , suivant une droite d'équation :

$$a = 1,10\gamma^{-0,16}, \quad R^2 = 0,996 \quad (1.4)$$

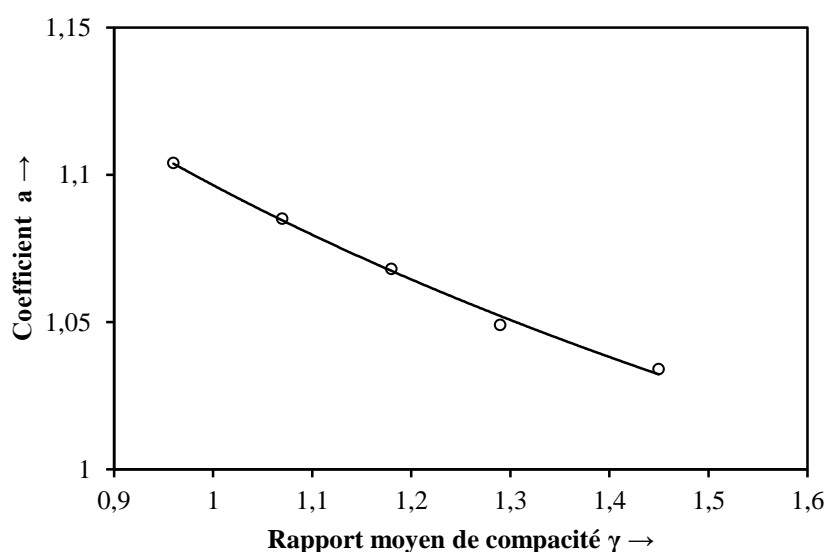


Figure 1.17 : Variation du coefficient a en fonction du rapport γ de compacité. (—) courbe d'ajustement.

Une relation unique de la forme $\psi = f(Fr_1, \gamma)$ est alors proposée, permettant de déterminer le rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident pour toutes les configurations du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$\psi = (1,10\gamma^{-0,16})Fr_1 \quad (1.5)$$

Pour une gamme du nombre de Froude: $3,11 \leq Fr_1 \leq 15,72$, un rapport de forme $M = (mh_1)/b$ pour le canal trapézoïdal: $0,03 \leq M \leq 0,06$ et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,45$. La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale ψ est indiquée sur la figure (1.18).

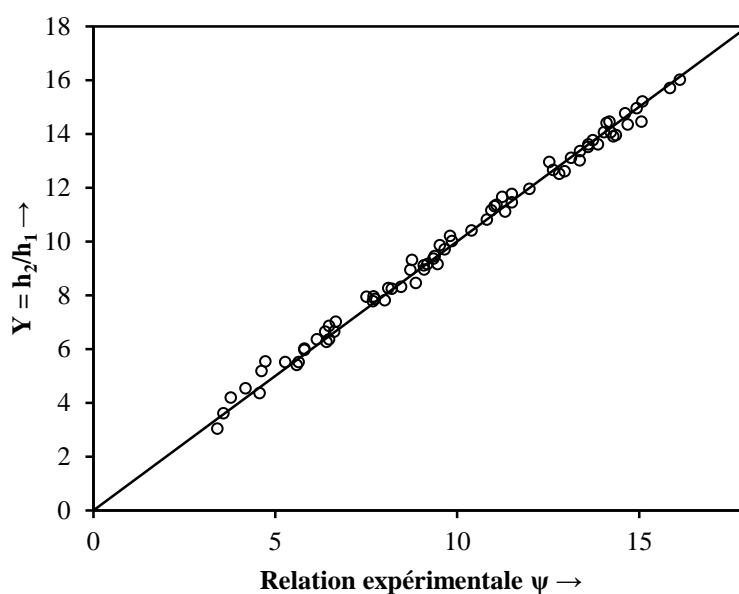


Figure 1.18: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de $\psi = (1,10\gamma^{-0,16})Fr_1$. (o) points expérimentaux. (—) Première bissectrice.

L'erreur : $\Delta Y = |Y - \psi|/Y$ entre les résultats expérimentaux du rapport $Y = h_2/h_1$ et la fonction ψ est donné par le tableau (1.5) :

Tableau 1.5 : Erreur relative entre la relation ψ et les valeurs expérimentaux du rapport des hauteurs conjuguées Y

γ	Y	Fr_1	ψ	$\Delta Y(\%)$	γ	Y	Fr_1	ψ	$\Delta Y(\%)$
0,90	12,50	11,40	12,70	1,57	1,14	13,60	12,95	14,02	3,01
0,91	8,45	7,91	8,80	3,98	1,15	13,00	12,50	13,52	3,86
0,91	7,80	7,15	7,95	1,94	1,15	14,05	13,30	14,39	2,34
0,92	13,95	12,84	14,27	2,22	1,15	7,00	6,23	6,74	3,87
0,92	10,40	9,30	10,33	0,65	1,16	6,35	6,07	6,56	3,19
0,93	9,10	8,14	9,03	0,75	1,16	6,85	6,07	6,56	4,43
0,93	5,50	5,06	5,61	2,04	1,16	5,17	4,33	4,68	10,50
0,94	13,10	11,79	13,07	0,26	1,17	10,20	9,20	9,93	2,71
0,94	8,23	7,37	8,17	0,77	1,19	9,30	8,25	8,89	4,64
0,97	14,95	13,50	14,90	0,31	1,19	5,50	4,97	5,35	2,73
0,97	9,45	8,48	9,36	0,94	1,20	15,70	14,95	16,09	2,42
0,97	10,80	9,78	10,80	0,02	1,20	12,65	11,92	12,83	1,39
0,98	6,00	5,26	5,80	3,45	1,20	5,53	4,46	4,80	15,21
0,98	5,95	5,26	5,80	2,59	1,21	13,90	13,50	14,51	4,23
0,98	13,50	12,31	13,57	0,54	1,21	4,18	3,57	3,84	8,91
0,98	4,53	3,79	4,18	8,40	1,23	11,65	10,65	11,43	1,95
0,98	14,45	13,64	15,04	3,93	1,25	11,75	10,94	11,72	0,29
0,99	9,35	8,48	9,34	0,12	1,25	11,10	10,76	11,52	3,67
0,99	7,85	7,02	7,73	1,54	1,25	9,15	9,00	9,64	5,07
1,00	11,30	10,03	11,03	2,42	1,25	12,95	11,92	12,77	1,44
1,00	6,63	6,02	6,62	0,12	1,26	13,35	12,74	13,63	2,06
1,01	3,03	3,11	3,42	11,32	1,28	14,34	14,03	14,98	4,29
1,02	8,93	7,96	8,74	2,23	1,30	11,45	11,02	11,75	2,52
1,03	9,70	8,83	9,68	0,22	1,30	5,40	5,36	5,71	5,48
1,03	14,05	12,84	14,07	0,17	1,30	7,93	7,20	7,67	3,33
1,04	11,15	10,03	10,98	1,54	1,31	6,35	5,90	6,28	1,07
1,06	12,60	11,92	13,02	3,23	1,32	13,75	13,20	14,04	2,09
1,06	10,00	9,07	9,91	0,93	1,34	9,85	9,18	9,75	1,03
1,06	8,25	7,46	8,15	1,24	1,35	14,45	13,70	14,54	0,60
1,06	7,77	7,07	7,72	0,61	1,37	7,95	7,46	7,90	0,61
1,07	6,63	5,88	6,42	3,34	1,37	11,35	10,73	11,37	0,14
1,08	14,75	13,50	14,71	0,25	1,40	8,30	8,23	8,69	4,54
1,08	9,15	8,48	9,24	1,00	1,41	8,95	8,86	9,35	4,30
1,10	3,60	3,32	3,61	0,29	1,41	4,35	4,45	4,70	7,39
1,12	11,95	11,15	12,10	1,23	1,42	16,00	15,72	16,58	3,50
1,13	6,25	5,97	6,47	3,42	1,43	14,40	13,78	14,52	0,83
1,14	13,60	12,70	13,75	1,11	1,44	15,20	14,76	15,54	2,19

Le tableau 1.5 montre que 90 % des erreurs sont $\leq 5\%$.

I.5.2. Hauteur relative du seuil

La figure 1.19 montre la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident.

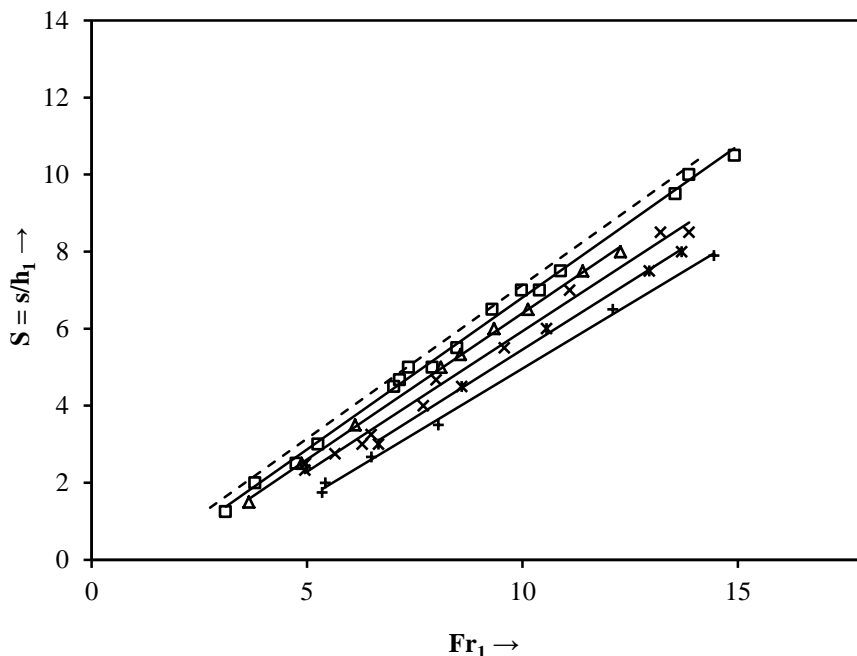


Figure 1.19 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (\square) 0,96 ; (Δ) 1,07 ; (\times) 1,18 ; ($*$) 1,29 ; (\circ) 1,40. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbes d'ajustement.

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation $S = f(Fr_1)$ est linéaire pour chaque configuration du ressaut.

Par ailleurs, pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Pour chaque rapport de compacité γ , les points de mesures expérimentales s'ajustent, par la méthode des moindres carrés, autour d'une droite d'équation $S = aFr_1 - b$.

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $S = f(Fr_1)$ pour chaque valeur de γ , sont consignées dans le tableau (1.6) :

Tableau 1.6 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $S = f(Fr_1)$.

γ	S	Fr_1	γ	S	Fr_1	γ	S	Fr_1
0,91	7,00	10,40	1,02	5,33	8,56	1,19	5,50	9,58
0,91	5,00	7,91	1,03	6,00	9,34	1,19	2,50	4,97
0,91	4,67	7,15	1,05	2,50	4,88	1,20	8,50	13,87
0,92	6,50	9,30	1,05	7,50	11,40	1,23	3,25	6,49
0,93	2,50	4,75	1,06	6,50	10,13	1,25	7,50	12,95
0,94	9,50	13,55	1,06	5,00	8,11	1,27	4,50	8,59
0,94	5,00	7,36	1,07	3,50	6,12	1,30	8,00	13,70
0,96	10,00	13,87	1,10	1,50	3,65	1,30	3,00	6,66
0,96	7,50	10,89	1,12	8,00	12,28	1,34	6,00	10,56
0,97	7,00	9,98	1,13	4,00	7,70	1,35	3,50	8,20
0,98	3,00	5,26	1,14	8,50	13,21	1,35	1,75	5,35
0,98	2,00	3,79	1,16	2,75	5,65	1,38	7,90	14,45
0,99	5,50	8,48	1,16	2,33	4,95	1,41	6,50	12,10
0,99	4,50	7,02	1,17	7,00	11,10	1,42	2,00	5,43
1,00	10,50	14,92	1,18	3,00	6,28	1,45	2,67	6,50
1,01	1,25	3,11	1,18	4,67	8,00			

Le tableau (1.7) regroupe les différents coefficients des courbes d'ajustement des relations expérimentales, liant la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil au nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, pour différents rapports γ de compacité :

Tableau 1.7: Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude Fr_1 pour différents γ de compacité.

Intervalle des rapports de compacité	Rapports moyens de compacité γ	Coefficients « a »	Coefficients « b »	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,01$	0,96	0,79	1,07	0,997
$1,02 \leq \gamma \leq 1,12$	1,07	0,76	1,19	0,999
$1,13 \leq \gamma \leq 1,23$	1,18	0,73	1,36	0,992
$1,24 \leq \gamma \leq 1,34$	1,29	0,71	1,61	0,998
$1,35 \leq \gamma \leq 1,45$	1,40	0,67	1,76	0,998

Les coefficients « a » et « b » varient en fonction du rapport de compacité γ , selon les équations suivantes:

$$a = 1,04 - 0,26\gamma, \quad R^2 = 0,997 \quad (1.6)$$

$$b = 1,63\gamma - 0,52, \quad R^2 = 0,987 \quad (1.7)$$

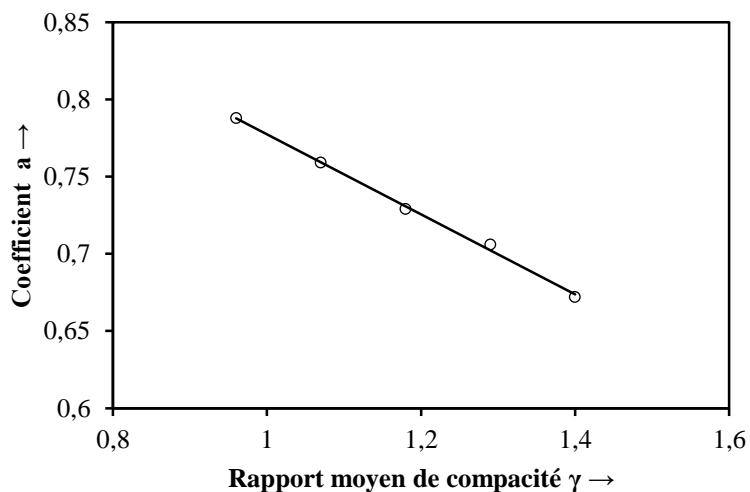


Figure 1.20 : Variation du coefficient « a » en fonction de rapport de compacité γ .

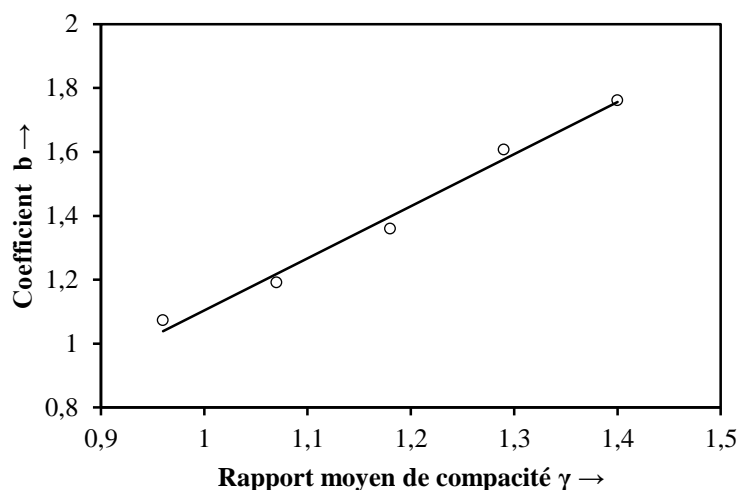


Figure 1.21 : Variation du coefficient « b » en fonction de rapport de compacité γ .

La relation linéaire Proposée $\Pi = f(Fr_1, \gamma)$ traduisant la variation de s/h_1 en fonction de Fr_1 et du rapport γ de compacité, est la suivante :

$$\Pi = (1,04 - 0,26\gamma)Fr_1 - (1,63\gamma - 0,52) \quad (1.8)$$

Pour une gamme du nombre de Froude: $3,11 \leq Fr_1 \leq 14,92$, un rapport de forme $M = (mh_1)/b$ pour le canal trapézoïdal: $0,03 \leq M \leq 0,06$ et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,45$. La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale Π est indiquée sur la figure (1.22).

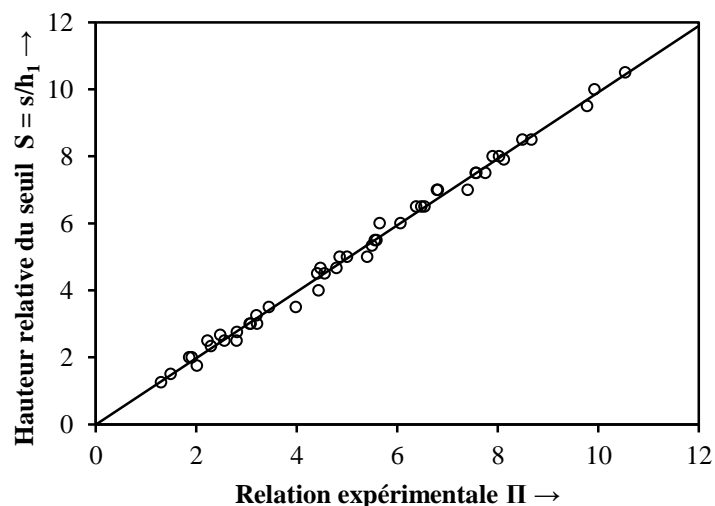


Figure 1.22: Variation des hauteurs relatives $S=s/h_1$ du seuil en fonction de la relation $\Pi = (1,04 - 0,26.\gamma).Fr_1 - (1,63.\gamma - 0,52)$. (o) points expérimentaux. (—) Première bissectrice.

L'erreur $\Delta S = |S - \Pi|/S$, entre les résultats expérimentaux du rapport $S = s/h_1$ et la fonction Π est donné par le tableau 1.8:

Tableau 1.8 : Erreur relative entre la hauteur relative du seuil S et la relation Π .

γ	S	Fr_1	Π	ΔS (%)	γ	S	Fr_1	Π	ΔS (%)
0,91	7,00	10,40	7,37	5,02	1,12	8,00	12,28	7,87	1,64
0,91	5,00	7,91	5,38	7,06	1,13	4,00	7,70	4,41	10,33
0,91	4,67	7,15	4,77	2,13	1,14	8,50	13,21	8,46	0,44
0,92	6,50	9,30	6,45	0,75	1,16	2,75	5,65	2,80	1,65
0,93	2,50	4,75	2,79	11,59	1,16	2,33	4,95	2,28	2,14
0,94	9,50	13,55	9,74	2,55	1,17	7,00	11,10	6,76	3,39
0,94	5,00	7,36	4,83	3,37	1,18	3,00	6,28	3,19	6,48
0,96	10,00	13,87	9,89	1,09	1,18	4,67	8,00	4,45	4,68
0,96	7,50	10,89	7,54	0,57	1,19	5,50	9,58	5,57	1,19
0,97	7,00	9,98	6,78	3,09	1,19	2,50	4,97	2,21	11,70
0,98	3,00	5,26	3,05	1,54	1,20	8,50	13,87	8,64	1,63
0,98	2,00	3,79	1,90	5,23	1,23	3,25	6,49	3,18	2,08
0,99	5,50	8,48	5,53	0,53	1,25	7,50	12,95	7,72	2,96
0,99	4,50	7,02	4,39	2,45	1,27	4,50	8,59	4,54	0,81
1,00	10,50	14,92	10,50	0,01	1,30	8,00	13,70	8,00	0,03
1,01	1,25	3,11	1,29	3,21	1,30	3,00	6,66	3,07	2,33
1,02	5,33	8,56	5,48	2,74	1,34	6,00	10,56	5,63	6,25
1,03	6,00	9,34	6,04	0,64	1,35	3,50	8,20	3,96	13,15
1,05	2,50	4,88	2,55	1,86	1,35	1,75	5,35	2,00	14,42
1,05	7,50	11,40	7,53	0,43	1,38	7,90	14,45	8,09	2,44
1,06	6,50	10,13	6,52	0,29	1,41	6,50	12,10	6,35	2,25
1,06	5,00	8,11	4,98	0,41	1,42	2,00	5,43	1,85	7,74
1,07	3,50	6,12	3,43	1,98	1,45	2,67	6,50	2,46	7,81
1,10	1,50	3,65	1,48	1,51					

Le tableau (1.8) montre que 75 % des erreurs relatives sont $\leq 5\%$.

I.5.3. Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du seuil

Les résultats expérimentaux montrent que chaque intervalle du rapport de compacité correspond à une certaine position relative x/h_2 du seuil, sauf dans le cas du ressaut classique où $\gamma \leq 0,90$ nous avons constaté que, les mesures expérimentales s'ajustent autour d'une courbe de puissance de la forme :

$$x/h_2 = 6,7\gamma^{-0,86} \quad \text{pour } 0 \leq \gamma \leq 0,90 \quad (1.9)$$

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure (1.23).

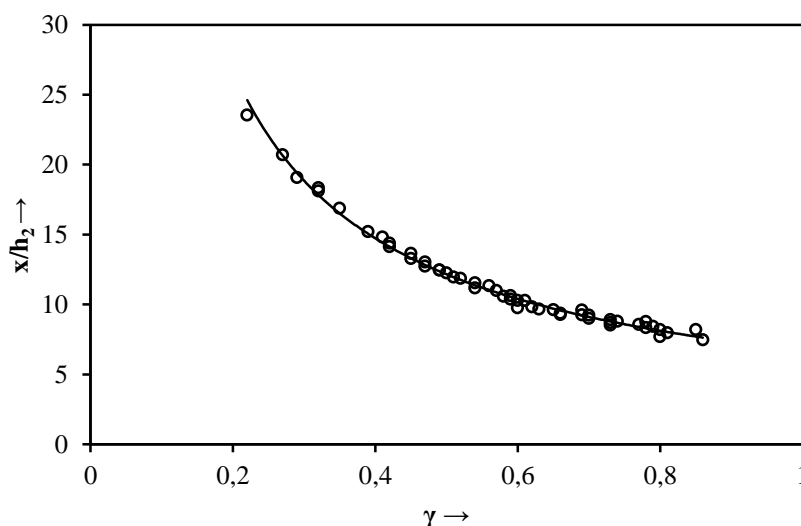


Figure 1.23: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ pour le ressaut classique ($\gamma \leq 0,90$). (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.

Concernant les autres intervalles de valeurs moyennes de compacité γ , les variations de la position relative du seuil sont données par le tableau (1.9) :

Tableau 1.9 : Variation de la position relative du seuil x/h_2 pour chaque intervalle du rapport de compacité γ .

Intervalle de variation de γ	Centre de la classe	Valeur moyenne de x/h_2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,01$	0,96	6,49
$1,02 \leq \gamma \leq 1,12$	1,07	5,74
$1,13 \leq \gamma \leq 1,23$	1,18	5,18
$1,24 \leq \gamma \leq 1,34$	1,29	4,82
$1,35 \leq \gamma \leq 1,45$	1,40	4,47
$1,46 \leq \gamma \leq 1,56$	1,51	4,14

La représentation graphique de la fonction $x/h_2 = f(\gamma)$ aboutit à une courbe de puissance de la forme :

$$x/h_2 \approx 6,17/\gamma \quad \text{Pour : } 0,91 \leq \gamma \leq 1,56 \quad (1.10)$$

Et un rapport de forme $M = (mh_1)/b$ pour le canal trapézoïdal: $0,03 \leq M \leq 0,06$.

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure (1.24).

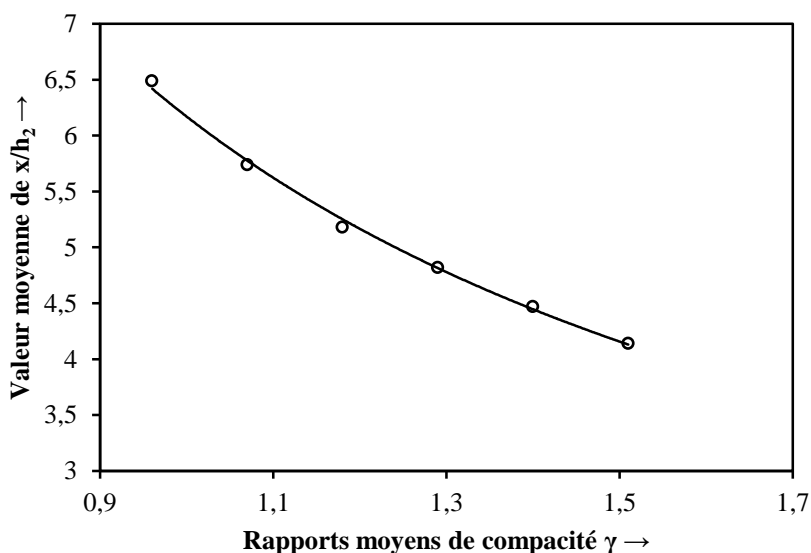


Figure 1.24: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.

Pour un rapport γ de compacité égale à l'unité, l'équation (1.10) donne un rapport $Lr^*/h_2 = 6,17$.

1.5.4. Profil de surface du ressaut

Pour la gamme de h_1 variant de 2 à 5 cm, nous avons représenté le profil de surface généralisé $y = f(x)$, telles que : $y = [h(x) - h_1] / [h_2 - h_1]$, $X = x/L_r$.

La figure (1.25) représente les profils de surface du ressaut relatif à chaque valeur de compacité du ressaut, à savoir : $\gamma \leq 0,90$; $\gamma = 0,96$; $\gamma = 1,07$; $\gamma = 1,18$; $\gamma = 1,29$; $\gamma = 1,40$.

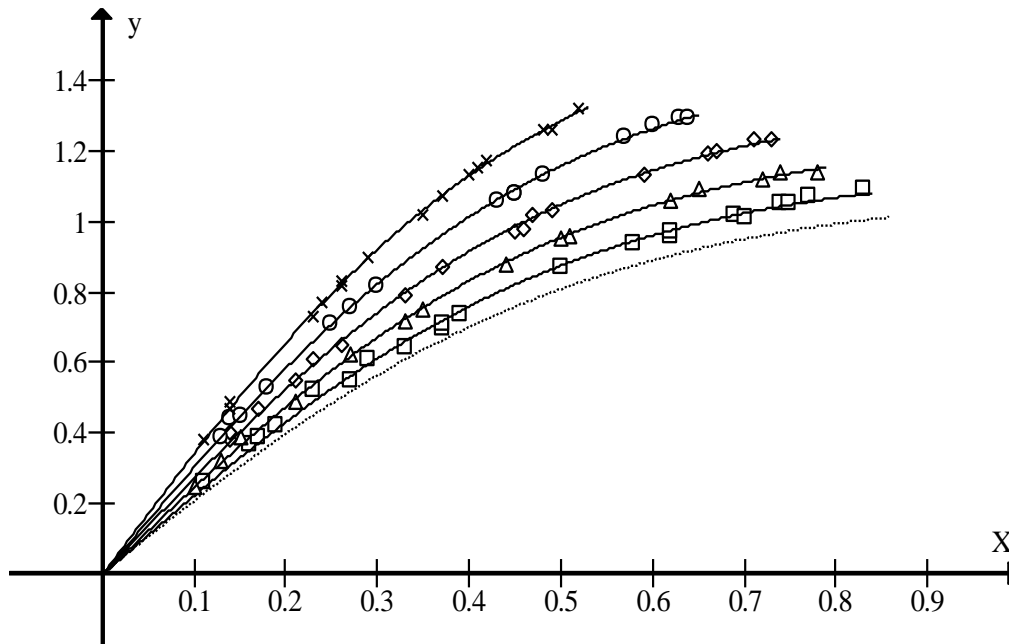


Figure 1.25 : Variation expérimentales du profil de surface [$y = f(X)$] du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite trapézoïdal, pour Cinq rapports de compacité. (...) Courbe correspond au ressaut classique selon l'équation $y = 1,09Tanh [1,90X]$ ($\gamma \leq 0,90$). (—) courbes d'ajustements pour (\square) $\gamma=0,96$; (Δ) $\gamma=1,07$; (\diamond) $\gamma=1,18$; (\circ) $\gamma=1,29$ et (\times) $\gamma=1,40$.

La figure (1.25) nous montre que les points expérimentaux s'ajustent au tour d'une courbe de tangente hyperbolique de la forme $y = aTanh [bX]$.

La courbe en traitait correspondant au profil du ressaut classique ($\gamma \leq 0,90$) possède une allure courbé, celle-ci se redresse progressivement en allant vers un rapport γ de compacité supérieur, jusqu'à ce qu'elle avoisine une forme linéaire pour un fort rapport de compacité.

L'analyse des points expérimentaux correspondant au ressaut classique ($\gamma \leq 0,90$) par le logiciel Graph (Version 4.4.2), à montrer que la variation de la fonction $y = f(X)$ est tangente hyperbolique selon l'équation (1.11) :

$$y = 1,09Tanh [1,90X] \quad (1.11)$$

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$ pour chaque valeur de γ , sont consignées dans le tableau (1.10) :

Tableau 1.10: Valeurs expérimentales de X et de y pour chaque valeurs de compacité γ de ressaut contrôlé.

γ	X	y	γ	X	y	γ	X	y
0,91	0,33	0,64	1,05	0,15	0,39	1,25	0,64	1,29
0,91	0,62	0,96	1,05	0,27	0,62	1,25	0,15	0,45
0,91	0,37	0,71	1,05	0,10	0,25	1,26	0,18	0,53
0,91	0,17	0,39	1,06	0,50	0,95	1,26	0,30	0,82
0,93	0,74	1,05	1,06	0,72	1,12	1,26	0,45	1,08
0,93	0,29	0,61	1,10	0,65	1,09	1,26	0,63	1,29
0,94	0,83	1,09	1,10	0,33	0,72	1,27	0,57	1,24
0,94	0,19	0,42	1,10	0,13	0,32	1,30	0,48	1,13
0,94	0,70	1,01	1,14	0,71	1,23	1,32	0,14	0,44
0,94	0,39	0,74	1,15	0,73	1,23	1,32	0,25	0,71
0,94	0,62	0,97	1,16	0,49	1,03	1,32	0,43	1,06
0,96	0,11	0,26	1,16	0,37	0,87	1,32	0,60	1,27
0,96	0,16	0,37	1,17	0,14	0,38	1,35	0,52	1,32
0,96	0,23	0,52	1,18	0,59	1,13	1,35	0,42	1,17
0,96	0,27	0,55	1,18	0,45	0,97	1,35	0,37	1,07
0,96	0,75	1,05	1,18	0,23	0,61	1,35	0,29	0,90
0,98	0,69	1,02	1,18	0,14	0,40	1,35	0,11	0,38
0,98	0,50	0,87	1,21	0,17	0,47	1,38	0,14	0,49
0,99	0,58	0,94	1,21	0,26	0,65	1,38	0,26	0,83
0,99	0,77	1,07	1,21	0,47	1,02	1,38	0,41	1,15
1,00	0,37	0,70	1,21	0,67	1,20	1,41	0,14	0,47
1,03	0,21	0,49	1,23	0,66	1,19	1,41	0,23	0,73
1,03	0,78	1,14	1,23	0,46	0,98	1,41	0,40	1,13
1,03	0,35	0,75	1,23	0,33	0,79	1,42	0,49	1,26
1,03	0,62	1,06	1,23	0,21	0,55	1,42	0,35	1,02
1,03	0,44	0,88	1,25	0,13	0,39	1,42	0,24	0,77
1,03	0,51	0,96	1,25	0,27	0,76	1,45	0,48	1,26
1,03	0,74	1,14	1,25	0,45	1,08	1,45	0,26	0,82

Le tableau (1.11) regroupe les différents coefficients des courbes d'ajustement des relations expérimentales, liant $y = (h_x - h_1)/(h_2 - h_1)$ du surface du ressaut au rapport relative $X = x/Lr^*$, pour différents rapports moyennes de compacité γ :

Tableau 1.11: Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant y au nombre de Froude X pour différents γ de compacité.

Intervalles des rapports de compacité	Rapports moyens γ de compacité	Équations des courbes d'ajustements	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,01$	0,96	$y = 1,17 \text{Tanh} [1,94X]$	0,977
$1,02 \leq \gamma \leq 1,12$	1,07	$y = 1,25 \text{Tanh} [1,99X]$	0,980
$1,13 \leq \gamma \leq 1,23$	1,18	$y = 1,36 \text{Tanh} [2,04X]$	0,971
$1,24 \leq \gamma \leq 1,34$	1,29	$y = 1,49 \text{Tanh} [2,07X]$	0,990
$1,35 \leq \gamma \leq 1,45$	1,40	$y = 1,63 \text{Tanh} [2,14X]$	0,989

La figure (1.26) montre la variation du coefficient « a » en fonction du rapport γ de compacité.

Ce coefficient varié en fonction du rapport de compacité γ , suivant une droite d'équation :

$$a = 1,05\gamma + 0,14 \quad \text{pour } 0,91 \leq \gamma \leq 1,45 \quad (1.12)$$

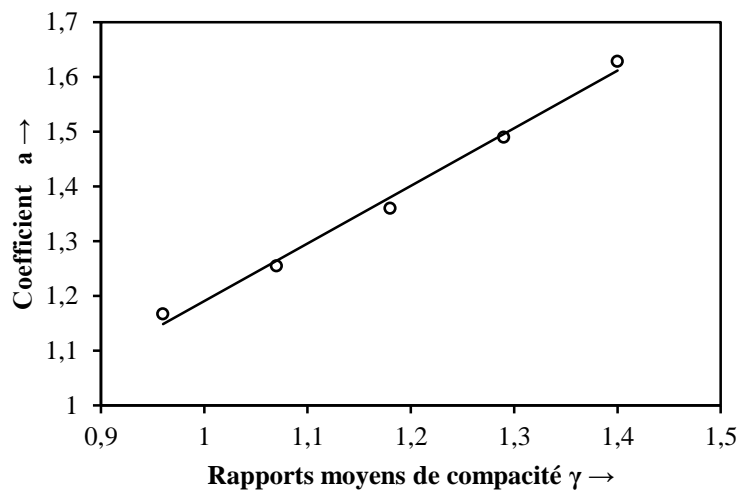


Figure 1.26 : Variation du coefficient « a » en fonction du rapport γ de compacité. (—) courbe d'ajustement.

La figure (1.27) montre la variation du coefficient « b » en fonction du rapport γ de compacité. Ce coefficient varié en fonction du rapport de compacité γ , suivant une droite d'équation :

$$b = 0,43\gamma + 1,53 \quad \text{pour } 0,91 \leq \gamma \leq 1,45 \quad (1.13)$$

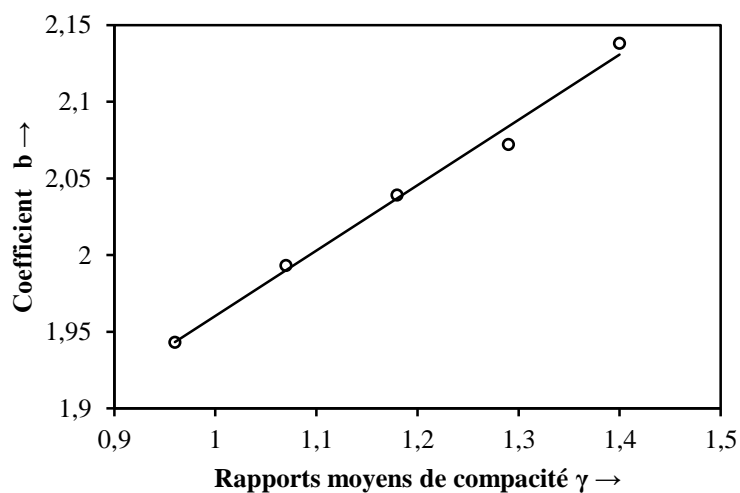


Figure 1.27 : Variation du coefficient « b » en fonction du rapport γ de compacité. (—) courbe d'ajustement.

Une relation unique de la forme $\Psi = f(X, \gamma)$ est alors proposée, permettant de déterminer le profil de surface généralisé du ressaut tenant compte du rapport γ de compacité du ressaut.

Les points expérimentaux se situent alors sur une courbe d'équation :

$$\Psi = (1,05\gamma + 0,14) \operatorname{Tanh} [(0,43\gamma + 1,53) X] \quad (1.14)$$

Pour un rapport de forme $M = (mh_1)/b$ pour le canal trapézoïdal: $0,03 \leq M \leq 0,06$ et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,45$.

Si l'on remplace, dans la relation (1.14), le rapport γ par 0,90 on retrouve l'équation de la courbe en pointiez relative au ressaut classique $y = 1,09 \operatorname{Tanh} (1,89X)$ (figure 1.25).

L'équation permet de définir le profil de surface du ressaut contrôlé par seuil mince et évoluant dans un canal trapézoïdal, pour différent rapport γ de compacité variant de 0,90 à 1,45. La représentation graphique de y en fonction de Ψ est donnée par la figure (1.28).

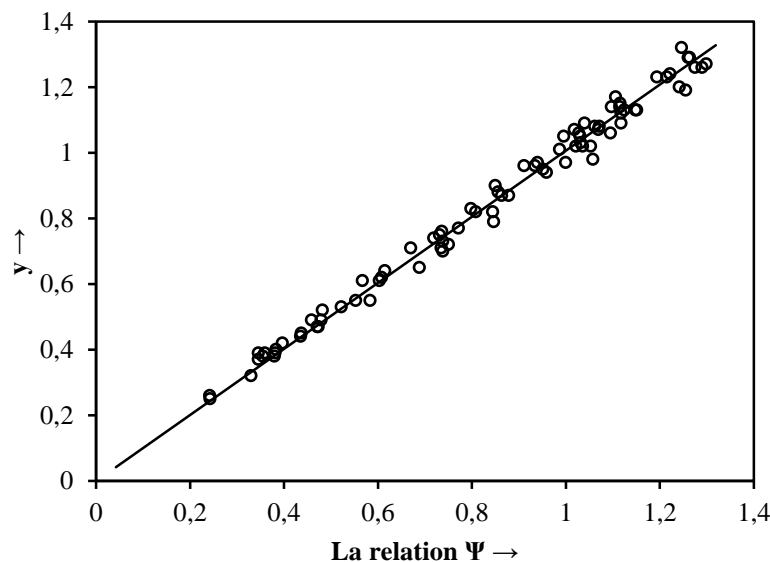


Figure 1.28: Variation expérimentale de y en fonction de Ψ , pour différent configuration de ressaut contrôlé dans un canal trapézoïdal. (—) première bissectrice. (o) points expérimentaux. $\Psi = (1,05\gamma + 0,14) \operatorname{Tanh} [(0,43\gamma + 1,53) X]$.

La figure (1.28) montre que la majorité des points d'ajustements s'accumule autour de la première bissectrice ce qui minimise l'erreur relative entre y et la relation Ψ .

L'erreur : $\Delta y = [|y - \Psi|]/y$, entre les résultats expérimentaux du rapport $y = [h(x) - h_1]/[h_2 - h_1]$ et la fonction Ψ est donné par le tableau 1.12 :

Tableau 1.12 : Erreur relative entre les valeurs expérimentales de y et les valeurs de la relation théorique obtenue Ψ .

γ	X	y	Ψ	Δy (%)	γ	X	y	Ψ	Δy (%)
0,91	0,33	0,64	0,61	3,92	1,18	0,45	0,97	1,00	3,06
0,91	0,62	0,96	0,91	5,10	1,18	0,23	0,61	0,60	1,13
0,91	0,37	0,71	0,67	5,61	1,18	0,14	0,40	0,38	4,19
0,91	0,17	0,39	0,35	11,30	1,21	0,17	0,47	0,47	0,63
0,93	0,74	1,05	1,00	5,15	1,21	0,26	0,65	0,69	5,91
0,93	0,29	0,61	0,57	6,99	1,21	0,47	1,02	1,05	3,23
0,94	0,83	1,09	1,04	4,54	1,21	0,67	1,20	1,24	3,47
0,94	0,19	0,42	0,40	5,52	1,23	0,66	1,19	1,26	5,48
0,94	0,70	1,01	0,99	2,29	1,23	0,46	0,98	1,06	7,95
0,94	0,39	0,74	0,72	2,79	1,23	0,33	0,79	0,85	7,19
0,94	0,62	0,97	0,94	3,09	1,23	0,21	0,55	0,58	6,08
0,96	0,11	0,26	0,24	6,97	1,25	0,13	0,39	0,38	2,19
0,96	0,16	0,37	0,35	6,46	1,25	0,27	0,76	0,74	3,11
0,96	0,23	0,52	0,48	7,35	1,25	0,45	1,08	1,06	1,65
0,96	0,27	0,55	0,55	0,53	1,25	0,64	1,29	1,26	2,23
0,96	0,75	1,05	1,03	1,84	1,25	0,15	0,45	0,44	2,93
0,98	0,69	1,02	1,02	0,16	1,26	0,18	0,53	0,52	1,52
0,98	0,50	0,87	0,88	1,02	1,26	0,30	0,82	0,81	1,42
0,99	0,58	0,94	0,96	2,04	1,26	0,45	1,08	1,07	0,81
0,99	0,77	1,07	1,07	0,02	1,26	0,63	1,29	1,26	2,04
1,00	0,37	0,70	0,74	5,51	1,27	0,57	1,24	1,22	1,47
1,03	0,21	0,49	0,48	2,17	1,30	0,48	1,13	1,15	1,66
1,03	0,78	1,14	1,11	2,20	1,32	0,14	0,44	0,44	0,93
1,03	0,35	0,75	0,73	2,47	1,32	0,25	0,71	0,73	3,46
1,03	0,62	1,06	1,03	3,05	1,32	0,43	1,06	1,10	3,33
1,03	0,44	0,88	0,86	2,70	1,32	0,60	1,27	1,30	2,30
1,03	0,51	0,96	0,93	2,69	1,35	0,52	1,32	1,25	5,58
1,03	0,74	1,14	1,10	3,74	1,35	0,42	1,17	1,11	5,47
1,05	0,15	0,39	0,36	7,93	1,35	0,37	1,07	1,02	4,86
1,05	0,27	0,62	0,61	1,88	1,35	0,29	0,90	0,85	5,53
1,05	0,10	0,25	0,24	2,71	1,35	0,11	0,38	0,36	6,48
1,06	0,50	0,95	0,95	0,14	1,38	0,14	0,49	0,46	6,30
1,06	0,72	1,12	1,12	0,16	1,38	0,26	0,83	0,80	3,83
1,10	0,65	1,09	1,12	2,53	1,38	0,41	1,15	1,12	2,98
1,10	0,33	0,72	0,75	4,22	1,41	0,14	0,47	0,47	0,19
1,10	0,13	0,32	0,33	3,13	1,41	0,23	0,73	0,74	1,11
1,14	0,71	1,23	1,19	2,90	1,41	0,40	1,13	1,12	0,50
1,15	0,73	1,23	1,22	1,20	1,42	0,49	1,26	1,28	1,22
1,16	0,49	1,03	1,03	0,16	1,42	0,35	1,02	1,04	1,54
1,16	0,37	0,87	0,86	0,72	1,42	0,24	0,77	0,77	0,21
1,17	0,14	0,38	0,38	0,11	1,45	0,48	1,26	1,29	2,38
1,18	0,59	1,13	1,15	1,90	1,45	0,26	0,82	0,84	3,02

Le tableau (1.12) montre que 77% des erreurs relatives sont $\leq 5\%$.

I.6. Conclusion

À travers cette étude, nous avons examiné expérimentalement l'effet du seuil sur la configuration du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal; et on a abouti à des relations empiriques adimensionnelles exprimant la variation de la hauteur relative du seuil S ainsi que celle du rapport des hauteurs conjuguées Y , en fonction du nombre de Froude Fr_1 et du facteur de compacité γ défini comme le rapport de la longueur du rouleau Lr^* (classique) et de la position x du seuil.

Concernant la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées, nous avons constaté que pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, le rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Le deuxième résultat obtenu sur la variation de la hauteur relative du seuil S nous avons constaté que pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative du seuil S diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Ces constatations donnent plus d'avantages à notre bassin de dissipation en ce qui concerne sa conception. Les résultats expérimentaux de $y = f(X)$ du profil de la surface du ressaut, montre que cette fonction est de type tangente hyperbolique et pour un rapport de compacité important ; la distance de la position du seuil diminue ce qui donne une configuration minimale du bassin de dissipation.

Chapitre II

Compacité du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal brusquement élargi

Chapitre II

Compacité du ressaut hydraulique en canal trapézoïdal brusquement élargi

II.1. Introduction

Le deuxième chapitre est consacré d'analyser par la voie de l'expérimentations, les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince, évoluant dans un canal trapézoïdal brusquement élargi à un canal rectangulaire. En basant sur les résultats du premier chapitre de l'étude expérimentale, en examinera l'effet du rapport de compacité sur les différents paramètres caractérisant ce type de ressaut.

L'objectif principal est de trouver les relations fonctionnelles, exprimées en termes adimensionnels, liant le rapport de compacité aux : rapport des hauteurs conjuguées, hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, la position relative du seuil et le profil de surface du ressaut.

II.2. Description du modèle expérimental

Dans le premier chapitre nous avons signalé que le canal de mesure de section trapézoïdale et de longueur 5 m est relié, dans sa partie aval, à un second canal de section droite rectangulaire (figure 2.1), où le passage d'une section à l'autre ce fait à travers un élargissement brusque (figure 2.2). Donc presque, le même dispositif que le premier chapitre, mais dans ce cas le ressaut sera créé de la part et d'autres au niveau de l'élargissement brusque.

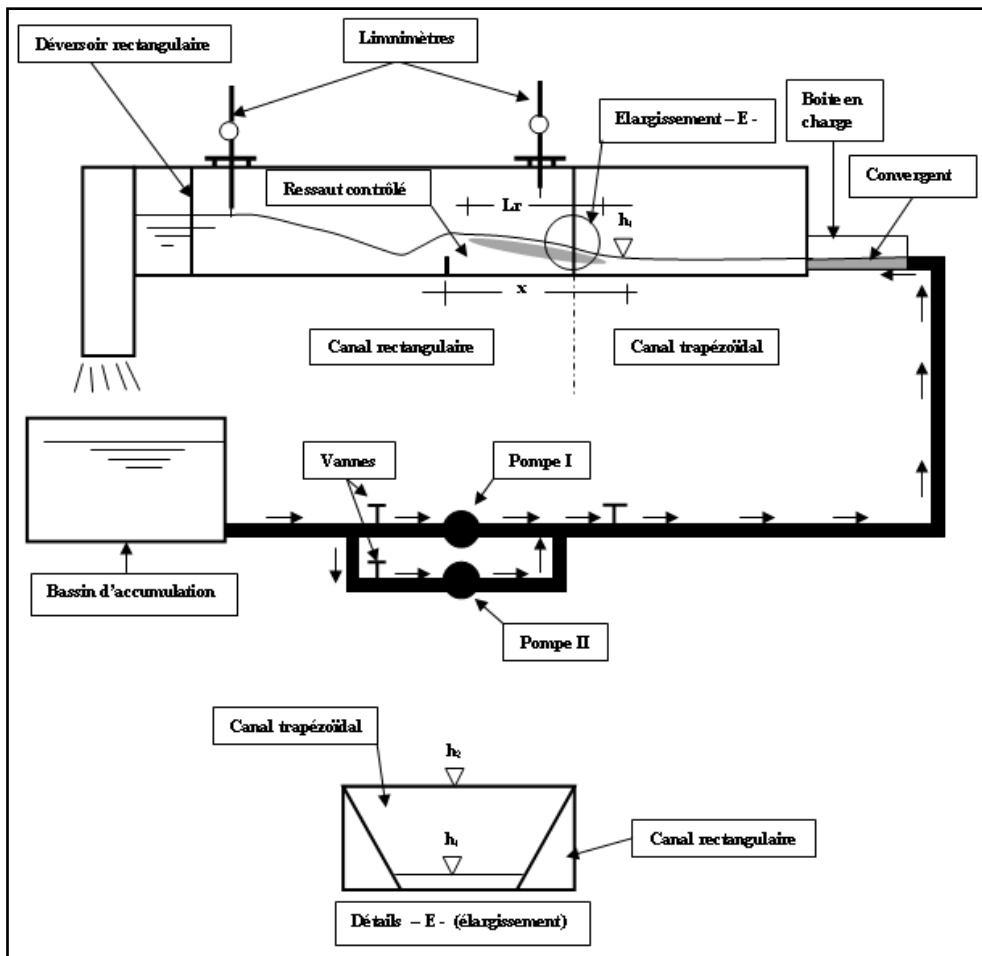


Figure 2.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section trapézoïdal brusquement élargie à un canal rectangulaire, ayant servi à l'expérience.



Figure 2.2 : Photographie du canal de mesure de section trapézoïdal brusquement élargi à un canal rectangulaire.

II.2.1. Mesure du débit, niveau d'eau et longueurs caractéristiques

Le même appareillage utilisé pour les différentes mesures que dans le cas du canal trapézoïdal (figure 2.5.b).

II.2.2. Seuils

Les seuils utilisés (figure 2.3) dans notre dispositif expérimental, sont façonnés de fer en forme rectangulaire, leurs fixations est effectué par un support métallique mince (figure 2.4). Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures, nous avons préparé 10 seuils minces de différentes hauteurs: $s = 5 \text{ cm}$; 6 cm ; 7 cm ; 8 cm ; 9 cm ; 10 cm ; 11 cm ; 12 cm ; 13 cm ; 14 cm .



Figure 2.3 : Photographie des seuils minces testés.

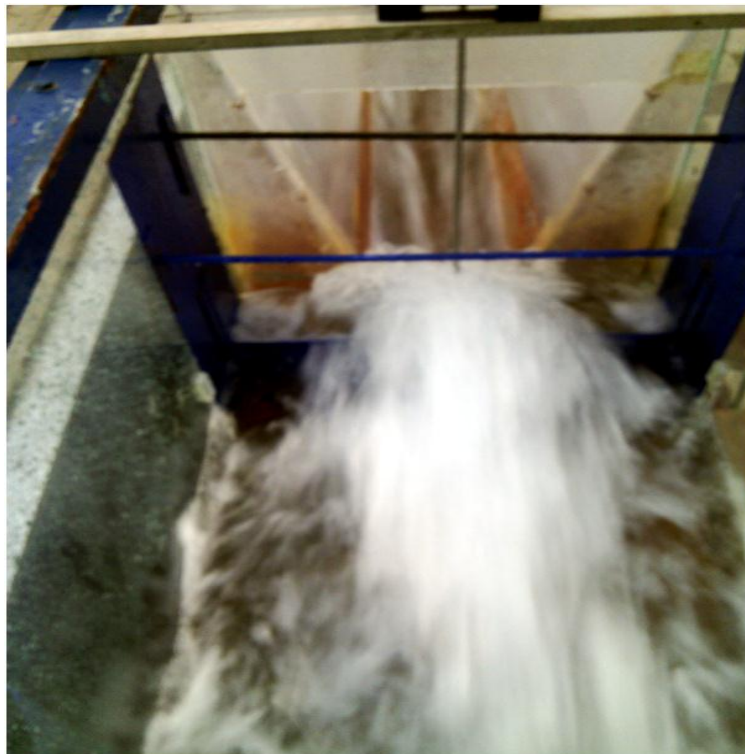


Figure 2.4 : Photographie de support du seuil.

II.3. Description des essais

II.3.1. Position du problème

Comme nous l'avons indiqué précédemment, le déplacement du seuil vers l'amont provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci. Donc

l'objectif est de créer le ressaut au niveau de l'élargissement. C.-à-d. son amont est dans le canal trapézoïdal et l'aval du ressaut se situe dans le canal rectangulaire (figure 2.5.a).



Figure 2.5 : Photographies du canal trapézoïdal brusquement élargi. (a) Élargissement brusque trapèze-rectangle. (b) Déversoir rectangulaire pour la mesure du débit.

Les différentes configurations du ressaut peuvent être également obtenues, à débit croissant, par la fixation de la hauteur s de seuil ce qui engendre une diminution progressive de la distance x entre le pied du ressaut et la position du seuil. Cette diminution est suivie d'une légère augmentation de la hauteur initiale h_1 . Cette dernière n'est significative que pour des distances Δx relativement importantes (figure 2.6).

Donc pour des nombres de Froude croissant on obtient des différentes configurations du ressaut en canal trapézoïdal brusquement élargi (figure 2.6).



$$Fr_1 = 4,5 \quad s = 6 \text{ cm}, \quad h_2 = 12,4 \text{ cm}, \quad \gamma = 0,79$$



$$Fr_1 = 7,07 \quad s = 10 \text{ cm}, \quad h_2 = 15,1 \text{ cm}, \quad \gamma = 1,32$$



$$Fr_1 = 8,18 \quad s = 12 \text{ cm}, \quad h_2 = 17,5 \text{ cm}, \quad \gamma = 1,55$$

Figure 2.6: Trois configurations différentes du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite trapézoïdale brusquement élargi, obtenues à débit croissant pour une position x de seuil et une hauteur initiale h_1 fixées.

Cinq (05) intervalles de rapports γ de compacité, couvrant toute la gamme de points de mesures expérimentales, ont été analysés, correspondant chacun à une configuration intermédiaire du ressaut contrôlé.

$\gamma \leq 0,90$; $0,91 \leq \gamma \leq 1,11$; $1,12 \leq \gamma \leq 1,32$; $1,33 \leq \gamma \leq 1,53$; $1,54 \leq \gamma \leq 1,74$; $1,75 \leq \gamma \leq 1,95$.

Chaque classe de mesures est représentée par son centre comme l'indique le tableau (2.1):

Tableau 2.1 : Centres des classes de valeurs du rapport de compacité.

Classe	$\leq 0,90$	0,91 – 1,11	1,12 – 1,32	1,33 – 1,53	1,54 – 1,74	1,75 – 1,95
Centre	-	1,01	1,22	1,43	1,64	1,85

Les valeurs de γ inférieures ou égales à 0,9 correspondent en fait à la configuration du ressaut classique.

Pour un échantillon représentatif ont déterminent: le débit Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la hauteur du seuil s et la position x du seuil par rapport au pied du ressaut. Ceux-ci

permettent de composer les produits adimensionnels suivants : le nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident (canal trapézoïdal) le rapport $Y = h_2/h_1$ du seuil et le rapport de compacité $\gamma = Lr^*/x$, Lr^* étant la longueur du rouleau du ressaut classique qu'est donné par la relation expérimentale de la longueur relative du rouleau classique $Lr^*/h_1=f(Fr_1)$. Avec $M = mh_1/b$ (rapport de forme pour le canal trapézoïdal).

La représentation graphique des valeurs expérimentales de $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$, est donnée par la figure (2.7):

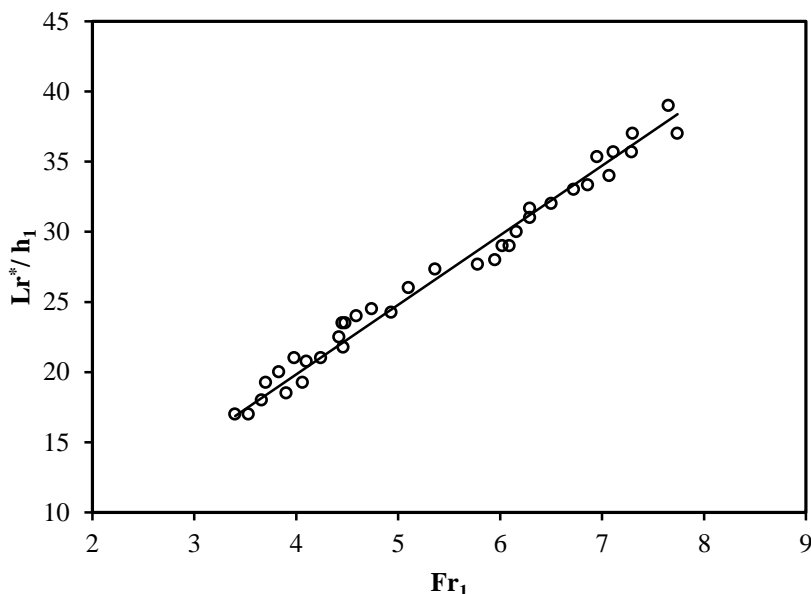


Figure 2.7 : Variation expérimental de $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$. (—) Courbe d'ajustement.

L'ajustement des points de mesures expérimentaux a donné une droite de l'équation (2.1) suivante :

$$Lr^*/h_1 = 4,96Fr_1 \tag{2.1}$$

Les résultats des mesures expérimentaux de Lr^*/h_1 en fonction du nombre de Froude Fr_1 , sont donnés par le tableau (2.2) :

Tableau 2.2 : Valeurs expérimentales exprimant la relation entre Lr^*/h_1 et le nombre de Froude.

Lr/h_1	Fr_1	Lr/h_1	Fr_1	Lr/h_1	Fr_1	Lr/h_1	Fr_1	Lr/h_1	Fr_1	Lr/h_1	Fr_1
26,00	5,10	28,00	5,95	37,00	7,74	34,00	7,07	24,25	4,93	17,00	3,53
27,33	5,36	29,00	6,09	27,67	5,78	17,00	3,40	18,50	3,90	19,25	3,70
35,33	6,95	31,00	6,29	29,00	6,02	18,00	3,66	19,25	4,06	21,00	3,98
35,67	7,11	32,00	6,50	30,00	6,16	20,00	3,83	21,00	4,24	23,50	4,45
37,00	7,30	33,00	6,72	31,67	6,29	20,75	4,10	22,50	4,42	24,00	4,59
39,00	7,65	35,67	7,29	33,33	6,86	21,75	4,46	23,50	4,48	24,50	4,74

II.4. Analyse des résultats

II.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,9$

La figure (2.8) représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements. Les points de mesures expérimentales s'éloignent de la courbe théorique du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$), au fur et au mesure que le rapport de compacité γ augmente. Cet éloignement commence à se faire remarquer à partir de ($\gamma \geq 1,22$).

Par ailleurs, pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y = aFr_1 + b$.

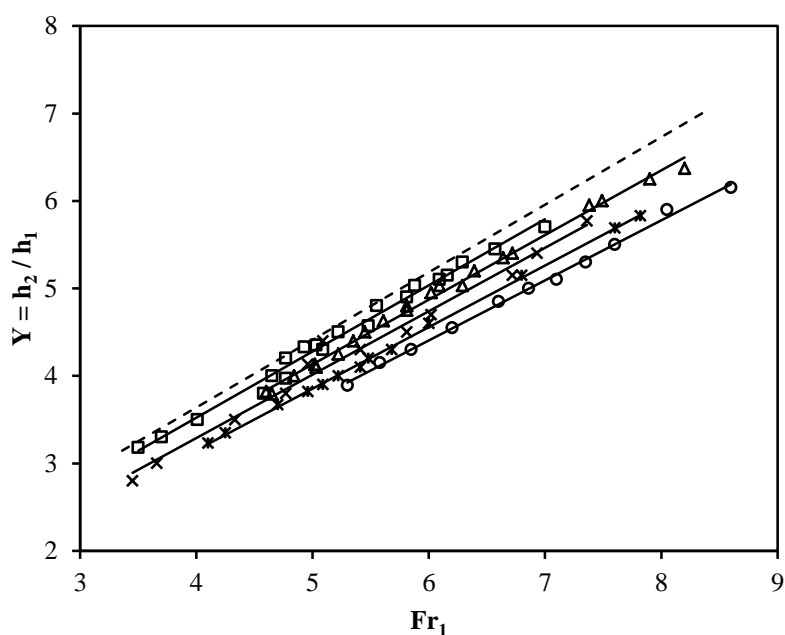


Figure 2.8 : (—) Variation de Y en fonction Fr_1 pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité : γ : (\square) 0,96 ; (Δ) 1,07 ; (\times) 1,18 ; ($*$) 1,29 ; (o) 1,40. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$).

Pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente. Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$ pour chaque valeur de γ , sont consignées dans le tableau (2.3):

Tableau 2.3 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$.

0,92	4,90	5,81	1,17	5,40	6,72	1,49	4,70	6,02
0,92	3,18	3,50	1,17	6,00	7,49	1,54	3,67	4,70
0,92	3,30	3,70	1,20	3,79	4,65	1,56	3,90	5,09
0,93	4,35	5,03	1,21	4,00	4,84	1,56	3,23	4,10
0,96	4,80	5,55	1,22	4,63	5,61	1,57	4,00	5,22
0,97	5,15	6,16	1,22	4,75	5,81	1,59	5,83	7,82
0,98	4,00	4,65	1,22	5,03	6,29	1,61	5,69	7,60
0,99	3,80	4,58	1,23	6,25	7,90	1,62	3,82	4,96
1,00	4,20	4,77	1,25	4,13	5,02	1,63	4,10	5,41
1,00	5,70	7,00	1,25	4,10	5,03	1,64	3,35	4,25
1,00	3,50	4,01	1,29	4,25	5,22	1,65	5,15	6,80
1,02	5,03	5,88	1,29	5,35	6,64	1,68	4,20	5,48
1,03	5,45	6,57	1,29	5,95	7,38	1,71	4,60	6,00
1,04	3,97	4,77	1,32	5,03	6,09	1,74	4,30	5,68
1,04	4,33	4,93	1,32	5,20	6,39	1,75	3,89	5,30
1,06	4,57	5,48	1,33	3,50	4,33	1,77	4,15	5,58
1,06	5,10	6,09	1,33	4,40	5,09	1,77	4,30	5,85
1,07	4,30	5,09	1,34	4,30	5,41	1,78	4,85	6,60
1,10	5,30	6,29	1,37	2,80	3,45	1,80	5,00	6,86
1,10	4,50	5,22	1,43	5,77	7,36	1,82	5,10	7,10
1,12	4,40	5,35	1,44	4,50	5,81	1,86	5,30	7,35
1,12	6,37	8,20	1,45	5,40	6,93	1,89	5,50	7,60
1,13	4,80	5,81	1,45	3,00	3,66	1,91	4,55	6,20
1,15	3,82	4,60	1,46	3,80	4,77	1,92	5,90	8,05
1,15	4,50	5,45	1,46	5,15	6,72	1,95	6,15	8,60
1,17	4,95	6,02	1,49	4,13	4,96			

Le tableau (2.4) regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées au nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, pour différents rapports de compacité :

Tableau 2.4 : Coefficients des relations expérimentales issues de l'ajustement de la relation liant Y au nombre de Froude Fr_1 pour différents rapport γ de compacité.

Intervalles des rapports de compacité	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	$Y = 0,76Fr_1 + 0,50$	0,998
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	$Y = 0,74Fr_1 + 0,44$	0,995
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	$Y = 0,72Fr_1 + 0,39$	0,982
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	$Y = 0,70Fr_1 + 0,34$	0,999
$1,75 \leq \gamma \leq 1,95$	$Y = 0,69Fr_1 + 0,28$	0,996

Le tableau (2.4) montre que la pente « a » des droites diminue progressivement d'une configuration à l'autre avec un pas quasi constant. Ces constatations montrent la possibilité de l'existence d'une relation unique de type linéaire de la forme $Y = aFr_1 + b$, rassemblant cinq

(05) configurations intermédiaires de ressaut contrôlé, liant le rapport Y des hauteurs conjuguées au nombre de Froude Fr_1 et au rapport γ de compacité du ressaut.

Les figures (2.9) et (2.10) montrent que les coefficients « a » et « b » des droites d'ajustements, varient en fonction du rapport de compacité γ , suivant des droites d'équations :

$$a = -0,09\gamma + 0,84, \quad R^2 = 0,987 \quad (2.2)$$

$$b = -0,26\gamma + 0,76, \quad R^2 = 0,998 \quad (2.3)$$

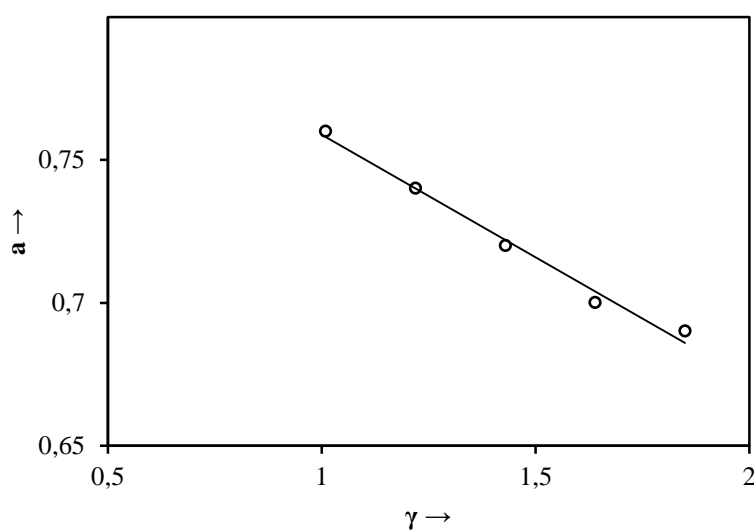


Figure 2.9 : (—) Variation du coefficient « a » en fonction de γ .

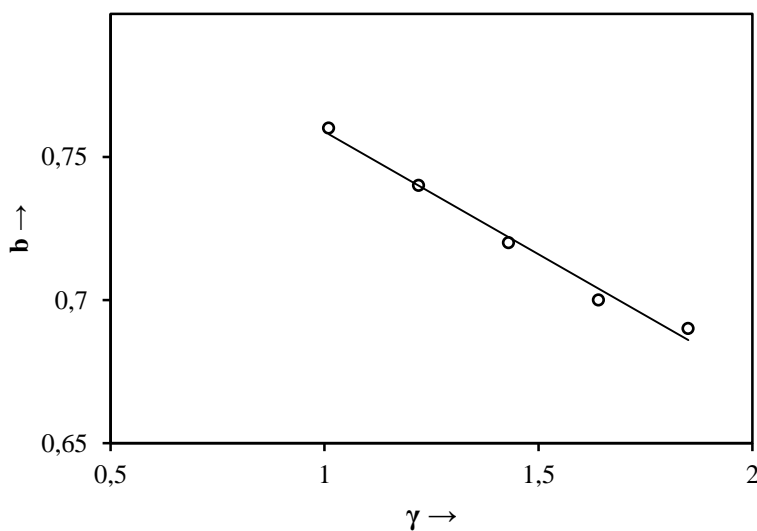


Figure 2.10 : (—) Variation du coefficient « b » en fonction de γ .

Une relation unique de la forme $\Phi = f(Fr_1, \gamma)$ est alors proposée, permettant de déterminer le rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident pour toutes les configurations du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal trapézoïdal brusquement élargi. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$\Phi = (0,84 - 0,09\gamma)Fr_1 + (0,76 - 0,26\gamma) \quad (2.4)$$

Pour une gamme du nombre de Froude: $3,45 \leq Fr_1 \leq 8,60$, un rapport γ et des valeurs du rapport de compacité: $0,91 \leq \gamma \leq 1,95$ et un rapport de forme du canal trapézoïdal $M = (mh_1)/b$ tel que $0,03 \leq M \leq 0,06$.

La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale Φ est indiquée sur la figure (2.11).

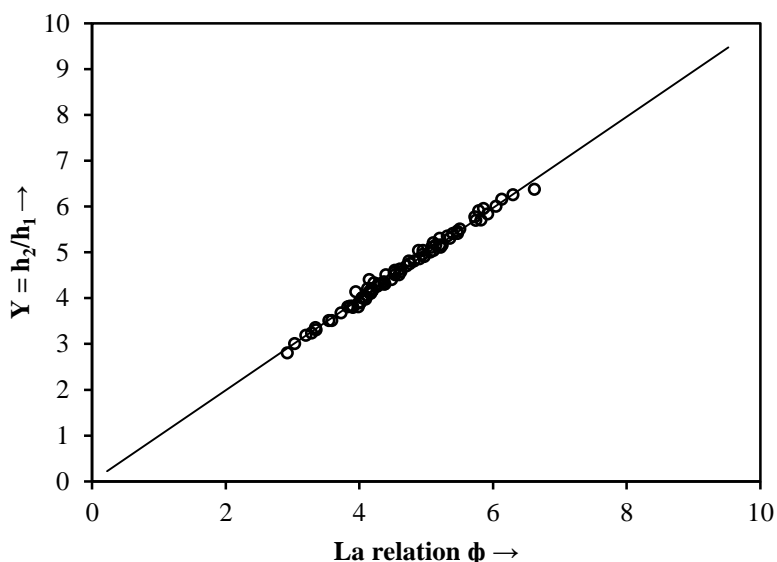


Figure 2.11 : Variation de Y en fonction de $\phi = (0,84 - 0,09\gamma)Fr_1 + (0,76 - 0,26\gamma)$. (\circ) points expérimentaux.
(—) Première bissectrice.

La figure (2.11) montre que la majorité des points expérimentaux s'accumule autour de la première bissectrice ce que minimise l'erreur relative entre les résultats expérimentaux de Y et la fonction $\Phi = (0,84 - 0,09\gamma)Fr_1 + (0,76 - 0,26\gamma)$.

L'erreur: $\Delta Y = [Y - \Phi]/Y$, entre les résultats expérimentaux du rapport $Y = h_2/h_1$ et la fonction Φ sont donnés par le tableau (2.5) :

Tableau 2.5 : Erreur relative entre les valeurs expérimentales de Y et les valeurs de la relation théorique obtenue Φ .

γ	Y	Fr ₁	Φ	ΔY (%)	γ	Y	Fr ₁	Φ	ΔY (%)	γ	Y	Fr ₁	Φ	ΔY (%)
0,92	4,90	5,81	4,97	1,50	1,17	5,40	6,72	5,47	1,33	1,49	4,70	6,02	4,71	0,25
0,92	3,18	3,50	3,20	0,73	1,17	6,00	7,49	6,05	0,77	1,54	3,67	4,70	3,73	1,60
0,92	3,30	3,7	3,36	1,71	1,20	3,79	4,65	3,91	3,10	1,56	3,90	5,09	3,99	2,43
0,93	4,35	5,03	4,37	0,44	1,21	4,00	4,84	4,04	1,06	1,56	3,23	4,10	3,29	1,76
0,96	4,80	5,55	4,75	1,12	1,22	4,63	5,61	4,61	0,48	1,57	4,00	5,22	4,08	2,02
0,97	5,15	6,16	5,20	1,05	1,22	4,75	5,81	4,76	0,13	1,59	5,83	7,82	5,92	1,56
0,98	4,00	4,65	4,05	1,17	1,22	5,03	6,29	5,11	1,64	1,61	5,69	7,60	5,75	0,99
0,99	3,80	4,58	3,99	4,92	1,23	6,25	7,90	6,30	0,78	1,62	3,82	4,96	3,86	1,11
1,00	4,20	4,77	4,13	1,78	1,25	4,13	5,02	4,15	0,48	1,63	4,10	5,41	4,18	1,83
1,00	5,70	7,00	5,82	2,11	1,25	4,10	5,03	4,16	1,40	1,64	3,35	4,25	3,35	0,12
1,00	3,50	4,01	3,55	1,36	1,29	4,25	5,22	4,27	0,49	1,65	5,15	6,8	5,15	0,09
1,02	5,03	5,88	4,95	1,51	1,29	5,35	6,64	5,32	0,62	1,68	4,20	5,48	4,19	0,24
1,03	5,45	6,57	5,47	0,36	1,29	5,95	7,38	5,86	1,48	1,71	4,60	6,00	4,53	1,42
1,04	3,97	4,77	4,10	3,26	1,32	5,03	6,09	4,89	2,80	1,74	4,30	5,68	4,29	0,28
1,04	4,33	4,93	4,22	2,53	1,32	5,20	6,39	5,11	1,74	1,75	3,89	5,30	4,02	3,21
1,06	4,57	5,48	4,62	1,16	1,33	3,50	4,33	3,59	2,59	1,77	4,15	5,58	4,20	1,13
1,06	5,10	6,09	5,08	0,32	1,33	4,40	5,09	4,15	5,72	1,77	4,30	5,85	4,39	1,99
1,07	4,30	5,09	4,32	0,50	1,34	4,30	5,41	4,38	1,77	1,78	4,85	6,60	4,90	1,06
1,10	5,30	6,29	5,20	1,81	1,37	2,80	3,45	2,92	4,42	1,8	5,00	6,86	5,07	1,33
1,10	4,50	5,22	4,40	2,23	1,43	5,77	7,36	5,73	0,72	1,82	5,10	7,10	5,22	2,29
1,12	4,40	5,35	4,48	1,90	1,44	4,50	5,81	4,60	2,15	1,86	5,30	7,35	5,36	1,07
1,12	6,37	8,20	6,62	3,96	1,45	5,40	6,93	5,40	0,01	1,89	5,50	7,60	5,50	0,06
1,13	4,80	5,81	4,82	0,45	1,45	3,00	3,66	3,03	1,09	1,91	4,55	6,20	4,52	0,57
1,15	3,82	4,60	3,90	2,14	1,46	3,80	4,77	3,83	0,79	1,92	5,90	8,05	5,79	1,93
1,15	4,50	5,45	4,54	0,84	1,46	5,15	6,72	5,24	1,75	1,95	6,15	8,60	6,14	0,24
1,17	4,95	6,02	4,95	0,02	1,49	4,13	4,96	3,95	4,41					

Le tableau 2.5 montre que 99 % des erreurs sont ≤ 5 %.

II.4.2. Hauteur relative du seuil

La figure (2.12) montre la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident. La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation $S = f(Fr_1)$ est linéaire pour chaque configuration du ressaut. Par ailleurs, pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Pour chaque rapport de compacité γ , les points de mesures expérimentales s'ajustent, par la méthode des moindres carrés, autour d'une droite d'équation $S = aFr_1 - b$.

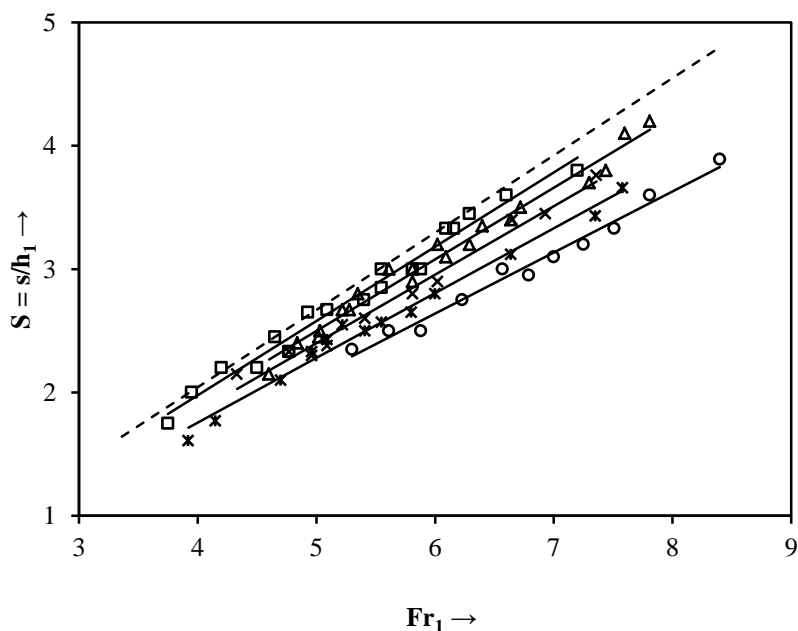


Figure 2.12 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (\square) 0,96 ; (Δ) 1,07 ; (\times) 1,18 ; ($*$) 1,29 ; (o) 1,40. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbes d'ajustement.

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $S = f(Fr_1)$ de la figure (2.12) pour chaque valeur de γ , sont consignées dans le tableau (2.6):

Tableau 2.6 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $S = f(Fr_1)$.

γ	$S = s/h_1$	Fr_1	γ	$S = s/h_1$	Fr_1	γ	$S = s/h_1$	Fr_1
0,92	3,00	5,81	1,17	3,80	7,44	1,56	2,43	5,09
0,92	2,00	3,95	1,21	2,40	4,84	1,57	2,55	5,22
0,96	2,85	5,55	1,22	3,00	5,61	1,59	3,66	7,58
0,97	3,33	6,16	1,22	3,00	5,81	1,61	3,43	7,35
0,98	2,45	4,65	1,22	3,20	6,29	1,62	2,33	4,96
0,99	2,20	4,50	1,23	4,20	7,81	1,63	2,50	5,41
1,00	2,20	4,20	1,25	2,45	5,02	1,64	1,77	4,15
1,00	3,80	7,20	1,25	2,15	4,60	1,65	3,12	6,64
1,02	3,00	5,88	1,25	2,50	5,03	1,68	2,57	5,55
1,03	3,60	6,60	1,29	2,67	5,22	1,71	2,80	6,00
1,04	2,33	4,77	1,29	3,40	6,64	1,74	2,65	5,80
1,04	2,65	4,93	1,29	3,70	7,30	1,74	1,61	3,92
1,06	3,33	6,09	1,32	3,10	6,09	1,75	2,35	5,30
1,06	2,75	5,40	1,32	3,35	6,40	1,77	2,50	5,61
1,07	2,67	5,09	1,33	2,15	4,33	1,81	2,75	6,23
1,10	2,33	4,77	1,34	2,60	5,41	1,83	3,00	6,57
1,10	3,45	6,29	1,43	3,76	7,36	1,86	2,95	6,79
1,10	3,00	5,55	1,44	2,80	5,81	1,87	3,10	7,00
1,11	1,75	3,75	1,45	3,45	6,93	1,89	3,20	7,25
1,12	4,10	7,60	1,46	2,33	4,77	1,90	2,50	5,88
1,12	2,80	5,35	1,46	3,40	6,65	1,91	3,33	7,51
1,13	2,90	5,81	1,49	2,90	6,02	1,93	3,60	7,81
1,15	2,67	5,28	1,49	2,30	4,96	1,95	3,89	8,40
1,17	3,20	6,02	1,53	2,38	5,09			
1,17	3,50	6,72	1,54	2,10	4,70			

Le tableau (2.7) regroupe les différents coefficients des courbes d'ajustement des relations expérimentales, liant la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil au nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, pour différents rapports γ de compacité :

Tableau 2.7: Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude Fr_1 pour différents γ de compacité.

Intervalles des rapports de compacité	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	$S = 0,60Fr_1 - 0,43$	0,976
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	$S = 0,58Fr_1 - 0,40$	0,980
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	$S = 0,55Fr_1 - 0,37$	0,983
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	$S = 0,54Fr_1 - 0,34$	0,984
$1,75 \leq \gamma \leq 1,95$	$S = 0,49Fr_1 - 0,33$	0,982

Les figures (2.12) et (2.13) montrent que les coefficients « a » et « b » des droites d'ajustements, varient en fonction du rapport de compacité γ , suivant des droites d'équations :

$$a = -0,12\gamma + 0,73, \quad R^2 = 0,994 \quad (2.5)$$

$$b = - 0,12\gamma + 0,55, \quad R^2 = 0,976 \quad (2.6)$$

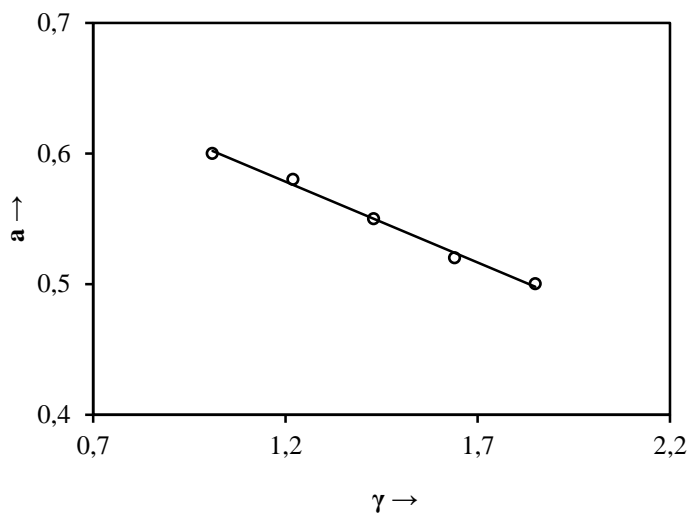


Figure 2.13 : (—) Variation de coefficient « a » en fonction de γ .

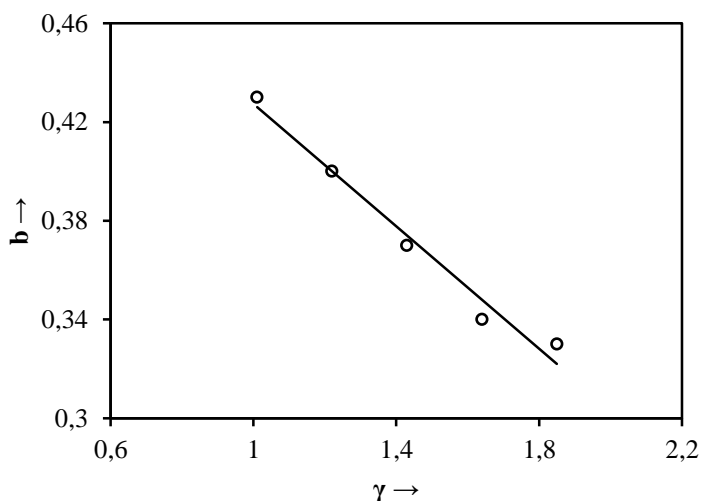


Figure 2.14 : (—) Variation de coefficient « b » en fonction de γ .

La relation linéaire ψ traduisant la variation de s/h_1 en fonction de Fr_1 et du rapport γ de compacité, est la relation (2.7) suivante :

$$\psi = (0,73 - 0,12\gamma) Fr_1 + (0,55 - 0,12\gamma) \quad (2.7)$$

Pour une gamme du nombre de Froude: $3,75 \leq Fr_1 \leq 8,40$, et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,95$ et un rapport de forme du canal trapézoïdal $M = (mh_1)/b$ tel que $0,03 \leq M \leq 0,06$.

L'erreur : $\Delta S = [|S - \psi|]/S$, entre les résultats expérimentaux du rapport $S = s/h_1$ et la fonction ψ est donné par le tableau (2.8) :

Tableau 2.8 : Erreur relative entre la hauteur relative du seuil S et la relation ψ .

γ	S	Fr ₁	ψ	ΔS (%)	γ	S	Fr ₁	ψ	ΔS (%)	γ	S	Fr ₁	ψ	ΔS (%)
0,92	3,00	5,81	3,16	5,34	1,17	3,80	7,44	3,98	4,66	1,56	2,43	5,09	2,40	1,23
0,92	2,00	3,95	2,01	0,39	1,21	2,40	4,84	2,43	1,07	1,57	2,55	5,22	2,47	3,31
0,96	2,85	5,55	2,98	4,47	1,22	3,00	5,61	2,87	4,32	1,59	3,66	7,58	3,73	1,86
0,97	3,33	6,16	3,35	0,49	1,22	3,00	5,81	2,99	0,43	1,61	3,43	7,35	3,59	4,63
0,98	2,45	4,65	2,42	1,42	1,22	3,20	6,29	3,27	2,10	1,62	2,33	4,96	2,30	1,25
0,99	2,20	4,50	2,32	5,42	1,23	4,20	7,81	4,15	1,28	1,63	2,50	5,41	2,54	1,47
1,00	2,20	4,20	2,13	3,09	1,25	2,45	5,02	2,51	2,51	1,64	1,77	4,15	1,86	5,06
1,00	3,80	7,20	3,96	4,26	1,25	2,15	4,60	2,27	5,49	1,65	3,12	6,64	3,18	1,94
1,02	3,00	5,88	3,15	4,84	1,25	2,50	5,03	2,52	0,70	1,68	2,57	5,55	2,58	0,55
1,03	3,60	6,60	3,58	0,67	1,29	2,67	5,22	2,61	2,35	1,71	2,80	6,00	2,80	0,14
1,04	2,33	4,77	2,46	5,65	1,29	3,40	6,64	3,42	0,71	1,74	2,65	5,80	2,68	1,20
1,04	2,65	4,93	2,56	3,46	1,29	3,70	7,30	3,80	2,80	1,74	1,61	3,92	1,70	5,71
1,06	3,33	6,09	3,25	2,45	1,32	3,10	6,09	3,09	0,34	1,75	2,35	5,30	2,42	2,81
1,06	2,75	5,40	2,83	2,99	1,32	3,35	6,40	3,27	2,49	1,77	2,50	5,61	2,57	2,65
1,07	2,67	5,09	2,64	1,10	1,33	2,15	4,33	2,08	3,28	1,81	2,75	6,23	2,86	4,07
1,10	2,33	4,77	2,43	4,48	1,34	2,60	5,41	2,69	3,47	1,83	3,00	6,57	3,02	0,76
1,10	3,45	6,29	3,34	3,09	1,43	3,76	7,36	3,73	0,76	1,86	2,95	6,79	3,11	5,57
1,10	3,00	5,55	2,90	3,30	1,44	2,80	5,81	2,86	2,15	1,87	3,10	7,00	3,21	3,66
1,11	1,75	3,75	1,82	4,07	1,45	3,45	6,93	3,48	0,78	1,89	3,20	7,25	3,33	3,91
1,12	4,10	7,60	4,11	0,27	1,46	2,33	4,77	2,27	2,51	1,90	2,50	5,88	2,63	5,19
1,12	2,80	5,35	2,77	1,04	1,46	3,40	6,65	3,31	2,51	1,91	3,33	7,51	3,44	3,31
1,13	2,90	5,81	3,04	4,80	1,49	2,90	6,02	2,95	1,62	1,93	3,60	7,81	3,57	0,72
1,15	2,67	5,28	2,71	1,64	1,49	2,30	4,96	2,36	2,73	1,95	3,89	8,40	3,85	1,02
1,17	3,20	6,02	3,14	1,88	1,53	2,38	5,09	2,41	1,46					
1,17	3,50	6,72	3,55	1,50	1,54	2,10	4,70	2,20	4,63					

Le tableau 2.8 montre que 89 % des erreurs sont ≤ 5 %.

La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale est indiquée sur la figure (2.15).

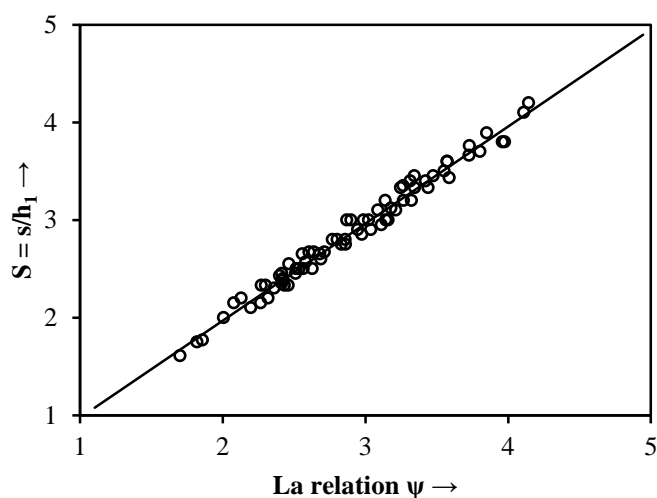


Figure 2.15: Variation de S en fonction de $\psi = (0,73 - 0,12\gamma)Fr_1 + (0,55 - 0,12\gamma)$. (—) Première bissectrice. (○) Points expérimentaux.

La figure (2.15) montre que la majorité des points expérimentaux s'accumule autour de la première bissectrice ce que minimise l'erreur relative entre les résultats expérimentaux de S et la fonction $\psi = (0,73 - 0,12\gamma)Fr_1 + (0,55 - 0,12\gamma)$.

II.4.3. Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du seuil

Les résultats expérimentaux montrent que chaque intervalle du rapport de compacité correspond à une certaine position relative x/h_2 du seuil, sauf dans le cas du ressaut classique où $\gamma \leq 0,90$ nous avons constaté que, les mesures expérimentales s'ajustent autour d'une courbe de puissance de la forme :

$$x/h_2 = 6,14\gamma^{-0,76} \quad \text{pour} \quad \gamma \leq 0,90 \quad (2.8)$$

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure (2.16).

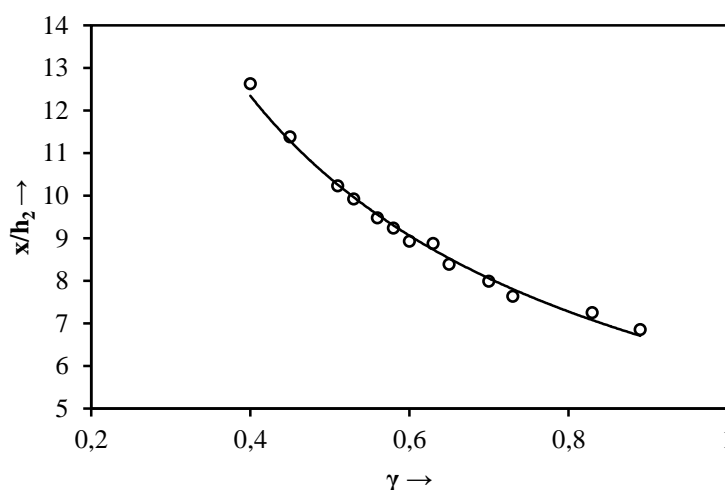


Figure 2.16: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ pour le ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$). (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.

Concernant les autres intervalles de valeurs de compacité γ , les variations de la position relative du seuil sont données par le tableau (2.9) :

Tableau 2.9 : Variation de la position relative du seuil x/h_2 pour chaque intervalle du rapport de compacité γ .

Intervalle de variation de γ	Centre de la classe	Valeur moyenne de x/h_2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	1.01	6.16
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	1.22	4.82
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	1.43	3.67
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	1,64	2.84

La représentation graphique de la fonction $x/h_2 = f(\gamma)$ aboutit à une courbe de puissance de la forme :

$$x/h_2 \approx 6,41\gamma^{-1.59} \quad \text{Pour : } 0,91 \leq \gamma \leq 1,74 \quad (2.9)$$

Et un rapport de forme $M = (mh_1)/b$ pour le canal trapézoïdal: $0,03 \leq M \leq 0,06$.

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure (2.17).

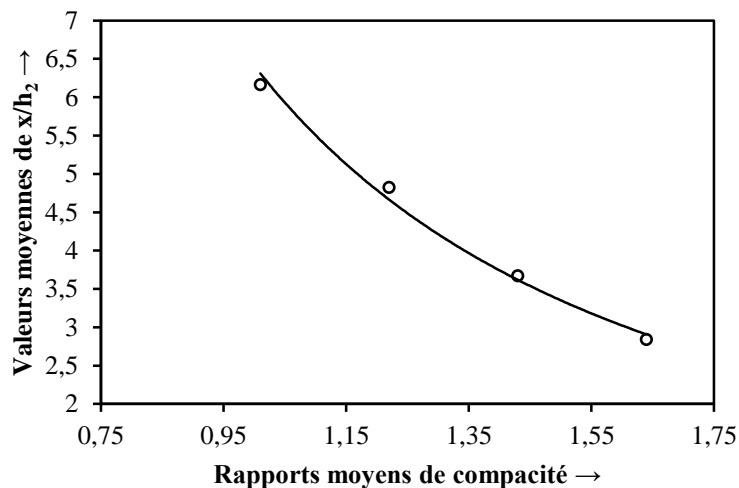


Figure 2.17: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.

Pour un rapport γ de compacité égale à l'unité, l'équation (2.90) donne un rapport $Lr^*/h_2 = 6,17$.

II.4.4. Profil de surface généralisé

Pour la gamme de h_1 variant de 2 à 5 cm, nous avons représenté le profil de surface généralisé $y = f(x)$, telles que : $y = [h(x) - h_1] / [h_2 - h_1]$, $X = x/Lr$.

La figure 16 représente les profils de surface du ressaut relatif à chaque valeur moyenne de compacité du ressaut, à savoir : $\gamma \leq 0,9$, $\gamma = 1,01$, $\gamma = 1,22$, $\gamma = 1,43$, $\gamma = 1,64$.

L'analyse des points expérimentaux correspondant au ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$) par le logiciel Graph (Version 4.4.2), à montrer que la variation de la fonction $y = f(X)$ est tangente hyperbolique selon l'équation (2.10):

$$y = 0,87 \tanh [5,77X] \quad (2.10)$$

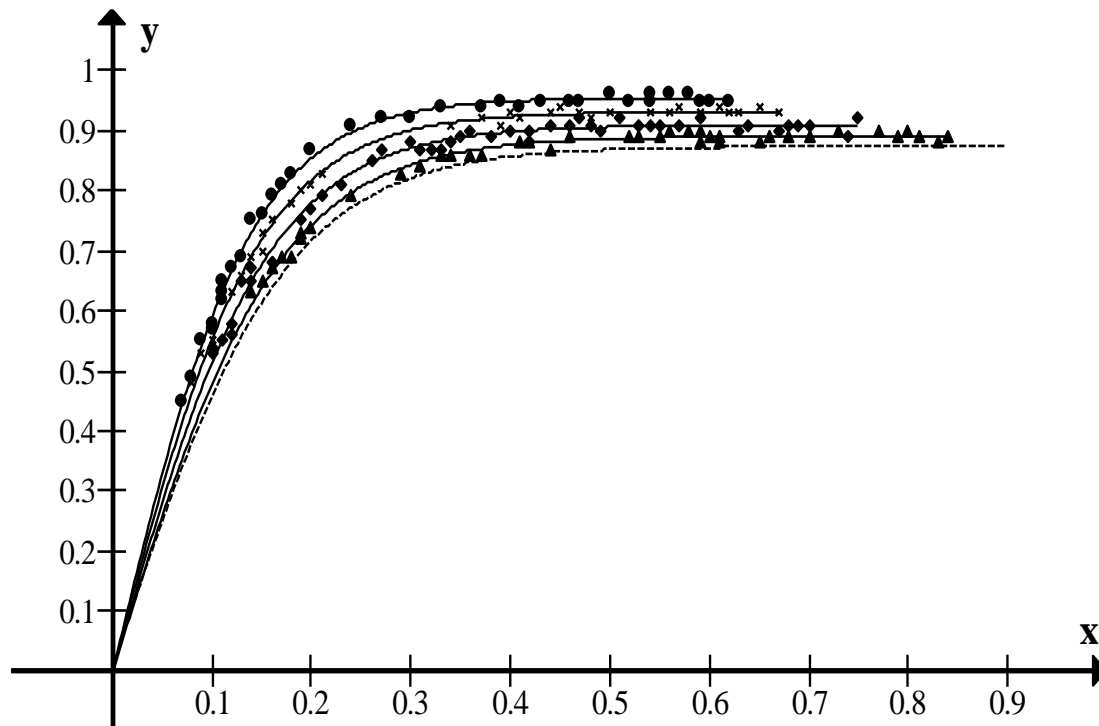


Figure 2.18: Variation expérimentales du profil de surface [$y = f(X)$] du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section trapézoïdal brusquement élargi, pour quatre rapports intermédiaires de compacité. (...) Courbe correspond au ressaut classique selon l'équation $y = 0,87 \tanh [5,77X]$ ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbes d'ajustements pour : (\blacktriangle) $\gamma = 1,01$; (\blacklozenge) $\gamma = 1,22$; (\times) $\gamma = 1,43$ et (\bullet) $\gamma = 1,64$.

Pour chaque rapport de compacité γ , les points de mesures expérimentales s'ajustent, par la méthode des moindres carrés, autour d'une courbe d'équation $y = a \tanh [bX]$, définie entre $[-a, +a]$.

La figure (2.18) montre que plus le rapport de compacité augmente, plus la valeur du coefficient « a » augmente, ce qui influe sur l'allure des courbes d'ajustements.

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$ de la figure (2.18) pour chaque valeur de γ , sont consignées dans le tableau (2.10):

Tableau 2.10 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$.

γ	X	y	γ	X	y	γ	X	y	γ	X	y
0,92	0,42	0,88	1,10	0,77	0,90	1,29	0,44	0,91	1,54	0,10	0,55
0,92	0,33	0,86	1,12	0,12	0,56	1,29	0,26	0,85	1,54	0,34	0,91
0,92	0,29	0,83	1,12	0,33	0,87	1,29	0,75	0,92	1,54	0,65	0,94
0,92	0,66	0,89	1,12	0,47	0,92	1,29	0,10	0,54	1,54	0,09	0,55
0,92	0,44	0,87	1,12	0,48	0,91	1,32	0,55	0,91	1,54	0,24	0,91
0,92	0,84	0,89	1,13	0,42	0,88	1,32	0,53	0,91	1,54	0,18	0,83
0,96	0,14	0,63	1,13	0,14	0,67	1,32	0,20	0,77	1,56	0,10	0,57
0,96	0,65	0,88	1,15	0,23	0,81	1,32	0,14	0,65	1,56	0,11	0,63
0,97	0,37	0,86	1,15	0,38	0,89	1,33	0,08	0,48	1,56	0,17	0,81
0,97	0,70	0,89	1,15	0,31	0,87	1,33	0,18	0,78	1,56	0,47	0,95
0,98	0,81	0,89	1,15	0,70	0,91	1,33	0,59	0,92	1,56	0,56	0,96
0,98	0,31	0,84	1,15	0,64	0,91	1,34	0,14	0,69	1,57	0,10	0,58
0,99	0,83	0,88	1,17	0,11	0,55	1,34	0,48	0,92	1,57	0,27	0,92
0,99	0,24	0,79	1,17	0,42	0,90	1,34	0,63	0,93	1,57	0,58	0,96
0,99	0,59	0,90	1,17	0,40	0,90	1,37	0,37	0,92	1,59	0,11	0,62
1,00	0,19	0,72	1,17	0,51	0,92	1,37	0,50	0,93	1,59	0,54	0,96
1,00	0,34	0,86	1,17	0,57	0,91	1,43	0,40	0,93	1,61	0,15	0,76
1,00	0,41	0,88	1,17	0,54	0,91	1,43	0,39	0,91	1,61	0,41	0,94
1,00	0,55	0,89	1,20	0,13	0,65	1,44	0,13	0,66	1,62	0,37	0,94
1,00	0,46	0,89	1,20	0,32	0,87	1,44	0,54	0,93	1,62	0,33	0,94
1,00	0,73	0,90	1,20	0,74	0,89	1,44	0,61	0,94	1,62	0,59	0,95
1,02	0,20	0,74	1,21	0,35	0,89	1,45	0,41	0,92	1,63	0,13	0,69
1,02	0,60	0,89	1,21	0,68	0,91	1,45	0,21	0,83	1,63	0,39	0,95
1,03	0,52	0,89	1,22	0,10	0,53	1,45	0,47	0,93	1,63	0,54	0,95
1,03	0,36	0,86	1,22	0,19	0,75	1,45	0,59	0,93	1,64	0,43	0,95
1,04	0,19	0,73	1,22	0,16	0,68	1,46	0,15	0,70	1,64	0,46	0,95
1,04	0,68	0,89	1,22	0,30	0,88	1,46	0,09	0,53	1,65	0,11	0,65
1,04	0,61	0,89	1,22	0,69	0,91	1,46	0,20	0,81	1,65	0,20	0,87
1,04	0,80	0,90	1,22	0,59	0,92	1,46	0,45	0,94	1,65	0,52	0,95
1,04	0,79	0,89	1,22	0,46	0,91	1,46	0,62	0,93	1,68	0,07	0,45
1,06	0,18	0,69	1,23	0,36	0,90	1,49	0,16	0,75	1,68	0,30	0,92
1,06	0,17	0,69	1,23	0,49	0,90	1,49	0,12	0,63	1,68	0,50	0,96
1,06	0,61	0,88	1,25	0,34	0,88	1,49	0,19	0,80	1,71	0,08	0,49
1,06	0,59	0,88	1,25	0,27	0,87	1,49	0,56	0,93	1,71	0,16	0,79
1,07	0,16	0,67	1,25	0,63	0,90	1,49	0,67	0,93	1,71	0,60	0,95
1,07	0,53	0,89	1,25	0,67	0,90	1,53	0,15	0,73	1,74	0,12	0,67
1,10	0,15	0,65	1,25	0,21	0,79	1,53	0,57	0,94	1,74	0,14	0,75
1,10	0,56	0,90	1,29	0,12	0,58	1,53	0,44	0,93	1,74	0,62	0,95
1,10	0,58	0,90									

Le tableau (2.11) regroupe les différents coefficients des courbes d'ajustement des relations expérimentales, liant $y = (h_x - h_1)/(h_2 - h_1)$ du surface du ressaut au rapport relative $X = x/Lr^*$, pour différents rapports moyennes de compacité γ :

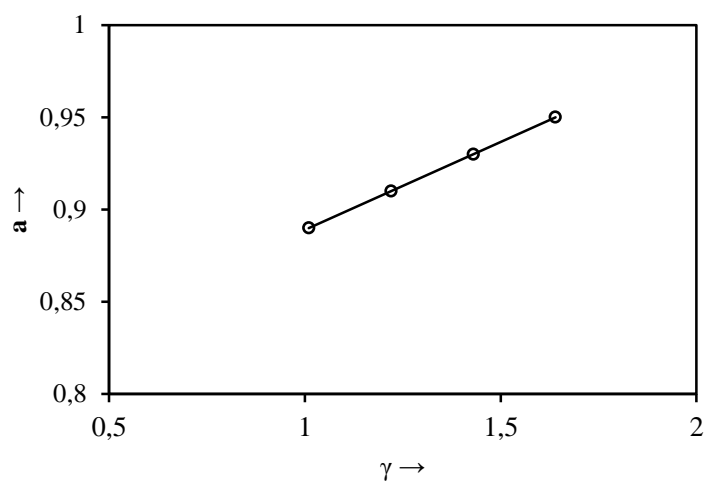
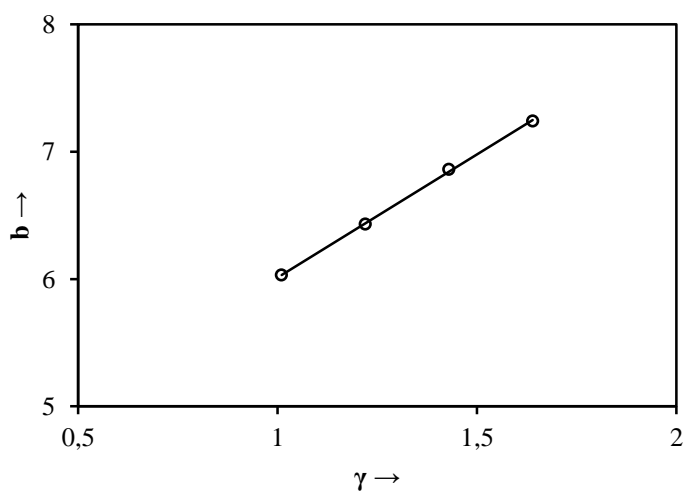
Tableau 2.11 : Valeurs expérimentales de X et de y pour quatre rapports intermédiaires γ de compacité du ressaut contrôlé

Intervalles des rapports de compacité	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	$y = 0,89 \text{Tanh}(6,03X)$	0,990
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	$y = 0,91 \text{Tanh}(6,43X)$	0,990
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	$y = 0,93 \text{Tanh}(6,86X)$	0,996
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	$y = 0,95 \text{Tanh}(7,24X)$	0,997

Les coefficients « a » et « b » figures (2.19) et (2.20) varié en fonction du rapport de compacité γ , selon les équations suivantes:

$$a = 0,09\gamma + 0,79 \quad (2.11)$$

$$b = 1,93\gamma + 4,08 \quad (2.12)$$

**Figure 2.19** : (—) Variation de coefficient « a » en fonction de γ .**Figure 2.20** : (—) Variation de coefficient « b » en fonction de γ .

La relation expérimentale traduisant la variation de y en fonction de X et du rapport γ de compacité, est la relation (2.13) suivante :

$$\Gamma = (0,09\gamma + 0,79) \operatorname{Tanh} [(1,93\gamma + 4,08)X] \quad (2.13)$$

Pour $0,91 \leq \gamma \leq 1,74$ et un rapport de forme du canal trapézoïdal $M = (mh_1)/b$ tel que $0,03 \leq M \leq 0,06$. Si pour un rapport γ de compacité égale à 0,9 (ressaut classique), la relation (2.13) donne : $\Gamma = 0,87 \operatorname{Tanh} [5,82X]$, ce qui implique la relation (2.10), correspondante au ressaut classique. La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale Γ est indiquée sur la figure (2.21).

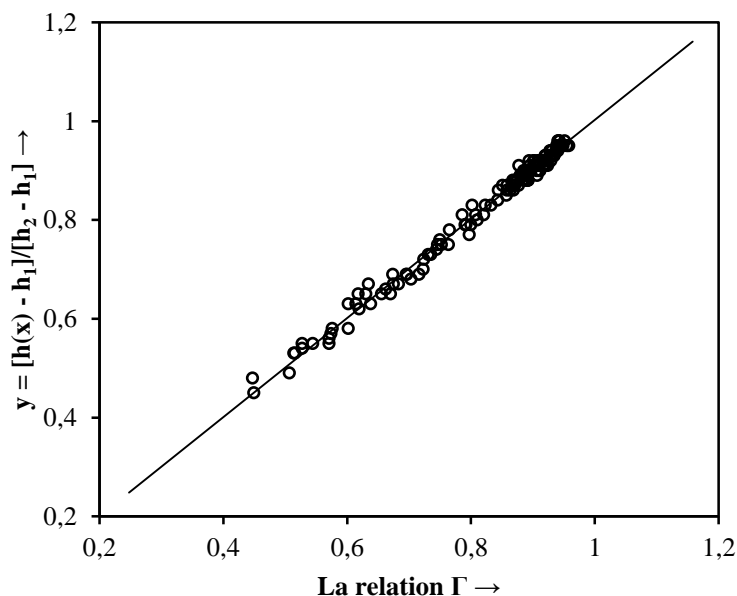


Figure 2.21: Variation expérimentale du profil de surface du ressaut y en fonction de $\Gamma = (0,09\gamma + 0,79) \operatorname{Tanh} [(1,93\gamma + 4,08)X]$. (o) points expérimentaux. (—) première bissectrice.

L'erreur : $\Delta y = [|y - \Gamma|]/y$, entre les résultats expérimentaux du rapport $y = [h(x) - h_1]/[h_2 - h_1]$ et la fonction Γ est donné par le tableau 2.12 :

Tableau 2.12 : Erreur relative entre y et la relation théorique obtenue Γ .

γ	X	y	Γ	Δy (%)	γ	X	y	Γ	Δy (%)	γ	X	y	Γ	Δy (%)
0,92	0,42	0,88	0,87	1,41	1,17	0,11	0,55	0,54	0,92	1,46	0,15	0,70	0,72	3,27
0,92	0,33	0,86	0,84	1,83	1,17	0,42	0,90	0,90	0,51	1,46	0,09	0,53	0,51	2,99
0,92	0,29	0,83	0,82	0,80	1,17	0,40	0,90	0,89	0,79	1,46	0,20	0,81	0,82	1,33
0,92	0,66	0,89	0,88	1,17	1,17	0,51	0,92	0,90	2,03	1,46	0,45	0,94	0,93	1,28
0,92	0,44	0,87	0,87	0,03	1,17	0,57	0,91	0,90	0,79	1,46	0,62	0,93	0,93	0,14
0,92	0,84	0,89	0,88	1,09	1,17	0,54	0,91	0,90	0,85	1,49	0,16	0,75	0,75	0,34
0,96	0,14	0,63	0,60	4,44	1,20	0,13	0,65	0,62	4,92	1,49	0,12	0,63	0,64	1,34
0,96	0,65	0,88	0,88	0,39	1,20	0,32	0,87	0,88	0,84	1,49	0,19	0,80	0,81	1,32
0,97	0,37	0,86	0,86	0,44	1,20	0,74	0,89	0,91	1,89	1,49	0,56	0,93	0,93	0,41
0,97	0,70	0,89	0,88	0,59	1,21	0,35	0,89	0,89	0,24	1,49	0,67	0,93	0,93	0,47
0,98	0,81	0,89	0,89	0,45	1,21	0,68	0,91	0,91	0,26	1,53	0,15	0,73	0,74	0,76
0,98	0,31	0,84	0,84	0,41	1,22	0,10	0,53	0,52	2,70	1,53	0,57	0,94	0,94	0,24
0,99	0,83	0,88	0,89	0,79	1,22	0,19	0,75	0,76	1,86	1,53	0,44	0,93	0,93	0,49
0,99	0,24	0,79	0,79	0,30	1,22	0,16	0,68	0,70	3,43	1,54	0,10	0,55	0,57	3,81
0,99	0,59	0,90	0,89	1,61	1,22	0,30	0,88	0,87	0,97	1,54	0,34	0,91	0,92	1,53
1,00	0,19	0,72	0,72	0,53	1,22	0,69	0,91	0,91	0,15	1,54	0,65	0,94	0,94	0,10
1,00	0,34	0,86	0,86	0,15	1,22	0,59	0,92	0,91	1,31	1,54	0,09	0,55	0,53	4,12
1,00	0,41	0,88	0,88	0,54	1,22	0,46	0,91	0,90	0,66	1,54	0,24	0,91	0,88	3,54
1,00	0,55	0,89	0,89	0,49	1,23	0,36	0,90	0,89	0,82	1,54	0,18	0,83	0,80	3,38
1,00	0,46	0,89	0,88	1,01	1,23	0,49	0,90	0,91	0,73	1,56	0,10	0,57	0,57	0,77
1,00	0,73	0,90	0,89	1,36	1,25	0,34	0,88	0,89	1,13	1,56	0,11	0,63	0,61	2,46
1,02	0,20	0,74	0,74	0,61	1,25	0,27	0,87	0,86	1,30	1,56	0,17	0,81	0,79	2,92
1,02	0,60	0,89	0,89	0,15	1,25	0,63	0,90	0,91	1,25	1,56	0,47	0,95	0,94	1,18
1,03	0,52	0,89	0,89	0,27	1,25	0,67	0,90	0,91	1,27	1,56	0,56	0,96	0,94	2,03
1,03	0,36	0,86	0,87	1,00	1,25	0,21	0,79	0,80	1,25	1,57	0,10	0,58	0,58	0,67
1,04	0,19	0,73	0,73	0,17	1,29	0,12	0,58	0,60	3,81	1,57	0,27	0,92	0,90	1,90
1,04	0,68	0,89	0,89	0,15	1,29	0,44	0,91	0,91	0,01	1,57	0,58	0,96	0,94	1,91
1,04	0,61	0,89	0,89	0,08	1,29	0,26	0,85	0,86	0,87	1,59	0,11	0,62	0,62	0,04
1,04	0,80	0,90	0,89	0,92	1,29	0,75	0,92	0,92	0,49	1,59	0,54	0,96	0,94	1,75
1,04	0,79	0,89	0,89	0,19	1,29	0,10	0,54	0,53	2,26	1,61	0,15	0,76	0,75	1,34
1,06	0,18	0,69	0,72	3,81	1,32	0,55	0,91	0,92	0,79	1,61	0,41	0,94	0,94	0,08
1,06	0,17	0,69	0,70	0,83	1,32	0,53	0,91	0,92	0,74	1,62	0,37	0,94	0,94	0,23
1,06	0,61	0,88	0,89	1,44	1,32	0,20	0,77	0,80	3,56	1,62	0,33	0,94	0,93	0,98
1,06	0,59	0,88	0,89	1,41	1,32	0,14	0,65	0,67	3,10	1,62	0,59	0,95	0,95	0,37
1,07	0,16	0,67	0,68	0,75	1,33	0,08	0,48	0,45	6,75	1,63	0,13	0,69	0,70	0,98
1,07	0,53	0,89	0,89	0,23	1,33	0,18	0,78	0,77	1,86	1,63	0,39	0,95	0,94	0,93
1,10	0,15	0,65	0,66	0,92	1,33	0,59	0,92	0,92	0,15	1,63	0,54	0,95	0,95	0,31
1,10	0,56	0,90	0,90	0,47	1,34	0,14	0,69	0,67	2,34	1,64	0,43	0,95	0,95	0,52
1,10	0,58	0,90	0,90	0,43	1,34	0,48	0,92	0,92	0,30	1,64	0,46	0,95	0,95	0,38
1,10	0,77	0,90	0,90	0,29	1,34	0,63	0,93	0,92	1,09	1,65	0,11	0,65	0,63	3,02
1,12	0,12	0,56	0,57	1,93	1,37	0,37	0,92	0,91	1,03	1,65	0,20	0,87	0,85	2,15
1,12	0,33	0,87	0,87	0,08	1,37	0,50	0,93	0,92	0,97	1,65	0,52	0,95	0,95	0,13
1,12	0,47	0,92	0,89	2,79	1,43	0,40	0,93	0,92	0,96	1,68	0,07	0,45	0,45	0,06
1,12	0,48	0,91	0,89	1,66	1,43	0,39	0,91	0,92	1,09	1,68	0,30	0,92	0,93	1,02
1,13	0,42	0,88	0,89	1,26	1,44	0,13	0,66	0,66	0,36	1,68	0,50	0,96	0,95	0,90
1,13	0,14	0,67	0,63	5,29	1,44	0,54	0,93	0,93	0,14	1,71	0,08	0,49	0,51	3,42
1,15	0,23	0,81	0,81	0,25	1,44	0,61	0,94	0,93	1,13	1,71	0,16	0,79	0,79	0,13
1,15	0,38	0,89	0,89	0,30	1,45	0,41	0,92	0,92	0,45	1,71	0,60	0,95	0,96	0,55
1,15	0,31	0,87	0,87	0,38	1,45	0,21	0,83	0,83	0,33	1,74	0,12	0,67	0,68	1,96
1,15	0,70	0,91	0,90	0,88	1,45	0,47	0,93	0,93	0,23	1,74	0,14	0,75	0,75	0,52
1,15	0,64	0,91	0,90	0,91	1,45	0,59	0,93	0,93	0,02	1,74	0,62	0,95	0,96	0,85

Le tableau 2.12 montre que 99 % des erreurs sont ≤ 5 %.

II.5. Conclusion

À travers cette étude nous avons examiné expérimentalement l'effet du seuil sur la configuration du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal brusquement élargi; et on a abouti à des relations empiriques adimensionnelles exprimant la variation de la hauteur relative du seuil S ainsi que celle du rapport des hauteurs conjuguées Y , en fonction du nombre de Froude Fr_1 et du facteur de compacité γ défini comme le rapport de la longueur du rouleau Lr^* (classique) et de la position x du seuil.

Concernant la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées, nous avons constaté que pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, le rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Le deuxième résultat obtenu sur la variation de la hauteur relative du seuil S nous avons constaté que pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative du seuil S diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Ces constatations donnent plus d'avantages à notre bassin de dissipation en ce qui concerne sa conception. Les résultats expérimentaux de $y = f(X)$ du profil de la surface du ressaut, montre que cette fonction est de type tangente hyperbolique et pour un rapport de compacité important; la distance de la position du seuil diminue ce qui donne une configuration minimale du bassin de dissipation.

Chapitre III

Compacité du ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé

Chapitre III

Compacité du ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé

III.1. Introduction

Le troisième chapitre a été consacré à l'analyse par la voie de l'expérimentation, les caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince, évoluant dans un canal rectangulaire composé. La recherche bibliographique a montré que ce type de ressaut n'est pas largement étudié et que les travaux existants dans ce domaine sont sur le ressaut hydraulique classique.

Donc et à travers cette contribution expérimentale on va analyser l'effet du seuil sur les caractéristiques du ressaut et que le déplacement de celui-ci vers l'aval provoque la compacité du ressaut et conduit à des plusieurs configurations.

Pour atteindre cet objectif, deux cas seront présentés : cas où l'écoulement s'effectuera au niveau du lit mineur du canal, et deuxième cas, où le ressaut se forme au niveau du lit majeur. Des relations fonctionnelles seront établies, exprimant en termes adimensionnels, le rapport de compacité aux :

- Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude.
- La hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude.
- La position relative du seuil.
- Le profil de surface du ressaut.

III.2. Description du modèle expérimental

Dans ce cas on a à remplacer le canal trapézoïdal en amont du modèle expérimental par un canal rectangulaire composé par deux sections superposées (figure 3.1), reliées dans sa partie aval, à un second canal de section droite rectangulaire (figure 3.2).

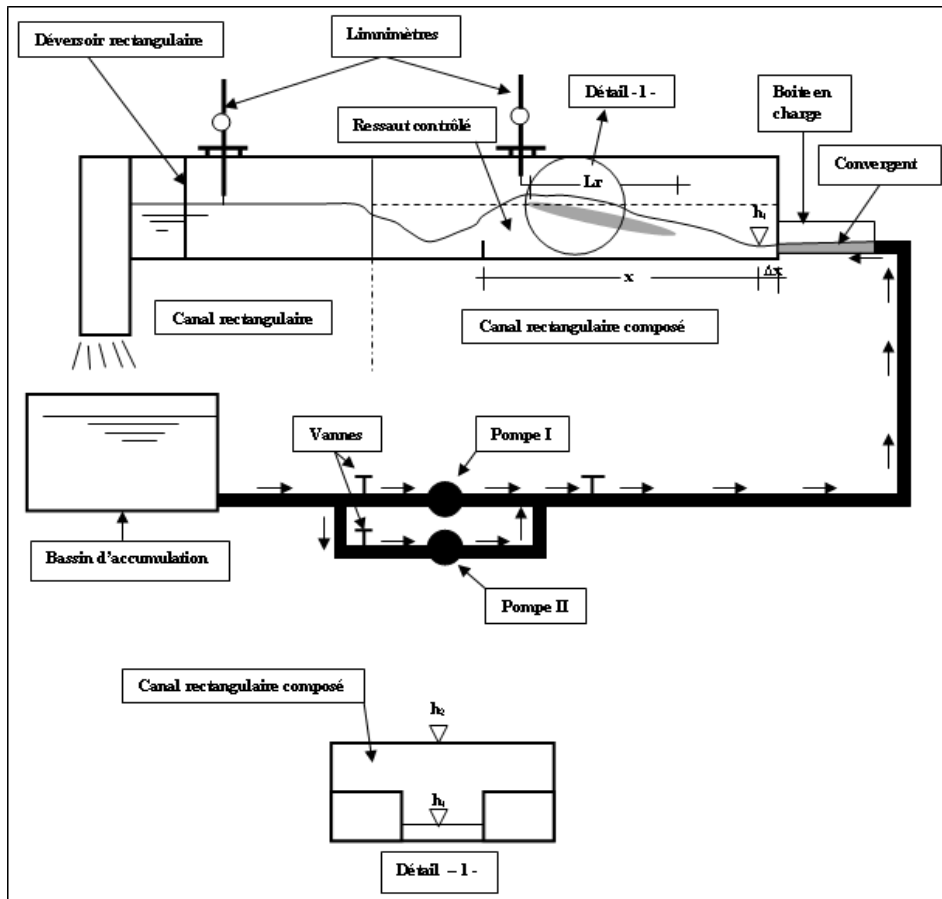


Figure 3.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé, ayant servi à l'expérimentation.



Figure 3.2 : Photographie du canal de mesure de section rectangulaire composé.

III.2.1. Mesure du débit, niveau d'eau et longueurs caractéristiques

Les mêmes appareillages utilisés pour les différentes mesures que dans le cas de du canal trapézoïdal.

III.2.2. Seuils

Les seuils utilisés (figure 3.3) dans notre dispositif expérimental, sont façonnés de fer en forme rectangulaire, leurs fixations est effectué par un support métallique mince qui prend la forme rectangulaire composée du canal (figure 3.4).

Dans le but d'obtenir un nombre important de points de mesures, nous avons préparé 19 seuils minces de différentes hauteurs: $s = 2\text{ cm}$; 3 cm ; 4 cm ; 5 cm ; 6 cm ; 7 cm ; 8 cm ; 9 cm ; 10 cm ; 11 cm ; 12 cm ; 13 cm ; 14 cm ; 15 cm ; 16 cm ; 17 cm ; 18 cm ; 19 cm ; 20 cm .



Figure 3.3 : Photographie des seuils minces testés.

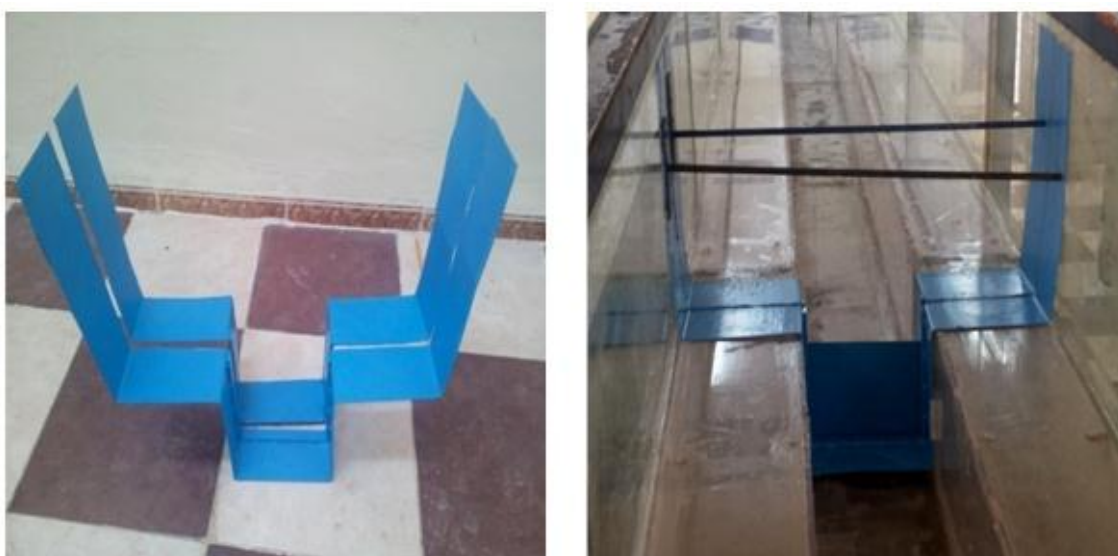


Figure 3.4 : Photographie de support du seuil.

III.3. Description des essais

III.3.1. Position du problème

Comme dans les cas des deux premiers types de canaux (trapézoïdal et trapézoïdal brusquement élargi), le déplacement du seuil vers l'aval provoque la compacité du ressaut et conduit à plusieurs configurations de celui-ci.

Dans le cas du canal rectangulaire composé on distingue deux cas : 1^{er} cas où l'écoulement s'effectuera au niveau du canal mineur ($h_0/h_2 \geq 1$). Le 2^e cas où l'écoulement occupe la majorité du canal rectangulaire composé ($h_0/h_2 < 1$) (figure 3.5).

L'objectif de cette distinction est d'indiquer l'effet de la partie élargi du canal composé sur l'écoulement.

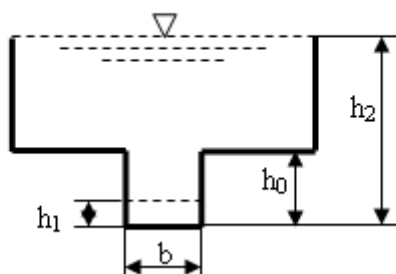


Figure 3.5 : Forme du canal rectangulaire composé.

III.3.2. Procédure expérimentale

Les différents paramètres géométriques et hydrauliques obtenus pour ce type de ressaut ont permis également de composer les produits adimensionnels suivants : le nombre de Froude de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2/h_1$ du seuil et le rapport de compacité $\gamma = Lr^*/x$, Lr^* étant la longueur du rouleau du ressaut classique. Le nombre de Froude Fr_1 dans le cas d'un canal rectangulaire est tel que :

$$Fr_1^2 = (Q^2)/(b_2 h_1^3 g) \quad (3.1)$$

Ces produits adimensionnels peuvent être liés par les relations fonctionnelles : $f_1(Fr_1, S, \gamma) = 0$ et $f_2(Fr_1, Y, \gamma) = 0$. L'un des objectifs visés par la présente partie de notre étude est de définir, par la voie de l'expérimentation au laboratoire, les relations fonctionnelles f_1 et f_2 . Ceci permettra en outre d'évaluer le rapport γ de compacité du ressaut, connaissant l'un des deux couples de valeurs (Fr_1, S) ou (Fr_1, Y) . Les différentes configurations du ressaut peuvent être également obtenues (figure 3.6), à débit croissant, par la fixation de la hauteur s de seuil ce qui engendre une diminution progressive de la distance x

entre le pied du ressaut et la position du seuil. Cette diminution est suivie d'une légère augmentation de la hauteur initiale h_1 . Cette dernière n'est significative que pour des distances Δx relativement importantes.

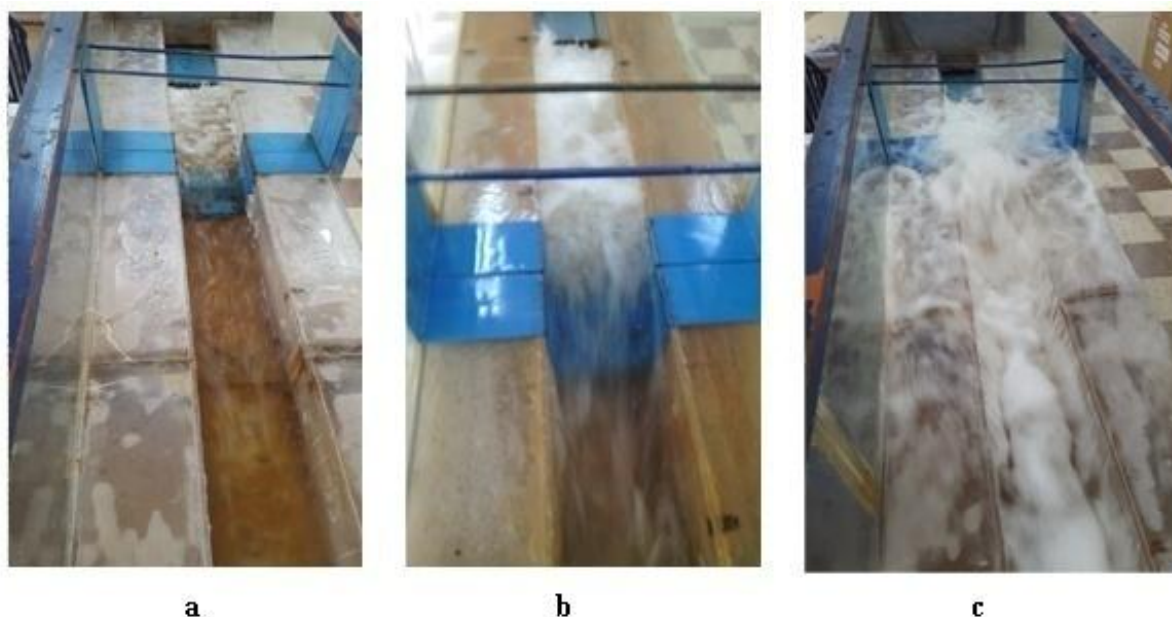


Figure 3.6 : Différentes configurations du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince, obtenues à débit croissant pour une position de seuil x et h_1 fixes.

- a :** $IFr_1 = 5,00$ $s = 6\text{cm}$, $h_2 = 13\text{cm}$, $\gamma = 0,81$
b : $IFr_1 = 8,95$ $s = 8\text{cm}$, $h_2 = 18\text{cm}$, $\gamma = 1,09$
c : $IFr_1 = 10,55$ $s = 10\text{cm}$, $h_2 = 20,5\text{cm}$, $\gamma = 1,42$

Quatre (04) intervalles de rapports γ de compacité, couvrant toute la gamme de points de mesures expérimentales, ont été analysés, correspondant chacun à une configuration intermédiaire du ressaut contrôlé. $\gamma \leq 0,90$; $0,91 \leq \gamma \leq 1,11$; $1,12 \leq \gamma \leq 1,32$; $1,33 \leq \gamma \leq 1,53$; $1,54 \leq \gamma \leq 1,74$. Chaque classe de mesures est représentée par son centre comme l'indique le tableau 3.1:

Tableau 3.1 : Centres des classes de valeurs du rapport de compacité.

Classe	$\leq 0,90$	0,91 – 1,11	1,12 – 1,32	1,33 – 1,53	1,54 – 1,74
Centre	-	1,01	1,22	1,43	1,64

Les valeurs de γ inférieures ou égales à 0,9 correspondent en fait à la configuration du ressaut classique. Pour un échantillon représentatif ont déterminé: le débit Q , la hauteur initiale h_1 , la hauteur finale h_2 , la hauteur du seuil s et la position x du par rapport au pied du ressaut. Ceux-ci permettent de composer les produits adimensionnels suivants : le nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, le rapport $Y = h_2/h_1$ du seuil et le rapport de compacité $\gamma = Lr^*/x$, Lr^* étant la longueur du rouleau du ressaut classique qu'est donné par la relation

expérimentale de la longueur relative du rouleau classique $Lr^*/h_1=f(Fr_1)$. Les valeurs du rouleau classique ont été déterminées expérimentalement selon la relation exprimant la longueur relative du rouleau classique ($\gamma \leq 0,90$) en fonction du nombre de Froude pour les deux cas d'écoulement (cas où $h_0/h_2 \geq 1$ et cas où $h_0/h_1 < 1$).

Cas où $h_0/h_2 \geq 1$:

L'ajustement de la fonction $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$ est représenté sur la figure (3.7).

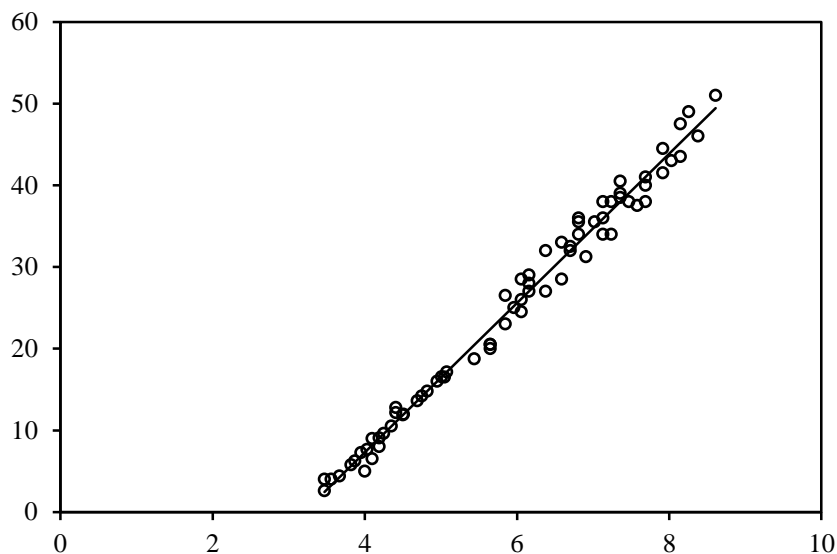


Figure 3.7 : Variation expérimentale de $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$. (-) Courbe d'ajustement.

$$Lr^*/h_1 = 9,14Fr_1 - 29,24 \tag{3.2}$$

Les valeurs expérimentales utilisées pour dessiner la ligne droite de la figure (3.7) sont donnés dans le tableau (3.2).

Tableau 3.2 : Valeurs expérimentales exprimant la relation entre Lr^*/h_1 et le nombre de Froude pour $h_0/h_2 \geq 1$.

h ₀ /h ₂ ≥ 1											
Lr*/h ₁	Fr ₁	Lr*/h ₁	Fr ₁	Lr*/h ₁	Fr ₁	Lr*/h ₁	Fr ₁	Lr*/h ₁	Fr ₁	Lr*/h ₁	Fr ₁
26,50	5,85	18,75	5,44	20,50	5,65	6,50	4,10	27,00	6,38	9,63	4,25
40,00	7,69	29,00	6,16	32,50	6,70	23,00	5,85	34,00	6,81	11,90	4,50
49,00	8,26	35,50	7,02	38,00	7,13	32,00	6,38	38,50	7,36	14,20	4,75
20,00	5,65	41,00	7,69	27,00	6,16	36,00	6,81	51,00	8,61	17,14	5,08
28,00	6,16	24,50	6,06	37,50	7,58	38,00	7,47	5,00	4,00	4,40	3,67
32,00	6,70	33,00	6,59	46,00	8,38	47,50	8,15	7,27	3,95	5,78	3,82
38,00	7,24	36,00	7,13	20,50	5,65	9,00	4,10	12,17	4,41	7,65	4,03
25,00	5,96	44,50	7,92	26,00	6,06	16,50	5,05	12,80	4,41	10,52	4,35
28,50	6,59	28,50	6,06	35,50	6,81	34,00	7,13	9,07	4,19	2,58	3,47
34,00	7,24	31,25	6,91	39,00	7,36	4,00	3,56	13,62	4,69	6,24	3,87
38,00	7,69	40,50	7,36	43,00	8,03	8,00	4,19	14,78	4,82	11,98	4,51
41,50	7,92	43,50	8,15	4,00	3,47	16,00	4,95	16,55	5,01		

Cas où $h_0/h_2 < 1$:

L'ajustement de la fonction $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$ est représenté sur la figure 2.13.

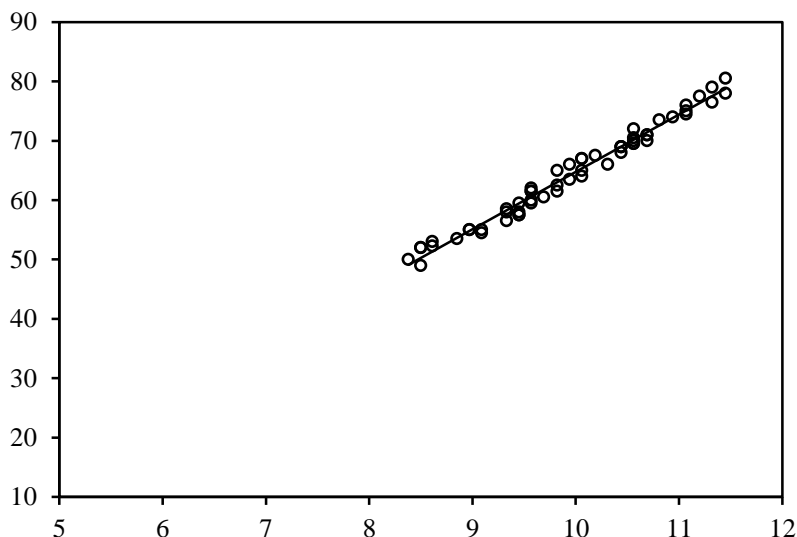


Figure 3.8: Variation expérimentale de $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$ pour $h_0/h_2 < 1$. (-) Courbe d'ajustement.

$$Lr^*/h_1 = 9,66Fr_1 - 31,87 \tag{3.3}$$

Les valeurs expérimentales utilisées pour dessiner la ligne droite de la figure (3.8) sont donnés dans le tableau (3.3).

Tableau 3.3 : Valeurs expérimentales exprimant la relation entre Lr^*/h_1 et le nombre de Froude pour $h_0/h_2 < 1$.

h ₀ /h ₂ < 1											
Lr*/h ₁	Fr ₁	Lr*/h ₁	Fr ₁	Lr*/h ₁	Fr ₁	Lr*/h ₁	Fr ₁	Lr*/h ₁	Fr ₁	Lr*/h ₁	Fr ₁
52,00	8,50	49,00	8,50	72,00	10,56	74,50	11,07	70,00	10,69	53,00	8,61
59,50	9,45	57,50	9,45	75,00	11,07	76,50	11,32	53,50	8,85	55,00	8,97
67,50	10,19	61,50	9,82	77,50	11,20	78,00	11,45	61,50	9,57	57,50	9,45
69,00	10,44	69,50	10,56	79,00	11,32	52,00	8,50	62,00	9,57	54,50	9,09
52,25	8,61	71,00	10,69	80,50	11,45	55,00	8,97	66,00	9,94	58,00	9,45
58,00	9,33	76,00	11,07	58,50	9,33	59,50	9,57	67,00	10,06	61,50	9,57
60,50	9,69	50,00	8,38	60,00	9,57	62,50	9,82	69,00	10,44	65,00	9,82
63,50	9,94	55,00	9,09	67,00	10,06	64,00	10,06	70,00	10,56		
66,00	10,31	65,00	10,06	70,50	10,56	69,00	10,44	71,00	10,69		
56,50	9,33	68,00	10,44	73,50	10,81	69,50	10,56	74,00	10,94		

III.4. Analyse des résultats

III.4.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut pour $\gamma > 0,9$

La figure (3.9) représente les points de mesures expérimentales et leurs ajustements pour les deux parties du canal ($h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$). D'après l'allure des courbes d'ajustement on remarque toujours un éloignement par rapport à la courbe du ressaut classique et cet éloignement commence à se faire remarquer à partir de ($\gamma \geq 1,22$).

Par ailleurs, pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire de la forme $Y = aFr_1 + b$.

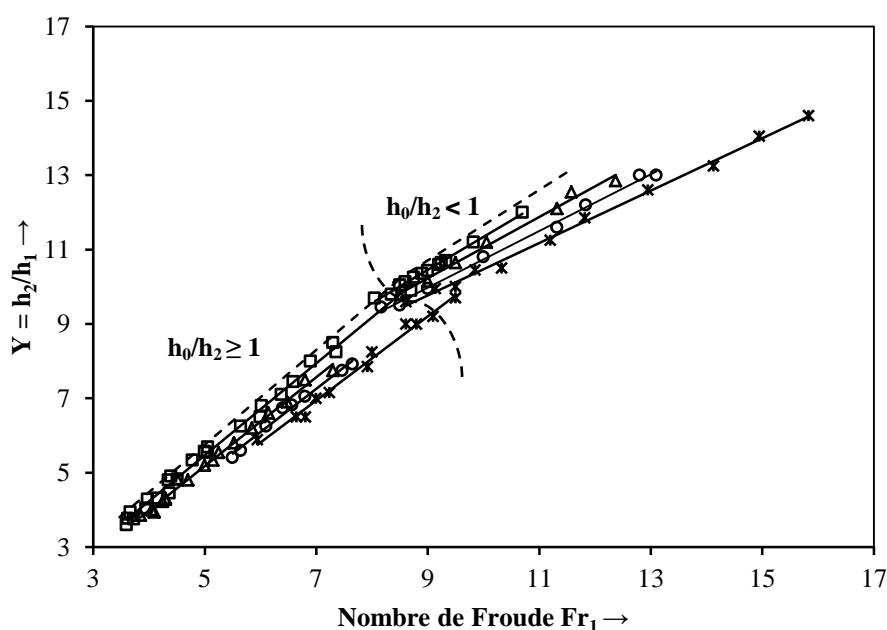


Figure 3.9: (—) Variation de Y en fonction Fr_1 pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité : γ : (\square) 1,01 ; (Δ) 1,22 ; (\circ) 1,43 ; ($*$) 1,64. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$).

Pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$ pour chaque valeur de γ , et pour chaque partie du canal composé sont consignées dans le tableau (3.4):

Tableau 3.4: Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$						$h_0/h_2 < 1$					
γ	Y	Fr_1	γ	Y	Fr_1	γ	Y	Fr_1	γ	Y	Fr_1
0,91	3,94	3,67	1,15	5,34	5,15	0,91	9,80	8,35	1,60	11,25	11,20
0,92	3,77	3,62	1,15	3,94	4,10	0,92	9,69	8,05	1,62	14,60	15,83
0,94	3,60	3,60	1,15	4,29	4,30	0,96	10,25	8,75	1,64	10,45	9,85
0,95	6,80	6,02	1,16	5,54	5,25	0,96	10,43	9,00	1,67	13,25	14,13
0,95	8,25	7,36	1,17	5,80	5,53	1,01	10,65	9,25	1,69	10,50	10,33
0,95	4,29	3,98	1,17	5,20	5,00	1,01	10,05	8,50	1,71	12,60	12,95
0,95	4,91	4,40	1,22	7,50	6,80	1,02	12,00	10,70	1,72	9,95	9,14
0,96	8,00	6,90	1,23	7,75	7,30	1,02	10,70	9,33	1,74	11,85	11,82
0,96	3,75	3,73	1,24	6,20	5,85	1,03	10,13	8,60			
0,96	5,57	5,00	1,28	6,90	6,48	1,03	10,60	9,20			
0,97	4,31	4,15	1,30	6,60	6,15	1,10	11,20	9,82			
0,98	7,45	6,59	1,33	5,41	5,50	1,11	10,36	8,90			
0,98	5,34	4,78	1,35	6,74	6,40	1,15	12,10	11,32			
0,98	4,83	4,51	1,38	6,82	6,57	1,15	11,20	10,06			
0,99	5,54	5,05	1,38	5,60	5,65	1,19	12,55	11,58			
1,00	4,05	3,95	1,44	7,75	7,47	1,19	9,80	8,50			
1,00	4,45	4,37	1,50	7,92	7,65	1,20	10,65	9,50			
1,00	4,80	4,35	1,52	6,25	6,10	1,25	10,15	9,00			
1,02	6,50	6,00	1,53	7,05	6,80	1,30	12,85	12,37			
1,03	6,25	5,65	1,56	7,85	7,92	1,36	11,60	11,32			
1,08	7,10	6,38	1,60	7,00	7,00	1,37	13,00	13,10			
1,08	5,69	5,06	1,64	9,20	9,10	1,37	9,95	9,00			
1,10	9,90	8,70	1,65	9,70	9,50	1,39	13,00	12,80			
1,11	8,50	7,30	1,66	5,89	5,95	1,39	9,45	8,17			
1,11	4,23	4,25	1,69	8,25	8,00	1,42	10,80	10,00			
1,12	4,31	4,30	1,69	6,50	6,81	1,45	12,20	11,84			
1,12	3,86	3,85	1,70	6,50	6,65	1,52	9,50	8,50			
1,13	4,83	4,51	1,72	7,15	7,24	1,54	14,05	14,95			
1,13	4,80	4,70	1,74	9,00	8,61	1,57	9,60	8,61			
1,13	4,00	4,05	1,74	9,00	8,80	1,58	10,00	9,50			

Les tableaux (3.5) et (3.6) regroupent les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées au nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, pour différents rapports de compacité et pour les deux parties du canal:

Tableau 3.5: Coefficients des relations expérimentales issues de l'ajustement de la relation liant Y au nombre de Froude Fr_1 pour différents rapport γ de compacité. Cas où $h_0/h_2 \geq 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$		
Intervalle des rapports de compacité	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	$Y = 1,24Fr_1 - 0,71$	0,994
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	$Y = 1,20Fr_1 - 0,80$	0,993
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	$Y = 1,16Fr_1 - 0,88$	0,988
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	$Y = 1,13Fr_1 - 0,96$	0,987

Tableau 3.6 : Coefficients des relations expérimentales issues de l'ajustement de la relation liant Y au nombre de Froude Fr_1 pour différents rapports γ de compacité. Cas où $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 < 1$		
Intervalles des rapports de compacité	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	$Y = 0,89Fr_1 + 2,49$	0,995
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	$Y = 0,82Fr_1 + 2,82$	0,990
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	$Y = 0,76Fr_1 + 3,14$	0,995
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	$Y = 0,70Fr_1 + 3,42$	0,996

Les tableaux (3.5) et (3.6) montrent que, les pentes « a » des droites diminuent progressivement d'une configuration à l'autre avec un pas quasi constant. Ces constatations montrent la possibilité de l'existence d'une relation unique de type linéaire de la forme $Y = aFr_1 - b$ (dans le cas où $h_0/h_2 \geq 1$) et $Y = aFr_1 + b$ (dans le cas où $h_0/h_2 < 1$), rassemblant quatre (04) configurations intermédiaires de ressaut contrôlé, liant le rapport Y des hauteurs conjuguées au nombre de Froude Fr_1 et au rapport γ de compacité du ressaut.

Dans la partie mineure du canal rectangulaire composé ($h_0/h_2 \geq 1$), les figures (3.10) et (3.11) montrent que les coefficients « a » et « b » des droites d'ajustements varient en fonction du rapport de compacité γ , suivant des droites d'équations :

$$a = -0,17\gamma + 1,40, \quad R^2 = 0,996 \quad (3.4)$$

$$b = 0,40\gamma + 0,31, \quad R^2 = 0,999 \quad (3.5)$$

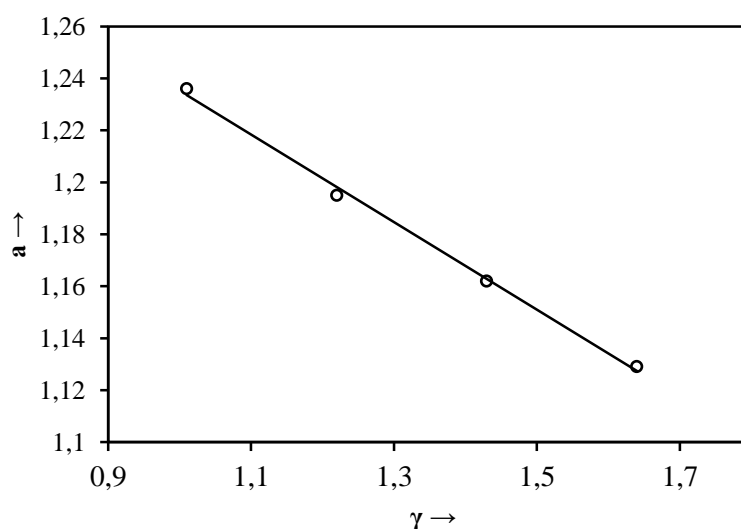


Figure 3.10 : (—) Variation du coefficient « a » en fonction de γ .

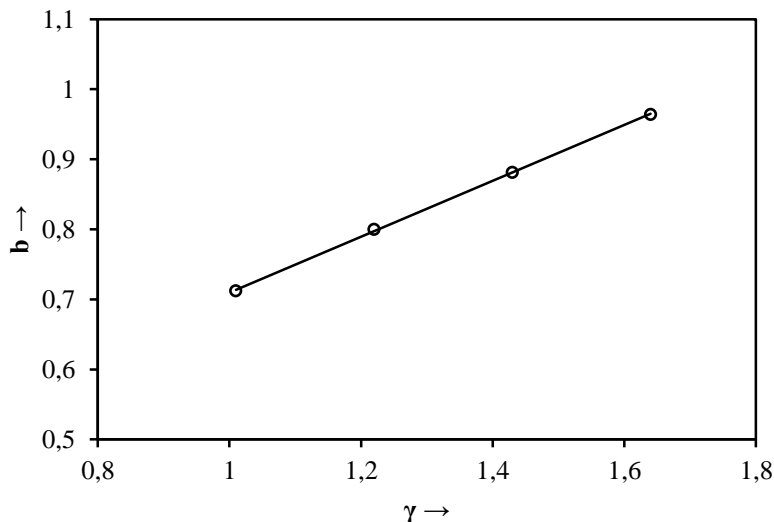


Figure 3.11 : (—) Variation du coefficient « b » en fonction de γ .

Une relation unique de la forme $\varphi = f (Fr_1, \gamma)$ est alors proposée, permettant de déterminer le rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident pour toutes les configurations du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire composé:

$$\varphi = (1,40 - 0,17\gamma) Fr_1 - (0,31 + 0,40\gamma) \tag{3.6}$$

Pour une gamme du nombre de Froude: $3,60 \leq Fr_1 \leq 9,50$, un rapport et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,74$. La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale φ est indiquée sur la figure (3.12). La figure (3.12) montre que la majorité des points expérimentaux s'accumule autour de la première bissectrice ce que minimise l'erreur relative entre les résultats expérimentaux de Y et la fonction $\varphi = (1,40 - 0,17\gamma) Fr_1 + (0,31 + 0,40\gamma)$.

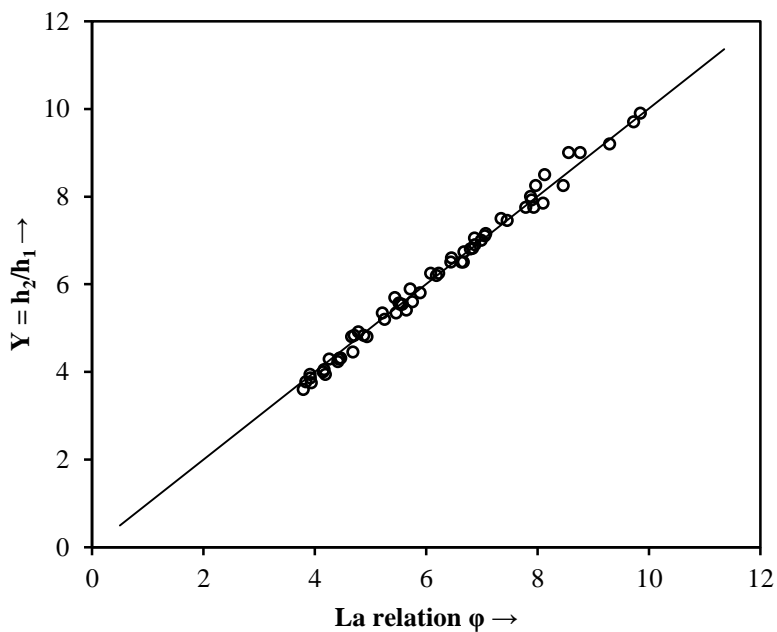


Figure 3.12: Variation expérimentale du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de $\varphi = (1,40 - 0,17\gamma) Fr_1 + (0,31 + 0,40\gamma)$ pour $(h_0/h_2 \geq 1)$. (o) points expérimentaux. (—) première bissectrice.

L'erreur ΔY entre les résultats expérimentaux du rapport $Y = h_2/h_1$ et la fonction φ pour $h_0/h_2 \geq 1$ est donné par le tableau (3.7) :

Tableau 3.7: Erreur relative entre les valeurs expérimentales de Y et les valeurs de la relation théorique obtenue φ pour $h_0/h_2 \geq 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$									
γ	Y	Fr ₁	φ	$\Delta Y(\%)$	γ	Y	Fr ₁	φ	$\Delta Y(\%)$
0,91	3,94	3,67	3,91	0,64	1,15	5,34	5,15	5,46	2,28
0,92	3,77	3,62	3,84	1,91	1,15	3,94	4,10	4,19	6,38
0,94	3,60	3,60	3,80	5,48	1,15	4,29	4,30	4,43	3,34
0,95	6,80	6,02	6,80	0,06	1,16	5,54	5,25	5,57	0,54
0,95	8,25	7,36	8,46	2,57	1,17	5,80	5,53	5,89	1,64
0,95	4,29	3,98	4,26	0,71	1,17	5,20	5,00	5,26	1,07
0,95	4,91	4,40	4,78	2,61	1,22	7,50	6,80	7,35	2,00
0,96	8,00	6,90	7,87	1,57	1,23	7,75	7,30	7,93	2,36
0,96	3,75	3,73	3,94	5,03	1,24	6,20	5,85	6,18	0,25
0,96	5,57	5,00	5,52	0,98	1,28	6,90	6,48	6,88	0,33
0,97	4,31	4,15	4,45	3,23	1,30	6,60	6,15	6,46	2,17
0,98	7,45	6,59	7,46	0,13	1,33	5,41	5,50	5,65	4,39
0,98	5,34	4,78	5,22	2,28	1,35	6,74	6,40	6,68	0,90
0,98	4,83	4,51	4,88	1,12	1,38	6,82	6,57	6,83	0,21
0,99	5,54	5,05	5,54	0,00	1,38	5,60	5,65	5,76	2,80
1,00	4,05	3,95	4,17	2,94	1,44	7,75	7,47	7,79	0,51
1,00	4,45	4,37	4,69	5,35	1,50	7,92	7,65	7,90	0,29
1,00	4,80	4,35	4,66	2,85	1,52	6,25	6,10	6,08	2,65
1,02	6,50	6,00	6,67	2,66	1,53	7,05	6,80	6,87	2,52
1,03	6,25	5,65	6,23	0,35	1,56	7,85	7,92	8,10	3,24
1,08	7,10	6,38	7,05	0,67	1,60	7,00	7,00	6,99	0,12
1,08	5,69	5,06	5,44	4,39	1,64	9,20	9,10	9,30	1,05
1,10	9,90	8,70	9,85	0,51	1,65	9,70	9,50	9,73	0,28
1,11	8,50	7,30	8,13	4,38	1,66	5,89	5,95	5,72	2,94
1,11	4,23	4,25	4,42	4,43	1,69	8,25	8,00	7,97	3,41
1,12	4,31	4,30	4,47	3,64	1,69	6,50	6,81	6,64	2,11
1,12	3,86	3,85	3,92	1,56	1,70	6,50	6,65	6,44	0,88
1,13	4,83	4,51	4,71	2,47	1,72	7,15	7,24	7,07	1,12
1,13	4,80	4,70	4,94	2,94	1,74	9,00	8,61	8,56	4,90
1,13	4,00	4,05	4,15	3,81	1,74	9,00	8,80	8,77	2,55

Le tableau 2.5 montre que 87 % des erreurs sont ≤ 5 %.

Dans le lit majeur du canal rectangulaire composé ($h_0/h_2 < 1$), les figures (3.13) et (3.14) montrent que les coefficients « a » et « b » des droites d'ajustements varient en fonction du rapport de compacité γ , suivant des droites d'équations :

$$a = - 0,29\gamma + 1,18, \quad R^2 = 0,999 \quad (3.7)$$

$$b = 1,49\gamma + 0,99, \quad R^2 = 0,998 \quad (3.8)$$

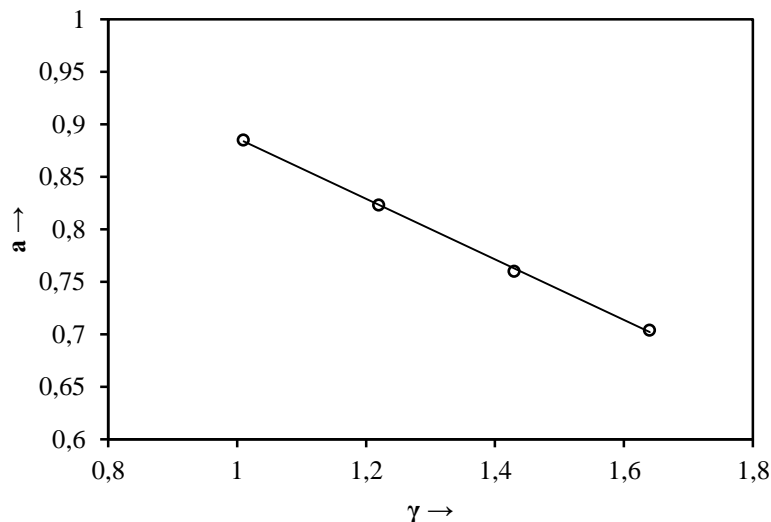


Figure 3.13 : (—) Variation du coefficient « a » en fonction de γ .

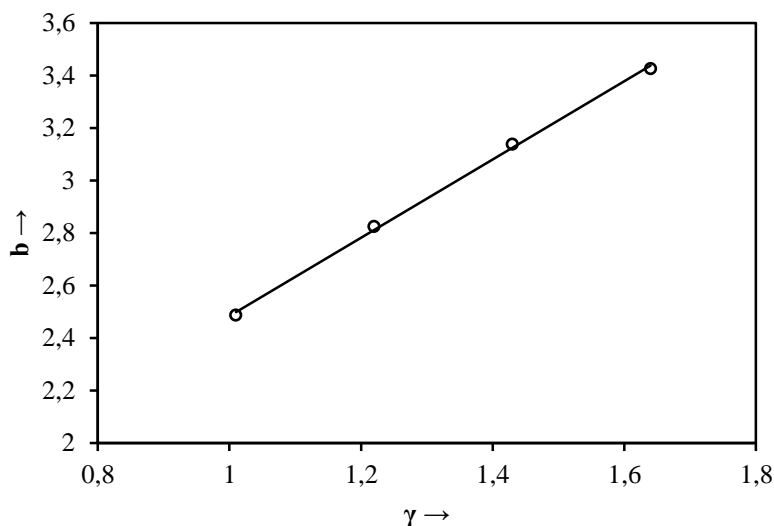


Figure 3.14 : (—) Variation du coefficient « b » en fonction de γ .

Une relation unique de la forme $\mathcal{D} = f(Fr_1, \gamma)$ est alors proposée, permettant de déterminer le rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident pour toutes les configurations du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire composé:

$$\mathcal{D} = (1,18 - 0,29\gamma) Fr_1 + (0,99 + 1,49\gamma) \tag{3.9}$$

Pour une gamme du nombre de Froude: $8,05 \leq Fr_1 \leq 15,83$, un rapport Y et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,74$.

La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale \mathcal{D} est indiquée sur la figure (3.15).

La figure (3.15) montre que la majorité des points expérimentaux s'accumule autour de la première bissectrice ce que minimise l'erreur relative entre les résultats expérimentaux de Y et la fonction $\mathcal{D} = (1,18 - 0,29\gamma) Fr_1 + (0,99 + 1,49\gamma)$.

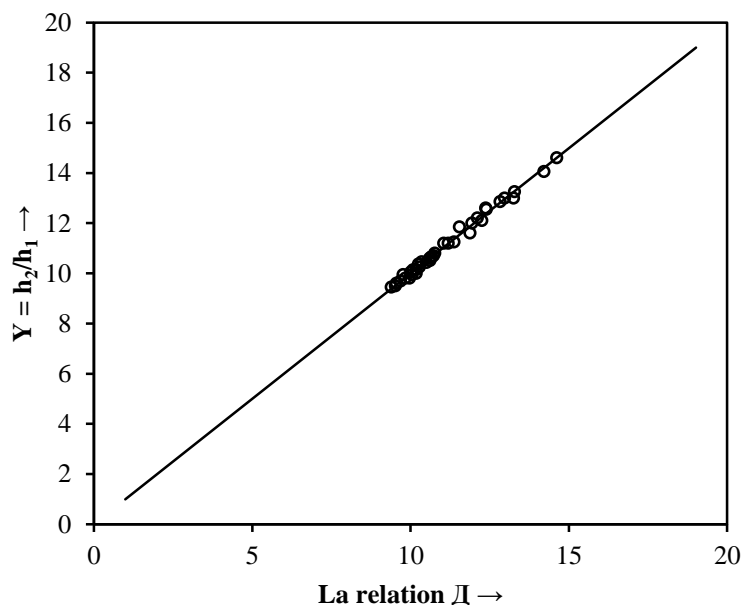


Figure 3.15 : Variation expérimentale du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de $\mathcal{D} = (1,18 - 0,29\gamma) Fr_1 + (0,99 + 1,49\gamma)$ pour $(h_0/h_2 < 1)$. (o) points expérimentaux. (—) première bissectrice.

L'erreur ΔY entre les résultats expérimentaux du rapport $Y = h_2/h_1$ et la fonction \mathcal{D} pour $h_0/h_2 < 1$ est donné par le tableau 3.8 :

Tableau 3.8: Erreur relative entre les valeurs expérimentales de Y et les valeurs de la relation théorique obtenue \bar{D} pour $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 < 1$									
γ	Y	Fr_1	\bar{D}	$\Delta Y(\%)$	γ	Y	Fr_1	\bar{D}	$\Delta Y(\%)$
0,91	9,80	8,35	9,97	1,75	1,36	11,60	11,32	11,89	2,47
0,92	9,69	8,05	9,69	0,77	1,37	13,00	13,10	13,26	1,99
0,96	10,25	8,75	10,29	0,35	1,37	9,95	9,00	10,06	1,09
0,96	10,43	9,00	10,51	0,77	1,39	13,00	12,80	12,98	0,15
1,01	10,65	9,25	10,68	0,24	1,39	9,45	8,17	9,39	0,60
1,01	10,05	8,50	10,01	0,37	1,42	10,80	10,00	10,77	0,29
1,02	12,00	10,70	11,94	0,48	1,45	12,20	11,84	12,12	0,65
1,02	10,70	9,33	10,73	0,32	1,52	9,50	8,50	9,52	0,26
1,03	10,13	8,60	10,08	0,00	1,54	14,05	14,95	14,22	1,23
1,03	10,60	9,20	10,61	0,08	1,57	9,60	8,61	9,56	0,46
1,10	11,20	9,82	11,06	1,25	1,58	10,00	9,50	10,19	1,87
1,11	10,36	8,90	10,26	0,97	1,60	11,25	11,20	11,38	1,12
1,15	12,10	11,32	12,26	1,31	1,62	14,60	15,83	14,62	0,15
1,15	11,20	10,06	11,20	0,04	1,64	10,45	9,85	10,36	0,88
1,19	12,55	11,58	12,40	1,16	1,67	13,25	14,13	13,29	0,29
1,19	9,80	8,50	9,84	0,41	1,69	10,50	10,33	10,62	1,15
1,20	10,65	9,50	10,66	0,10	1,71	12,60	12,95	12,38	1,75
1,25	10,15	9,00	10,19	0,40	1,72	9,95	9,14	9,77	1,83
1,30	12,85	12,37	12,83	0,13	1,74	11,85	11,82	11,55	2,52

Le tableau 2.5 montre que 100 % des erreurs sont ≤ 5 %.

III.4.2. Hauteur relative du seuil

La figure (3.16) montre la variation de la hauteur relative s/h_1 du seuil en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident.

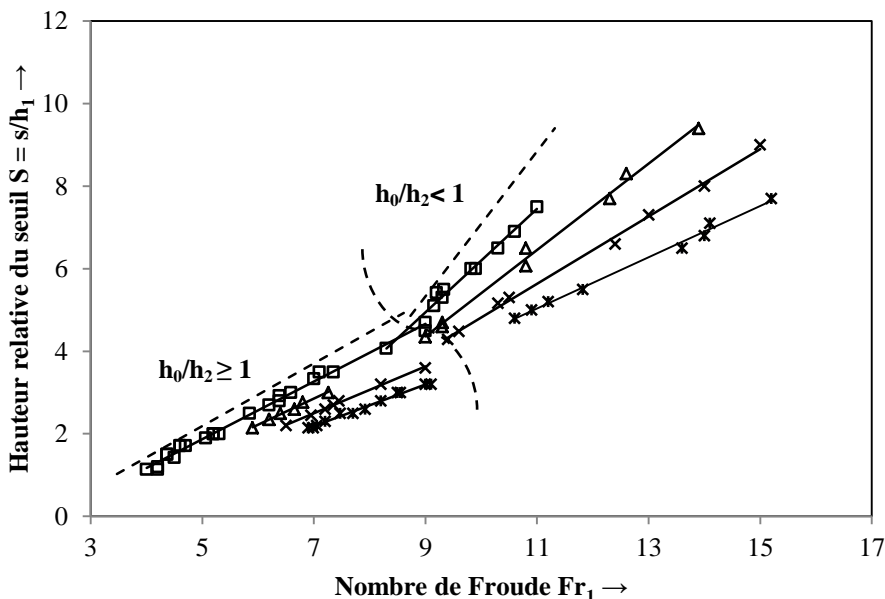


Figure 3.16 : (—) Variation de S en fonction Fr_1 pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité pour ($h_0/h_2 \geq 1$) et ($h_0/h_2 < 1$): γ : (□) 1,01 ; (Δ) 1,22 ; (×) 1,43 ; (*) 1,64. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$).

La représentation graphique des points de mesures expérimentales montre que la relation $S = f(Fr_1)$ est linéaire pour chaque configuration du ressaut. Par ailleurs, pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative S du seuil diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente. Pour chaque rapport de compacité γ , les points de mesures expérimentales s'ajustent, par la méthode des moindres carrés, autour d'une droite d'équation $S = aFr_1 - b$. Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $S = f(Fr_1)$ pour chaque valeur de γ et dans les deux parties du canal ($h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$), sont consignées dans les tableaux (3.9) et (3.10):

Tableau 3.9: Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$								
γ	S	Fr_1	γ	S	Fr_1	γ	S	Fr_1
0,91	3,33	7,00	1,02	2,80	6,38	1,40	2,45	6,95
0,91	1,71	4,60	1,02	1,20	4,20	1,42	3,20	8,20
0,92	1,71	4,60	1,03	2,70	6,20	1,42	2,60	7,20
0,92	1,14	4,00	1,08	3,50	7,35	1,52	2,15	6,90
0,93	1,50	4,37	1,10	4,50	9,00	1,54	2,15	6,99
0,94	1,50	4,37	1,10	1,14	4,20	1,54	2,20	7,05
0,94	3,50	7,10	1,17	2,15	5,90	1,54	2,30	7,20
0,95	2,00	5,20	1,22	2,77	6,80	1,55	2,50	7,47
0,95	2,00	5,20	1,23	3,00	7,26	1,58	3,00	8,55
0,96	2,00	5,30	1,24	2,35	6,20	1,59	2,60	7,92
0,97	3,00	6,59	1,28	2,50	6,40	1,60	2,50	7,70
0,98	1,43	4,50	1,30	2,60	6,65	1,62	3,00	8,50
0,99	1,71	4,70	1,35	2,20	6,50	1,63	2,80	8,20
0,99	2,50	5,85	1,36	3,60	9,00	1,65	3,20	9,00
1,00	2,92	6,38	1,37	2,70	7,35	1,65	3,20	9,10
1,01	1,90	5,06	1,39	2,80	7,45			

Tableau 3.10: Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$ pour $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 < 1$								
γ	S	Fr_1	γ	S	Fr_1	γ	S	Fr_1
0,91	6,00	9,90	1,15	4,70	9,30	1,45	6,60	12,40
0,94	5,42	9,20	1,19	8,30	12,60	1,45	7,30	13,00
0,95	5,50	9,33	1,19	4,35	9,00	1,45	4,29	9,40
0,96	6,90	10,60	1,20	7,70	12,30	1,54	4,80	10,60
0,98	6,50	10,30	1,25	6,07	10,80	1,56	7,10	14,10
1,01	5,30	9,30	1,26	4,60	9,30	1,63	5,00	10,90
1,02	7,50	11,00	1,28	9,40	13,90	1,64	7,70	15,20
1,02	6,00	9,82	1,33	5,30	10,50	1,64	6,80	14,00
1,10	5,10	9,15	1,38	4,48	9,60	1,65	6,50	13,60
1,10	4,70	9,00	1,39	9,00	15,00	1,67	5,20	11,20
1,10	4,07	8,30	1,42	5,16	10,30	1,68	5,50	11,82
1,15	6,50	10,80	1,43	8,00	14,00			

Les tableaux (3.11) et (3.12) regroupent les différents coefficients des courbes d'ajustement des relations expérimentales, liant la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil au nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, pour différents rapports γ de compacité et pour chaque partie du canal rectangulaire composée [$h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$] :

Tableau 3.11: Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude Fr_1 pour différents γ de compacité et $h_0/h_2 \geq 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$		
Intervalles des rapports de compacité	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	$S = 0,70Fr_1 - 1,61$	0,990
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	$S = 0,63Fr_1 - 1,54$	0,991
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	$S = 0,57Fr_1 - 1,46$	0,996
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	$S = 0,50Fr_1 - 1,34$	0,989

Tableau 3.12: Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude Fr_1 pour différents γ de compacité et $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 < 1$		
Intervalles des rapports de compacité	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	$S = 1,25Fr_1 - 6,32$	0,984
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	$S = 1,04Fr_1 - 5,04$	0,993
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	$S = 0,81Fr_1 - 3,32$	0,996
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	$S = 0,62Fr_1 - 1,78$	0,992

Dans la partie mineure du canal rectangulaire composé ($h_0/h_2 \geq 1$), les figures (3.17) et (3.18) montrent que les coefficients « a » et « b » des droites d'ajustements varient en fonction du rapport de compacité γ , suivant des droites d'équations (3.10) et (3.11):

$$a = 1 - 0,31\gamma \quad R^2 = 0,999 \quad (3.10)$$

$$b = 2,06 - 0,43\gamma \quad R^2 = 0,982 \quad (3.11)$$

La représentation graphique des coefficients « a » et « b » en fonction de γ pour $h_0/h_2 \geq 1$ est donné par les figures (3.17) et (3.18) :

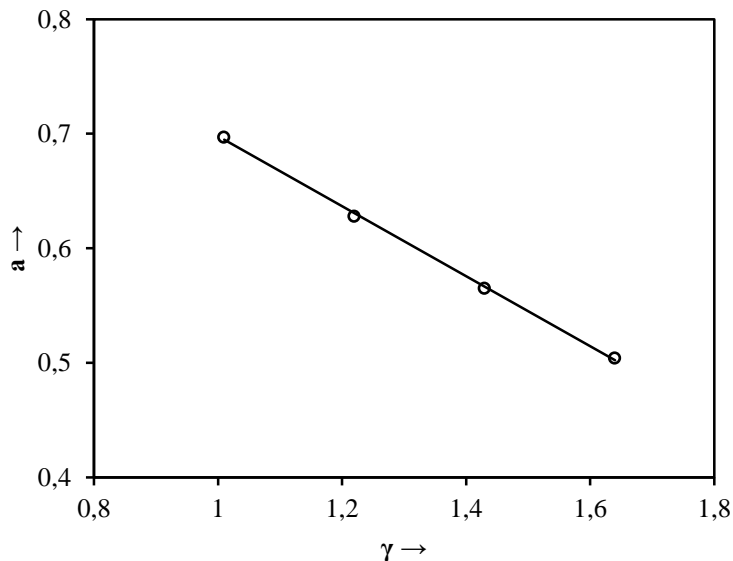


Figure 3.17 : (—) Variation du coefficient « a » en fonction de γ .

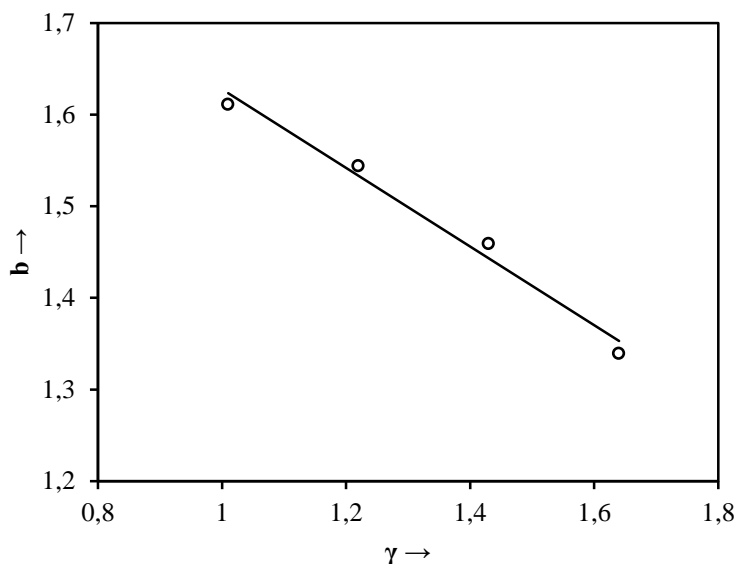


Figure 3.18 : (—) Variation du coefficient « b » en fonction de γ .

La relation linéaire $\Theta = f(Fr_1, \gamma)$ traduisant la variation de s/h_1 en fonction de Fr_1 et du rapport γ de compacité pour $(h_0/h_2 \geq 1)$, est donnée par (3.12):

$$\Theta = (1 - 0,31\gamma)Fr_1 + (0,43\gamma - 2,06) \tag{3.12}$$

Pour une gamme du nombre de Froude: $4,00 \leq Fr_1 \leq 9,10$, et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,65$.

La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale Θ est indiquée sur la figure (3.19).

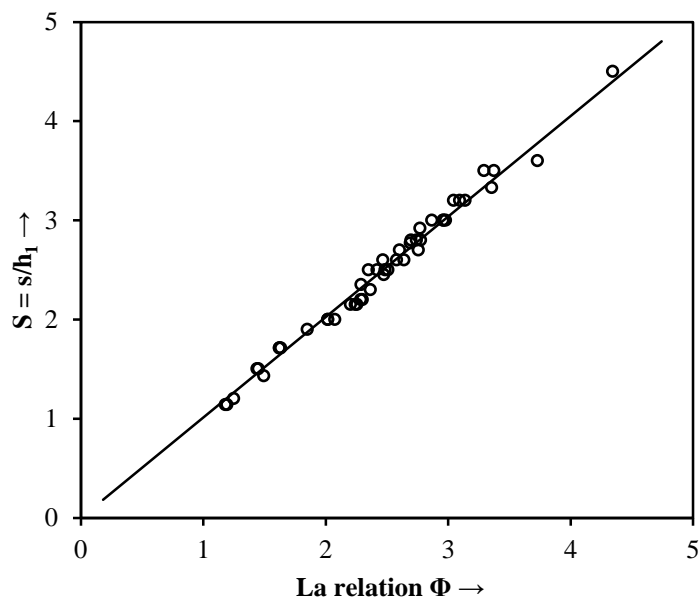


Figure 3.19 : Variation expérimentale de la hauteur relative du seuil S en fonction de $\Theta = (1 - 0,31\gamma).Fr_1 + (0,43\gamma - 2,06)$. (o) points expérimentaux pour $(h_0/h_2 \geq 1)$. (—) première bissectrice.

La figure (3.19) montre que la majorité des points expérimentaux s'accumule autour de la première bissectrice ce que minimise l'erreur relative entre les résultats expérimentaux de S et la fonction $\Theta = (1 - 0,31\gamma).Fr_1 + (0,43\gamma - 2,06)$.

L'erreur ΔS entre les résultats expérimentaux du rapport $S = s/h_1$ et la fonction Θ pour $h_0/h_2 \geq 1$ est donné par le tableau (3.13) :

Tableau 3.13: Erreur relative entre les valeurs expérimentales de S et les valeurs de la relation théorique obtenue Θ (cas où $h_0/h_2 \geq 1$).

$h_0/h_2 \geq 1$									
γ	S	Fr ₁	Θ	$\Delta S(\%)$	γ	S	Fr ₁	Θ	$\Delta S(\%)$
0,91	3,33	7,00	3,36	0,80	1,23	3,00	7,26	2,96	1,31
0,91	1,71	4,60	1,63	4,47	1,24	2,35	6,20	2,29	2,56
0,92	1,71	4,60	1,62	5,05	1,28	2,50	6,40	2,35	5,96
0,92	1,14	4,00	1,19	4,81	1,30	2,60	6,65	2,47	5,04
0,93	1,50	4,37	1,45	3,33	1,35	2,20	6,50	2,30	4,56
0,94	1,50	4,37	1,44	3,95	1,36	3,60	9,00	3,73	3,62
0,94	3,50	7,10	3,38	3,56	1,37	2,70	7,35	2,76	2,13
0,95	2,00	5,20	2,02	0,86	1,39	2,80	7,45	2,78	0,80
0,95	2,00	5,20	2,02	0,86	1,40	2,45	6,95	2,48	1,05
0,96	2,00	5,30	2,08	3,78	1,42	3,20	8,20	3,14	1,85
0,97	3,00	6,59	2,97	1,15	1,42	2,60	7,20	2,58	0,72
0,98	1,43	4,50	1,49	4,50	1,52	2,15	6,90	2,24	4,29
0,99	1,71	4,70	1,62	5,07	1,54	2,15	6,99	2,26	4,89
0,99	2,50	5,85	2,42	3,19	1,54	2,20	7,05	2,29	3,93
1,00	2,92	6,38	2,77	5,06	1,54	2,30	7,20	2,36	2,82
1,01	1,90	5,06	1,85	2,63	1,55	2,50	7,47	2,49	0,51
1,02	2,80	6,38	2,74	2,10	1,58	3,00	8,55	2,98	0,61
1,02	1,20	4,20	1,25	4,21	1,59	2,60	7,92	2,64	1,54
1,03	2,70	6,20	2,60	3,58	1,60	2,50	7,70	2,51	0,35
1,08	3,50	7,35	3,29	5,90	1,62	3,00	8,50	2,87	4,40
1,10	4,50	9,00	4,34	3,47	1,63	2,80	8,20	2,70	3,66
1,10	1,14	4,20	1,18	3,58	1,65	3,20	9,00	3,05	4,81
1,17	2,15	5,90	2,20	2,47	1,65	3,20	9,10	3,09	3,29
1,22	2,77	6,80	2,69	2,79					

Le tableau 2.5 montre que 87 % des erreurs sont ≤ 5 %.

Dans la partie mineure du canal rectangulaire composé ($h_0/h_2 \geq 1$), les figures (3.20) et (3.21) montrent que les coefficients « a » et « b » des droites d'ajustements varient en fonction du rapport de compacité γ , suivant des droites d'équations (3.12) et (3.13):

$$a = 2,27 - 1,01\gamma \quad R^2 = 0,999 \quad (3.12)$$

$$b = 13,78 - 7,30\gamma \quad R^2 = 0,997 \quad (3.13)$$

La représentation graphique des coefficients « a » et « b » en fonction de γ pour $h_0/h_2 < 1$ est donné par les figures (3.20) et (3.21):

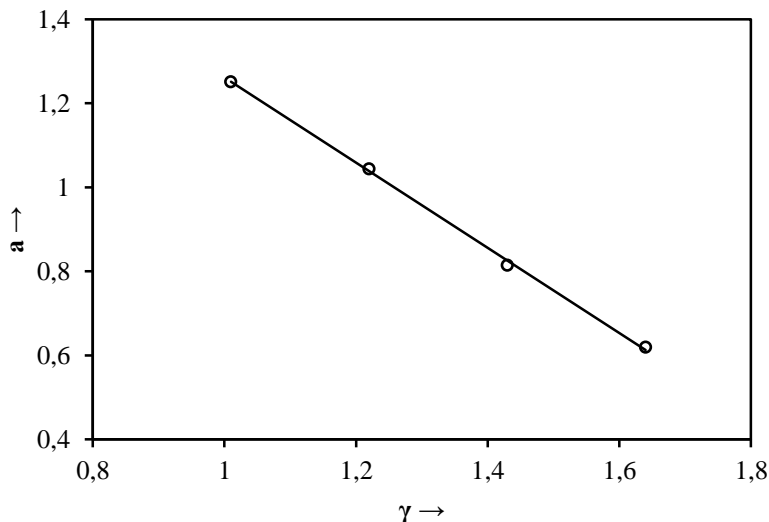


Figure 3.20 : (—) Variation du coefficient « a » en fonction de γ .

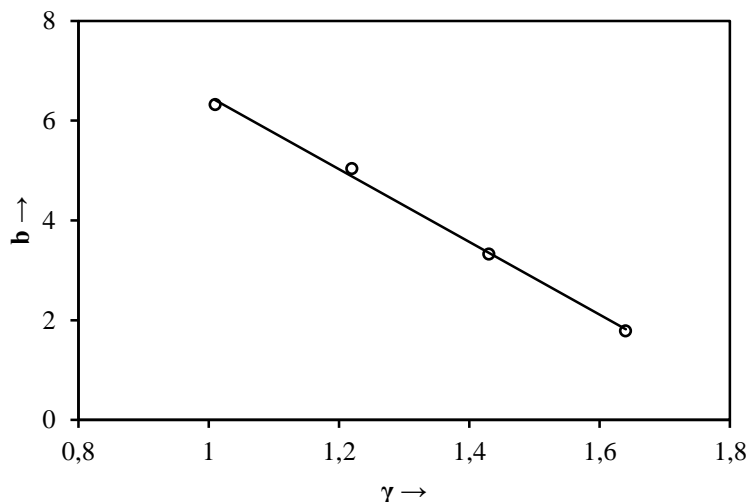


Figure 3.21: (—) Variation du coefficient « b » en fonction de γ .

La relation linéaire $\Sigma = f(Fr_1, \gamma)$ traduisant la variation de s/h_1 en fonction de Fr_1 et du rapport γ de compacité pour $(h_0/h_2 < 1)$, est donnée par la relation (3.14) :

$$\Sigma = (2,27 - 1,01\gamma).Fr_1 + (7,30\gamma - 13,78) \tag{3.14}$$

Pour une gamme du nombre de Froude: $8,30 \leq Fr_1 \leq 15,20$, et des valeurs du rapport de compacité : $0,91 \leq \gamma \leq 1,68$. La représentation graphique des points de mesures et de l'équation expérimentale Σ est indiquée sur la figure (3.22).

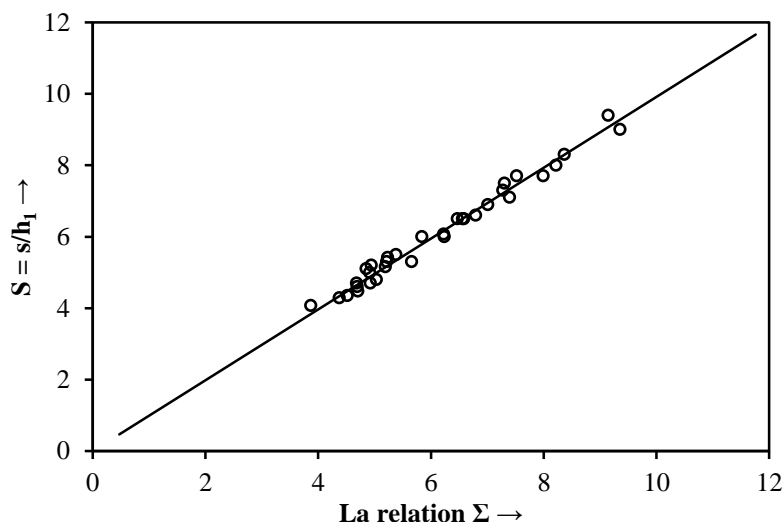


Figure 3.22 : Variation expérimentale de la hauteur relative du seuil S en fonction de $\Sigma = (2,27 - 1,01\gamma).Fr_1 + (7,30\gamma - 13,78)$. (o) points expérimentaux. (—) première bissectrice.

La figure (3.22) montre que la majorité des points expérimentaux s’accumule autour de la première bissectrice ce que minimise l’erreur relative entre les résultats expérimentaux de S et la fonction : $\Sigma = s/h_1 = (2,27 - 1,01\gamma)Fr_1 + (7,30\gamma - 13,78)$.

L’erreur ΔS entre les résultats expérimentaux du rapport $S = s/h_1$ et la fonction Σ pour $h_0/h_2 < 1$ est donné par le tableau (3.14) :

Tableau 3.14: Erreur relative entre les valeurs expérimentales de S et les valeurs de la relation théorique obtenue Σ (cas où $h_0/h_2 < 1$).

h ₀ /h ₂ < 1									
γ	S	Fr ₁	Σ	ΔS (%)	γ	S	Fr ₁	Σ	ΔS (%)
0,91	6,00	9,90	6,24	3,95	1,28	9,40	13,90	9,15	2,69
0,94	5,42	9,20	5,23	3,48	1,33	5,30	10,50	5,66	6,78
0,95	5,50	9,33	5,38	2,15	1,38	4,48	9,60	4,71	5,03
0,96	6,90	10,60	7,01	1,63	1,39	9,00	15,00	9,36	3,98
0,98	6,50	10,30	6,56	0,92	1,42	5,16	10,30	5,19	0,67
1,01	5,30	9,30	5,22	1,56	1,43	8,00	14,00	8,22	2,74
1,02	7,50	11,00	7,30	2,62	1,45	6,60	12,40	6,79	2,93
1,02	6,00	9,82	5,84	2,65	1,45	7,30	13,00	7,28	0,32
1,10	5,10	9,15	4,85	4,81	1,45	4,29	9,40	4,38	2,02
1,10	4,70	9,00	4,68	0,40	1,54	4,80	10,60	5,04	4,93
1,10	4,07	8,30	3,87	4,92	1,56	7,10	14,10	7,40	4,21
1,15	6,50	10,80	6,59	1,34	1,63	5,00	10,90	4,92	1,65
1,15	4,70	9,30	4,92	4,77	1,64	7,70	15,20	7,52	2,35
1,19	8,30	12,60	8,37	0,78	1,64	6,80	14,00	6,78	0,26
1,19	4,35	9,00	4,52	3,91	1,65	6,50	13,60	6,47	0,42
1,20	7,70	12,30	7,99	3,81	1,67	5,20	11,20	4,94	4,92
1,25	6,07	10,80	6,23	2,57	1,68	5,50	11,82	5,26	4,38
1,26	4,60	9,30	4,69	2,04					

D'après le tableau (3.14) en remarque que 94 % des erreurs sont inférieures à 5 %.

III.4.3. Relation entre le rapport γ de compacité et la position relative x/h_2 du seuil

Les résultats expérimentaux montrent que chaque intervalle du rapport de compacité correspond à une certaine position relative x/h_2 du seuil, sauf dans le cas du ressaut classique où $\gamma \leq 0,90$ nous avons constaté et dans les deux parties du canal composé que, les mesures expérimentales s'ajustent autour d'une courbe de puissance de la forme $x/h_2 = a\gamma^b$.

Dans le canal mineur ($h_0/h_2 \geq 1$) cette variation est donnée par la relation (3.15) suivante.

$$x/h_2 = 4,22\gamma^{-0,92}, \quad R^2 = 0,983 \quad \text{pour } \gamma \leq 0,90 \quad (3.15)$$

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure (3.23).

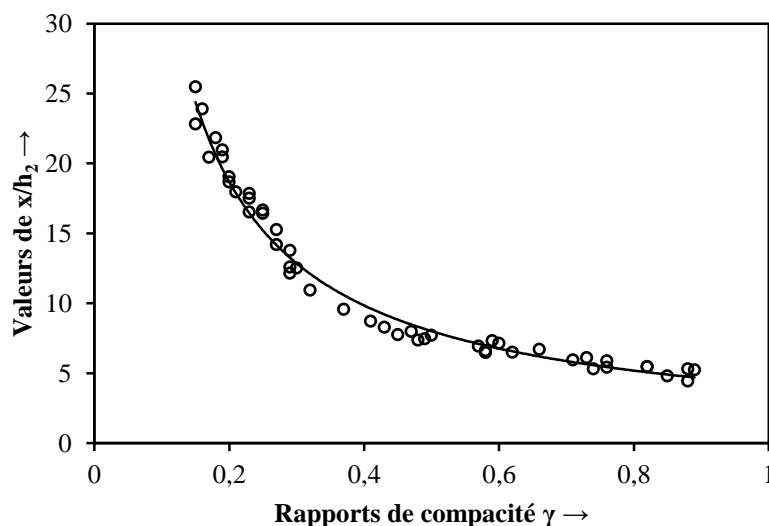


Figure 3.23: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ pour le ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$) et ($h_0/h_2 \geq 1$). (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.

Pour des rapports de compacité $\gamma > 0,90$, les variations de la position relative du seuil sont données par le tableau (3.15) :

Tableau 3.15 : Variation de la position relative du seuil x/h_2 pour chaque intervalle du rapport de compacité γ pour $h_0/h_2 \geq 1$.

Intervalle de variation de γ	Centre de la classe	Valeur moyenne de x/h_2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	1,01	3,92
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	1,22	3,49
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	1,43	3,11
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	1,64	2,79

La représentation graphique de la fonction $x/h_2 = f(\gamma)$ à aboutit à une courbe de puissance de la forme $x/h_2 = a\gamma^b$ (relation 3.16):

$$x/h_2 \approx 3,97\gamma^{-0,70}, \quad R^2 = 0,996 \quad \text{Pour : } 0,91 \leq \gamma \leq 1,74 \quad (3.16)$$

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure (3.24).

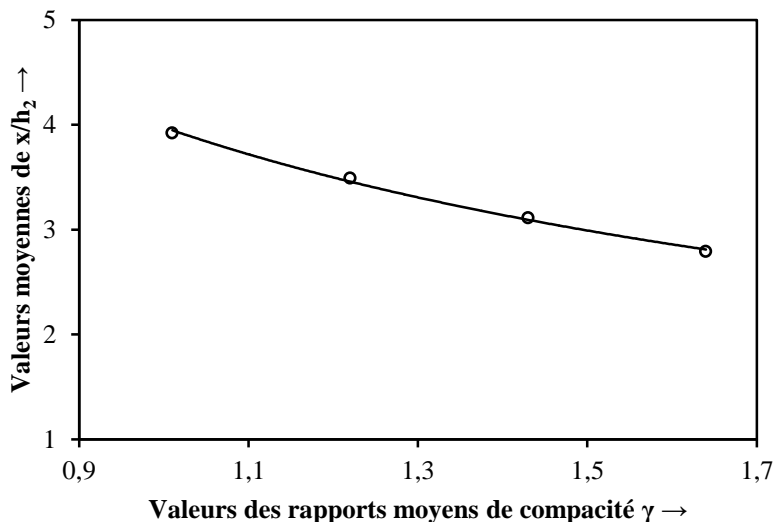


Figure 3.24: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction des rapports moyens de compacité γ pour ($h_0/h_2 \geq 1$). (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.

Pour un rapport γ de compacité égale à l'unité, l'équation (3.16) donne un rapport $Lr^*/h_2 \approx 4$. Dans le canal major ($h_0/h_2 < 1$) cette variation est donnée par la relation (3.17) suivante.

$$x/h_2 = 5,94\gamma^{-0,87}, \quad R^2 = 0,987 \quad \text{pour } \gamma \leq 0,90 \quad (3.17)$$

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure (3.25).

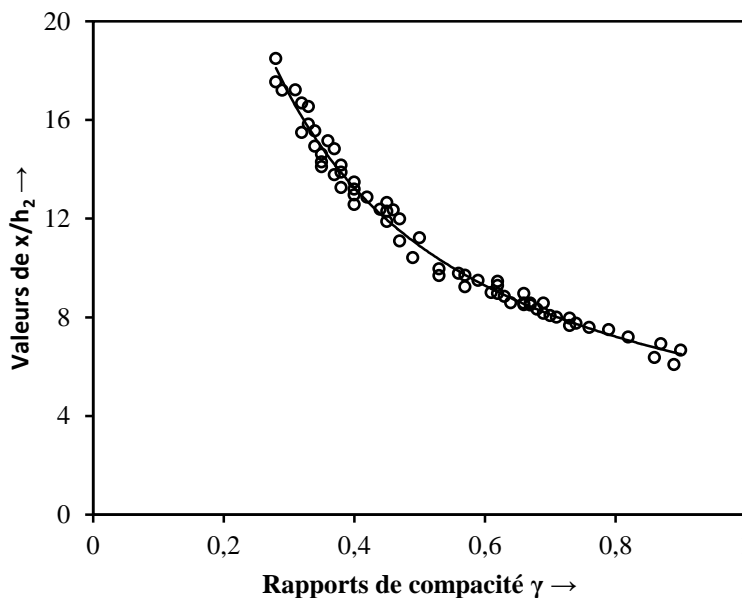


Figure 3.25: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ pour le ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$) et ($h_0/h_2 < 1$). (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.

Pour des rapports de compacité $\gamma > 0,90$, les variations de la position relative du seuil sont données par le tableau (3.16) :

Tableau 3.16 : Variation de la position relative du seuil x/h_2 pour chaque intervalle du rapport de compacité γ pour $h_0/h_2 < 1$.

Intervalle de variation de γ	Centre de la classe	Valeur moyenne de x/h_2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	1,01	4,48
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	1,22	3,56
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	1,43	2,85
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	1,64	2,22

La représentation graphique de la fonction $x/h_2 = f(\gamma)$ à aboutit à une courbe de puissance de la forme :

$$x/h_2 \approx 4,64\gamma^{-1,43}, \quad R^2 = 0,991 \quad \text{Pour : } 0,91 \leq \gamma \leq 1,74 \quad (3.18)$$

L'équation précédente est représentée graphiquement sur la figure (3.26).

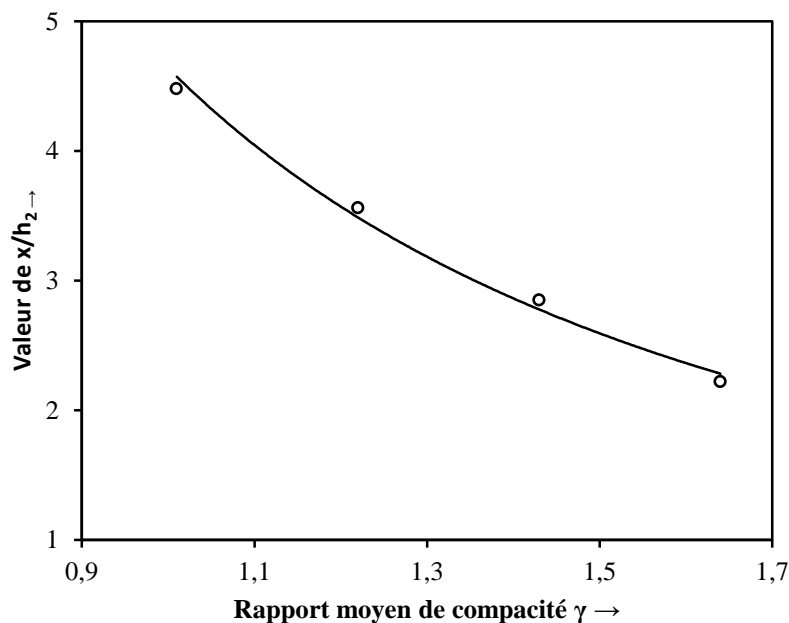


Figure 3.26: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction des rapports moyens de compacité γ pour ($h_0/h_2 < 1$). (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.

Pour un rapport γ de compacité égale à l'unité, l'équation (3.18) donne un rapport $Lr^*/h_2 \approx 4,64$.

III.4.4. Profil de surface généralisé

Pour la gamme de h_1 variant de 2 à 5 cm, nous avons représenté le profil de surface généralisé $y = f(x)$, telles que : $y = [h(x) - h_1] / [h_2 - h_1]$, $X = x/Lr$.

La figure (3.27) représente les profils de surface du ressaut relatif à chaque valeur moyenne de compacité du ressaut, à savoir : $\gamma \leq 0,90$, $\gamma = 1,01$, $\gamma = 1,22$, $\gamma = 1,43$, $\gamma = 1,64$. L'analyse des points expérimentaux correspondant au ressaut classique ($\gamma \leq 0,90$) par le logiciel Graph (Version 4.4.2), à montrer pour chaque cas de l'écoulement que la variation de la fonction $y = f(X)$ est tangente hyperbolique d'équation $y = a \tanh [bX]$, (relation 3.19).

$$y = 1,23 \tanh (1,14X), \quad R^2 = 0,982 \quad (3.19)$$

Dans le cas où l'écoulement s'effectue au niveau du lit mineur où $(h_0/h_2 \geq 1)$ la représentation graphique des profils des surfaces généralisées du ressaut est donnée par la figure (3.27).

:

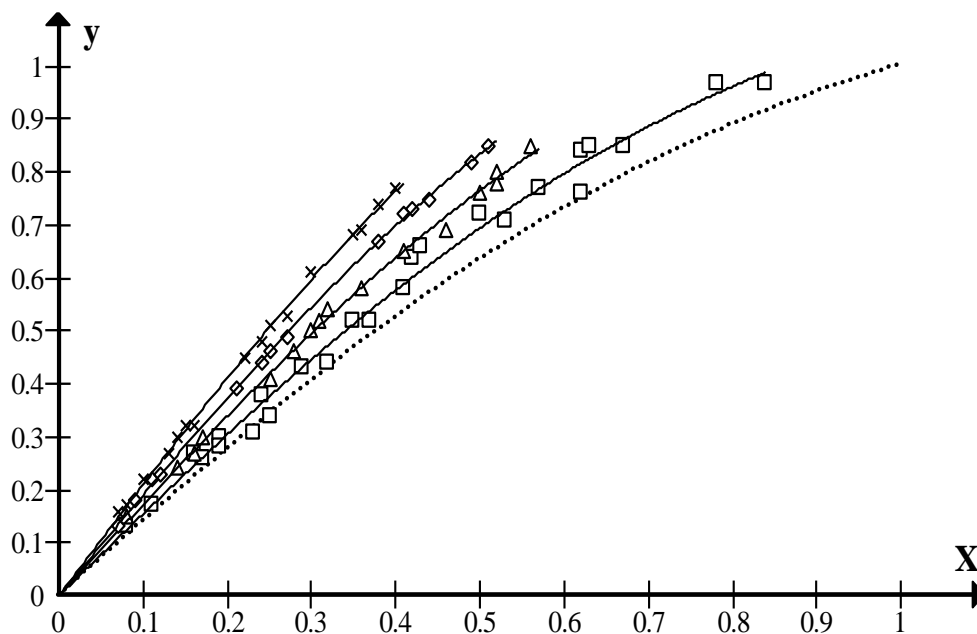


Figure 3.27: Variation expérimentales du profil de surface $[y = f(X)]$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section rectangulaire composé, pour quatre rapports intermédiaire de compacité pour $(h_0/h_2 \geq 1)$. (....) Courbe correspond au ressaut classique selon l'équation $y = 1,23 \tanh [1,14X]$ ($\gamma \leq 0,90$). (—) Courbes d'ajustements pour : (□) $\gamma=1,01$; (Δ) $\gamma=1,22$; (\diamond) $\gamma=1,43$ et (\times) $\gamma=1,64$.

La figure (3.27) montre que plus le rapport de compacité augmente, plus la valeur du coefficient « a » augmente, ce qui influe sur l'allure des courbes d'ajustements. Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$ pour chaque valeur de γ et pour $h_0/h_2 \geq 1$, sont consignées dans les tableaux (3.17) :

Tableau 3.17 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$								
γ	X	y	γ	X	y	γ	X	y
0,91	0,23	0,31	1,11	0,42	0,64	1,40	0,24	0,44
0,92	0,84	0,97	1,22	0,25	0,41	1,40	0,38	0,67
0,93	0,62	0,76	1,22	0,36	0,58	1,40	0,51	0,85
0,94	0,25	0,34	1,22	0,46	0,69	1,44	0,09	0,18
0,95	0,57	0,77	1,22	0,56	0,85	1,44	0,27	0,49
0,95	0,32	0,44	1,23	0,14	0,24	1,44	0,41	0,72
0,96	0,17	0,26	1,23	0,32	0,54	1,46	0,11	0,22
0,96	0,29	0,43	1,24	0,17	0,30	1,56	0,13	0,27
0,98	0,78	0,97	1,24	0,31	0,52	1,56	0,27	0,53
1,00	0,11	0,17	1,24	0,52	0,78	1,56	0,35	0,68
1,00	0,53	0,71	1,28	0,28	0,46	1,66	0,10	0,22
1,00	0,67	0,85	1,28	0,50	0,76	1,66	0,15	0,32
1,00	0,37	0,52	1,30	0,16	0,27	1,66	0,22	0,45
1,03	0,19	0,28	1,30	0,30	0,50	1,66	0,40	0,77
1,03	0,41	0,58	1,30	0,41	0,65	1,66	0,38	0,74
1,03	0,62	0,84	1,30	0,52	0,80	1,70	0,16	0,32
1,08	0,19	0,30	1,32	0,08	0,15	1,71	0,14	0,30
1,08	0,24	0,38	1,38	0,12	0,23	1,71	0,25	0,51
1,08	0,08	0,13	1,38	0,07	0,13	1,71	0,36	0,69
1,09	0,35	0,52	1,38	0,25	0,46	1,74	0,07	0,16
1,09	0,50	0,72	1,38	0,21	0,39	1,74	0,08	0,17
1,09	0,63	0,85	1,38	0,42	0,73	1,74	0,24	0,48
1,10	0,43	0,66	1,38	0,44	0,75	1,74	0,30	0,61
1,11	0,16	0,27	1,38	0,49	0,82			

Le tableau (3.18) regroupe les différents coefficients des courbes d'ajustement des relations expérimentales, liant $y = (h_x - h_1)/(h_2 - h_1)$ du surface du ressaut au rapport relative $X = x/Lr^*$, pour différents rapports moyennes de compacité γ pour $h_0/h_2 \geq 1$:

Tableau 3.18 : Valeurs expérimentales de X et de y pour quatre rapports intermédiaires γ de compacité du ressaut contrôlé pour $h_0/h_2 \geq 1$.

Intervalles des rapports de compacité	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	$y = 1,29 \text{Tanh}(1,20X)$	0,990
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	$y = 1,36 \text{Tanh}(1,28X)$	0,997
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	$y = 1,42 \text{Tanh}(1,35X)$	0,999
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	$y = 1,49 \text{Tanh}(1,42X)$	0,998

Les coefficients « a » et « b » des figures (3.28) et (3.29) varient en fonction du rapport de compacité γ , selon les équations suivantes:

$$a = 0,31\gamma + 0,97, \quad R^2 = 0,999 \quad (3.20)$$

$$b = 0,35\gamma + 0,84, \quad R^2 = 0,999 \quad (3.21)$$

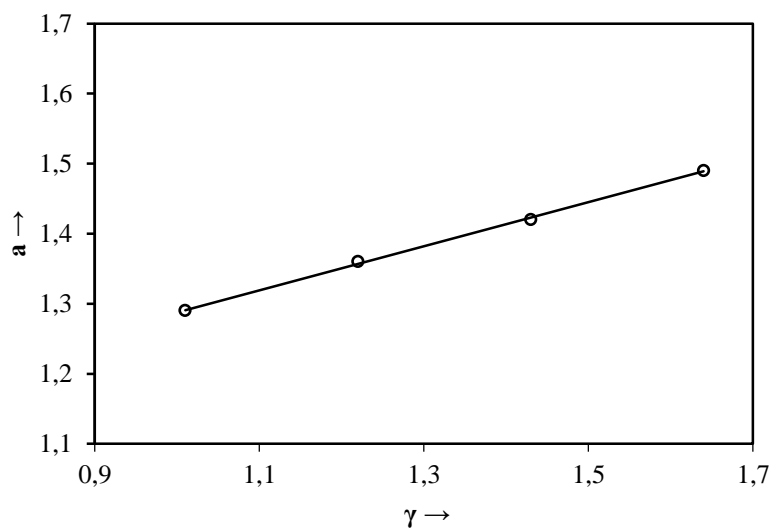


Figure 3.28 : (—) Variation de coefficient « a » en fonction de γ .

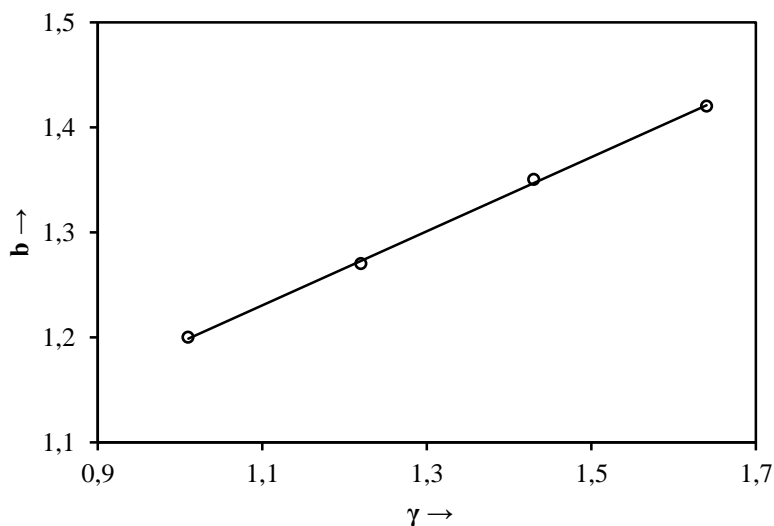


Figure 3.29: (—) Variation de coefficient « b » en fonction de γ .

La relation expérimentale traduisant la variation de y en fonction de X et du rapport γ de compacité, est la suivante :

$$\Omega = (0,31\gamma + 0,97) \operatorname{Tanh} [(0,35\gamma + 0,84)X] \tag{3.22}$$

Pour $0,91 \leq \gamma \leq 1,74$.

Si pour un rapport γ de compacité égale à 0,9 (ressaut classique), la relation (3.22) donne : $\Omega = 1,24 \text{Tanh} [1,15X]$, ce qui implique la relation (3.19), correspondante au ressaut classique.

La représentation graphique de y en fonction de Ω est donnée par la figure (3.30) :

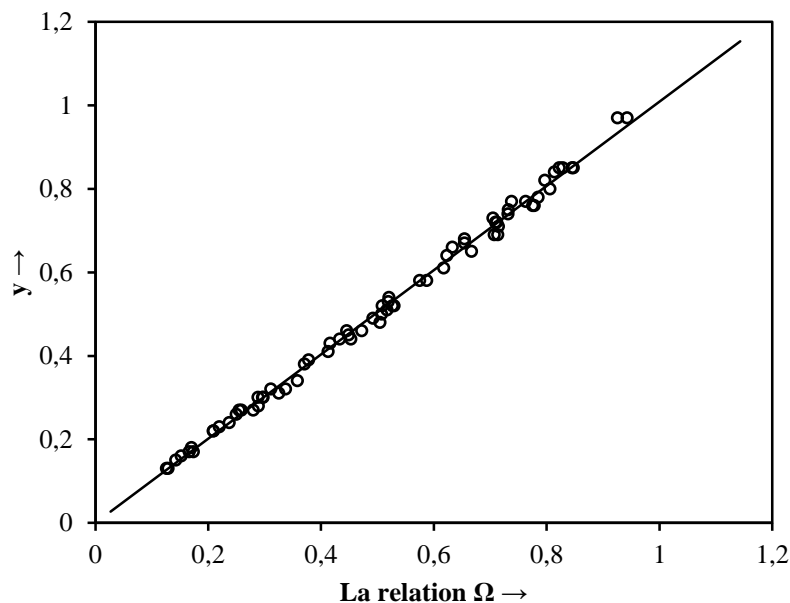


Figure 3.30: Variation expérimentale du profil de surface du ressaut y en fonction de $\Omega = (0,31\gamma + 0,97) \text{Tanh} [(0,35\gamma + 0,84)X]$ pour $(h_0/h_2 \geq 1)$. (o) points expérimentaux. (—) première bissectrice.

Les erreurs relatives entre l'équation expérimentale Ω et y sont données dans le tableau (3.19):

Tableau 3.19 : Erreur relative entre les valeurs expérimentales de y et les valeurs de la relation théorique obtenue Ω pour $h_0/h_2 \geq 1$.

$h_0/h_2 \geq 1$									
γ	X	y	Ω	Δy (%)	γ	X	y	Ω	Δy (%)
0,91	0,23	0,31	0,33	5,15	1,30	0,16	0,27	0,28	3,88
0,92	0,84	0,97	0,94	2,77	1,30	0,30	0,50	0,51	1,62
0,93	0,62	0,76	0,78	2,41	1,30	0,41	0,65	0,67	2,68
0,94	0,25	0,34	0,36	5,44	1,30	0,52	0,80	0,81	0,78
0,95	0,57	0,77	0,74	4,12	1,32	0,08	0,15	0,14	4,57
0,95	0,32	0,44	0,45	3,04	1,38	0,12	0,23	0,22	4,32
0,96	0,17	0,26	0,25	3,81	1,38	0,07	0,13	0,13	0,71
0,96	0,29	0,43	0,42	3,19	1,38	0,25	0,46	0,45	3,01
0,98	0,78	0,97	0,93	4,51	1,38	0,21	0,39	0,38	2,91
1,00	0,11	0,17	0,17	2,00	1,38	0,42	0,73	0,71	3,35
1,00	0,53	0,71	0,71	0,69	1,38	0,44	0,75	0,73	2,30
1,00	0,67	0,85	0,85	0,23	1,38	0,49	0,82	0,80	2,75
1,00	0,37	0,52	0,53	1,88	1,40	0,24	0,44	0,43	1,47
1,03	0,19	0,28	0,29	3,25	1,40	0,38	0,67	0,65	2,27
1,03	0,41	0,58	0,59	1,36	1,40	0,51	0,85	0,83	2,48
1,03	0,62	0,84	0,81	3,04	1,44	0,09	0,18	0,17	5,28
1,08	0,19	0,30	0,30	1,11	1,44	0,27	0,49	0,49	0,52
1,08	0,24	0,38	0,37	2,39	1,44	0,41	0,72	0,71	1,38
1,08	0,08	0,13	0,13	2,51	1,46	0,11	0,22	0,21	4,60
1,09	0,35	0,52	0,53	1,43	1,56	0,13	0,27	0,26	4,03
1,09	0,50	0,72	0,71	1,06	1,56	0,27	0,53	0,52	1,90
1,09	0,63	0,85	0,85	0,50	1,56	0,35	0,68	0,65	3,74
1,10	0,43	0,66	0,63	4,08	1,66	0,10	0,22	0,21	4,75
1,11	0,16	0,27	0,26	5,55	1,66	0,15	0,32	0,31	2,58
1,11	0,42	0,64	0,62	2,55	1,66	0,22	0,45	0,45	0,10
1,22	0,25	0,41	0,41	0,81	1,66	0,40	0,77	0,76	0,86
1,22	0,36	0,58	0,58	0,76	1,66	0,38	0,74	0,73	1,10
1,22	0,46	0,69	0,71	2,52	1,70	0,16	0,32	0,34	5,56
1,22	0,56	0,85	0,82	3,19	1,71	0,14	0,30	0,30	0,64
1,23	0,14	0,24	0,24	0,89	1,71	0,25	0,51	0,52	1,44
1,23	0,32	0,54	0,52	3,52	1,71	0,36	0,69	0,71	3,50
1,24	0,17	0,30	0,29	3,72	1,74	0,07	0,16	0,15	4,64
1,24	0,31	0,52	0,51	2,17	1,74	0,08	0,17	0,17	2,46
1,24	0,52	0,78	0,79	0,71	1,74	0,24	0,48	0,50	5,15
1,28	0,28	0,46	0,47	2,74	1,74	0,30	0,61	0,62	1,26
1,28	0,50	0,76	0,78	2,08					

D'après le tableau (3.19) en remarque que 91,50 % des erreurs sont inférieurs à 5 %.

L'analyse des points expérimentaux correspondant au ressaut classique ($\gamma \leq 0,90$) par le logiciel Graph, à montrer pour chaque cas de l'écoulement que la variation de la fonction $y = f(X)$ est tangente hyperbolique d'équation $y = a \tanh [bX]$, (relation 3.31).

$$y = 1,19 \tanh [1,40.X], \quad R^2 = 0,982 \quad (3.23)$$

Dans le cas où l'écoulement s'effectue au niveau du lit majeur ($h_0/h_2 < 1$) la représentation graphique des profils des surfaces généralisées du ressaut est donnée par la figure (3.27).

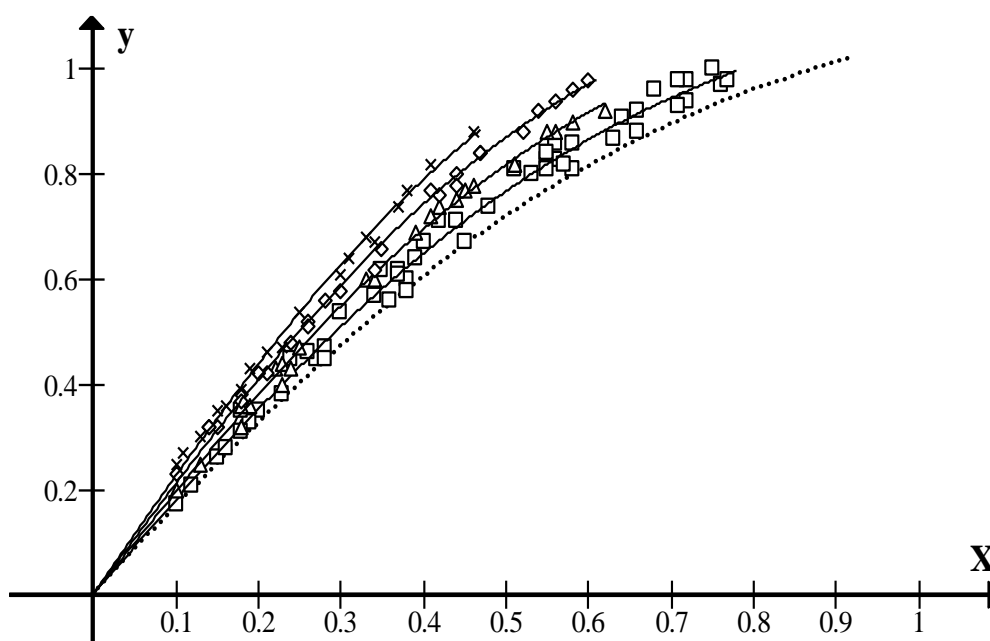


Figure 3.31: Variation expérimentales du profil de surface [$y = f(X)$] du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section rectangulaire composé, pour quatre rapports intermédiaire de compacité pour ($h_0/h_2 < 1$). (....) Courbe correspond au ressaut classique selon l'équation $y = 1,19 \tanh [1,40X]$ ($\gamma \leq 0,90$). (—) Courbes d'ajustements pour : (\square) $\gamma = 1,01$; (Δ) $\gamma = 1,22$; (\diamond) $\gamma = 1,43$ et (\times) $\gamma = 1,64$.

La figure (3.31) montre que plus le rapport de compacité augmente, plus la valeur du coefficient « a » augmente, ce qui influe sur l'allure des courbes d'ajustements.

Les valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$ pour chaque valeur de γ et pour $h_0/h_2 < 1$, sont consignées dans les tableaux (3.20) :

Tableau 3.20 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$ pour $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 < 1$														
γ	X	y	γ	X	y	γ	X	y	γ	X	y	γ	X	y
0,91	0,27	0,45	1,01	0,19	0,33	1,11	0,37	0,61	1,31	0,39	0,69	1,51	0,14	0,32
0,91	0,63	0,87	1,01	0,51	0,81	1,11	0,53	0,80	1,34	0,44	0,75	1,52	0,10	0,23
0,92	0,23	0,38	1,01	0,55	0,81	1,14	0,42	0,74	1,34	0,24	0,48	1,52	0,26	0,51
0,92	0,40	0,67	1,01	0,55	0,84	1,15	0,22	0,43	1,34	0,34	0,62	1,52	0,47	0,84
0,93	0,38	0,58	1,01	0,75	1,00	1,15	0,23	0,40	1,34	0,44	0,78	1,53	0,14	0,32
0,95	0,15	0,26	1,02	0,26	0,46	1,15	0,41	0,72	1,34	0,56	0,94	1,60	0,23	0,47
0,95	0,28	0,45	1,02	0,44	0,71	1,15	0,56	0,88	1,36	0,20	0,42	1,61	0,25	0,54
0,95	0,34	0,57	1,02	0,56	0,86	1,15	0,55	0,88	1,36	0,35	0,66	1,61	0,34	0,67
0,96	0,28	0,47	1,02	0,55	0,83	1,17	0,18	0,32	1,36	0,44	0,80	1,66	0,21	0,46
0,96	0,18	0,31	1,02	0,77	0,98	1,17	0,62	0,92	1,37	0,21	0,42	1,66	0,15	0,35
0,96	0,37	0,62	1,02	0,68	0,96	1,19	0,19	0,36	1,37	0,47	0,84	1,67	0,30	0,61
0,96	0,64	0,91	1,03	0,35	0,62	1,19	0,33	0,60	1,37	0,60	0,98	1,68	0,18	0,39
0,96	0,48	0,74	1,03	0,58	0,86	1,19	0,51	0,82	1,39	0,18	0,38	1,69	0,13	0,30
0,96	0,76	0,97	1,05	0,72	0,94	1,19	0,45	0,77	1,39	0,42	0,76	1,69	0,46	0,88
0,96	0,71	0,93	1,07	0,12	0,21	1,19	0,58	0,90	1,39	0,58	0,96	1,70	0,16	0,36
0,97	0,36	0,56	1,08	0,39	0,64	1,22	0,24	0,43	1,39	0,52	0,88	1,70	0,33	0,68
0,99	0,38	0,60	1,09	0,56	0,83	1,23	0,10	0,20	1,42	0,15	0,32	1,71	0,19	0,43
0,99	0,30	0,54	1,09	0,71	0,98	1,23	0,46	0,78	1,42	0,28	0,56	1,72	0,41	0,82
0,99	0,58	0,81	1,10	0,24	0,45	1,25	0,13	0,25	1,42	0,54	0,92	1,73	0,11	0,27
0,99	0,72	0,98	1,10	0,16	0,28	1,25	0,25	0,47	1,45	0,18	0,37	1,73	0,37	0,74
0,99	0,66	0,88	1,10	0,42	0,71	1,30	0,34	0,60	1,45	0,30	0,58	1,73	0,38	0,77
0,99	0,20	0,35	1,10	0,57	0,82	1,30	0,51	0,82	1,50	0,26	0,52	1,74	0,10	0,25
1,00	0,10	0,17	1,10	0,66	0,92	1,30	0,23	0,44	1,50	0,41	0,77	1,74	0,31	0,64
1,00	0,45	0,67	1,11	0,18	0,35	1,31	0,18	0,36						

Le tableau (3.21) regroupe les différents coefficients des courbes d'ajustement des relations expérimentales, liant $y = (h_x - h_1)/(h_2 - h_1)$ du surface du ressaut au rapport relative $X = x/Lr^*$, pour différents rapports moyennes de compacité γ pour $h_0/h_2 < 1$:

Tableau 3.21: Valeurs expérimentales de X et de y pour quatre rapports intermédiaires γ de compacité du ressaut contrôlé pour $h_0/h_2 < 1$.

Intervalles des rapports de compacité	Équations des droites	Coefficients de corrélation R^2
$0,91 \leq \gamma \leq 1,11$	$y = 1,21 \text{Tanh} [1,50X]$	0,991
$1,12 \leq \gamma \leq 1,32$	$y = 1,24 \text{Tanh} [1,59X]$	0,997
$1,33 \leq \gamma \leq 1,53$	$y = 1,28 \text{Tanh} [1,66X]$	0,997
$1,54 \leq \gamma \leq 1,74$	$y = 1,32 \text{Tanh} [1,72X]$	0,994

Les coefficients « a » et « b » des figures (3.32) et (3.33) varient en fonction du rapport de compacité γ , selon les équations suivantes:

$$a = 0,18\gamma + 1,03, \quad R^2 = 0,995 \quad (3.24)$$

$$b = 0,35\gamma + 1,15, \quad R^2 = 0,995 \quad (3.25)$$

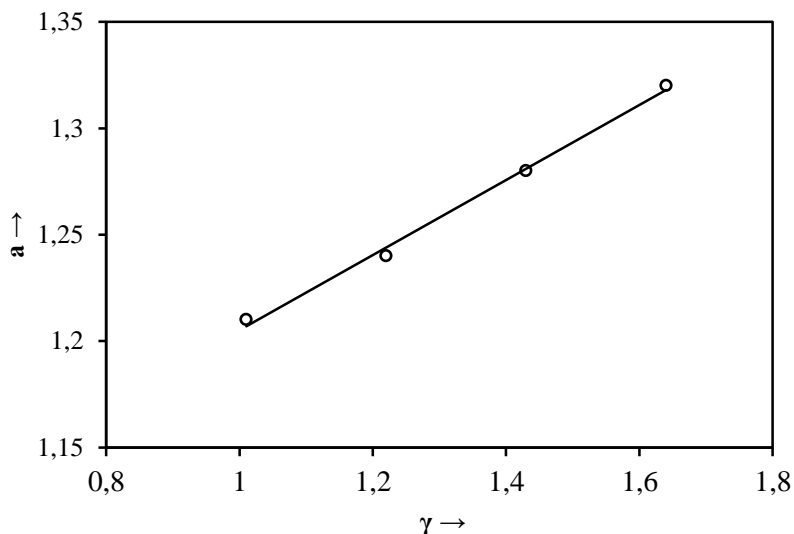


Figure 3.32: (—) Variation de coefficient « a » en fonction de γ .

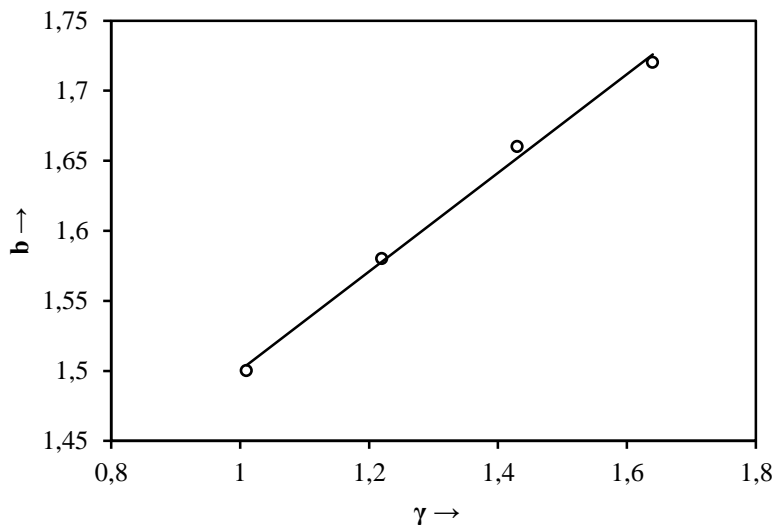


Figure 3.33 : (—) Variation de coefficient « b » en fonction de γ .

La relation expérimentale traduisant la variation de y en fonction de X et du rapport γ de compacité, est la suivante :

$$\mathcal{K} = (0,18\gamma + 1,03) \operatorname{Tanh} [(0,35\gamma + 1,15)X] \quad (3.26)$$

Pour $0,91 \leq \gamma \leq 1,74$.

Si pour un rapport γ de compacité égale à 0,90 (ressaut classique), la relation (3.26) donne :

$\mathcal{K} = 1,19 \tanh [1,46X]$, ce qui implique la relation (3.23), correspondante au ressaut classique.

Les erreurs relatives entre l'équation expérimentale \mathcal{K} et y sont données dans le tableau (3.22):

Tableau 3.22: Erreur relative entre les valeurs expérimentales de y et les valeurs de la relation théorique obtenue \mathcal{K} pour $h_0/h_2 < 1$.

$h_0/h_2 < 1$														
γ	X	y	\mathcal{K}	Δy (%)	γ	X	y	\mathcal{K}	Δy (%)	γ	X	y	\mathcal{K}	Δy (%)
0,91	0,27	0,45	0,45	0,00	1,09	0,56	0,83	0,85	2,68	1,36	0,35	0,66	0,66	0,59
0,91	0,63	0,87	0,87	0,06	1,09	0,71	0,98	0,98	0,41	1,36	0,44	0,80	0,78	2,15
0,92	0,23	0,38	0,39	2,63	1,10	0,24	0,45	0,43	3,78	1,37	0,21	0,42	0,42	0,13
0,92	0,40	0,67	0,63	5,60	1,10	0,16	0,28	0,30	5,60	1,37	0,47	0,84	0,82	2,05
0,93	0,38	0,58	0,61	4,98	1,10	0,42	0,71	0,70	1,74	1,37	0,60	0,98	0,96	2,03
0,95	0,15	0,26	0,26	1,06	1,10	0,57	0,82	0,86	5,41	1,39	0,18	0,38	0,37	3,54
0,95	0,28	0,45	0,47	4,83	1,10	0,66	0,92	0,94	2,38	1,39	0,42	0,76	0,76	0,44
0,95	0,34	0,57	0,56	1,96	1,11	0,18	0,35	0,33	5,11	1,39	0,58	0,96	0,95	1,40
0,96	0,28	0,47	0,47	0,73	1,11	0,37	0,61	0,63	3,79	1,39	0,52	0,88	0,89	0,61
0,96	0,18	0,31	0,31	1,38	1,11	0,53	0,80	0,83	3,39	1,42	0,15	0,32	0,31	2,72
0,96	0,37	0,62	0,60	2,93	1,14	0,42	0,74	0,71	4,51	1,42	0,28	0,56	0,55	1,05
0,96	0,64	0,91	0,89	2,16	1,15	0,22	0,43	0,41	5,40	1,42	0,54	0,92	0,91	0,63
0,96	0,48	0,74	0,74	0,41	1,15	0,23	0,40	0,42	5,96	1,45	0,18	0,37	0,37	1,12
0,96	0,76	0,97	0,98	0,54	1,15	0,41	0,72	0,70	3,35	1,45	0,30	0,58	0,59	2,38
0,96	0,71	0,93	0,94	1,37	1,15	0,56	0,88	0,87	1,45	1,50	0,26	0,52	0,53	2,48
0,97	0,36	0,56	0,59	5,43	1,15	0,55	0,88	0,86	2,57	1,50	0,41	0,77	0,77	0,60
0,99	0,38	0,60	0,62	3,58	1,17	0,18	0,32	0,34	6,06	1,51	0,14	0,32	0,30	6,12
0,99	0,30	0,54	0,51	5,80	1,17	0,62	0,92	0,93	0,78	1,52	0,10	0,23	0,22	5,56
0,99	0,58	0,81	0,85	4,46	1,19	0,19	0,36	0,36	0,07	1,52	0,26	0,51	0,54	5,16
0,99	0,72	0,98	0,96	2,33	1,19	0,33	0,60	0,59	1,43	1,52	0,47	0,84	0,86	2,23
0,99	0,66	0,88	0,91	3,85	1,19	0,51	0,82	0,83	0,66	1,53	0,14	0,32	0,30	5,49
0,99	0,20	0,35	0,35	0,34	1,19	0,45	0,77	0,76	1,84	1,60	0,23	0,47	0,49	4,94
1,00	0,10	0,17	0,18	5,97	1,19	0,58	0,90	0,90	0,40	1,61	0,25	0,54	0,53	1,27
1,00	0,45	0,67	0,71	6,24	1,22	0,24	0,43	0,45	5,02	1,61	0,34	0,67	0,69	3,33
1,01	0,19	0,33	0,34	2,14	1,23	0,10	0,20	0,20	1,92	1,66	0,21	0,46	0,46	0,61
1,01	0,51	0,81	0,78	3,50	1,23	0,46	0,78	0,78	0,33	1,66	0,15	0,35	0,34	3,58
1,01	0,55	0,81	0,82	1,56	1,25	0,13	0,25	0,26	2,15	1,67	0,30	0,61	0,64	4,26
1,01	0,55	0,84	0,82	2,07	1,25	0,25	0,47	0,47	0,74	1,68	0,18	0,39	0,40	3,52
1,01	0,75	1,00	0,98	1,82	1,30	0,34	0,60	0,63	4,76	1,69	0,13	0,30	0,30	1,00
1,02	0,26	0,46	0,45	1,61	1,30	0,51	0,82	0,85	3,94	1,69	0,46	0,88	0,89	0,77
1,02	0,44	0,71	0,70	0,79	1,30	0,23	0,44	0,45	1,48	1,70	0,16	0,36	0,36	1,00
1,02	0,56	0,86	0,83	2,93	1,31	0,18	0,36	0,36	0,95	1,70	0,33	0,68	0,69	2,09
1,02	0,55	0,83	0,83	0,59	1,31	0,39	0,69	0,70	2,03	1,71	0,19	0,43	0,43	0,28
1,02	0,77	0,98	1,00	1,69	1,34	0,44	0,75	0,78	3,76	1,72	0,41	0,82	0,83	0,61
1,02	0,68	0,96	0,94	2,43	1,34	0,24	0,48	0,47	1,98	1,73	0,11	0,27	0,26	5,24
1,03	0,35	0,62	0,59	5,05	1,34	0,34	0,62	0,64	2,69	1,73	0,37	0,74	0,77	3,57
1,03	0,58	0,86	0,86	0,44	1,34	0,44	0,78	0,78	0,23	1,73	0,38	0,77	0,78	1,57
1,05	0,72	0,94	0,97	3,46	1,34	0,56	0,94	0,91	2,70	1,74	0,10	0,25	0,23	6,46
1,07	0,12	0,21	0,22	5,33	1,36	0,20	0,42	0,40	4,63	1,74	0,31	0,64	0,67	4,30
1,08	0,39	0,64	0,65	2,19										

D'après le tableau (3.22) en remarque que 93 % des erreurs sont inférieurs à 5 %.

La représentation graphique de y en fonction de \mathcal{K} est donnée par la figure (3.23):

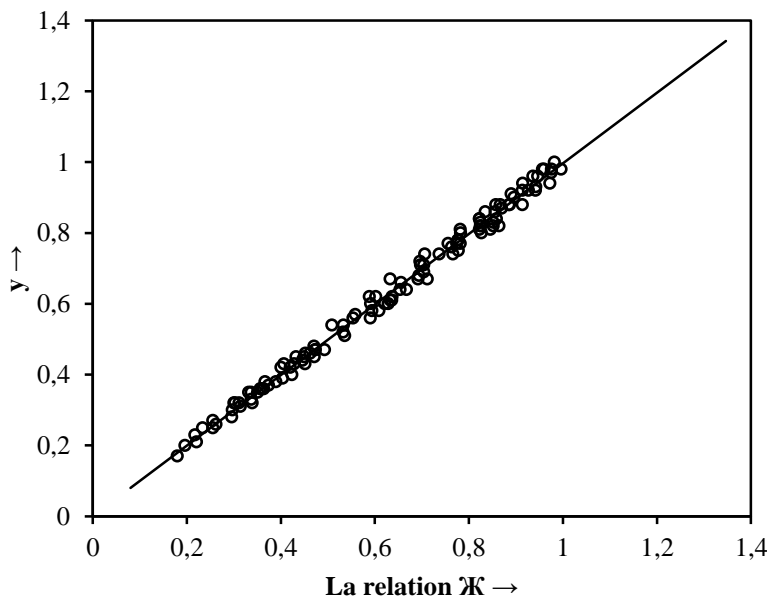


Figure 3.34 : Variation expérimentale du profil de surface du ressaut y en fonction de $\mathcal{K} = (0,18\gamma + 1,03) \tanh [(0,35\gamma + 1,15)X]$ pour $(h_0/h_2 < 1)$. (o) points expérimentaux. (—) première bissectrice.

III.5. Conclusion

À travers cette étude nous avons examiné expérimentalement l'effet du seuil sur la configuration du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire composé; l'analyse des résultats expérimentaux pour les deux parties du canal à savoir le lit mineur et le lit majeur et on a abouti à des relations empiriques adimensionnelles exprimant la variation de la hauteur relative du seuil S ainsi que celle du rapport des hauteurs conjuguées Y , en fonction du nombre de Froude Fr_1 et du facteur de compacité γ défini comme le rapport de la longueur du rouleau Lr^* (classique) et de la position x du seuil.

Concernant la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées, nous avons constaté que pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, le rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Le deuxième résultat obtenu sur la variation de la hauteur relative du seuil S nous avons constaté que pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative du seuil S diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Ces constatations donnent plus d'avantages à notre bassin de dissipation en ce qui concerne sa conception. Les résultats expérimentaux de $y = f(X)$ du profil de la surface du ressaut, montre que cette fonction est de type tangente hyperbolique et pour un rapport de compacité important ; la distance de la position du seuil diminue ce qui donne une configuration minime du bassin de dissipation.

Conclusion de la deuxième partie

La deuxième partie a été consacrée à l'analyse expérimentale de l'effet du seuil à paroi mince sur les différents types de ressauts étudiés. À travers cette partie on a présenté le protocole expérimental pour chaque type de canal et les modifications associées à la forme de la section étudiée.

À travers cette étude nous avons examiné expérimentalement l'effet du seuil sur la configuration du ressaut hydraulique évoluant dans trois types des canaux, à savoir, le canal trapézoïdal, le canal trapézoïdal brusquement élargi à un canal rectangulaire et le canal rectangulaire composé. Pour les trois types des ressauts on a abouti à des relations empiriques adimensionnelles exprimant la variation de la hauteur relative du seuil S ainsi que celle du rapport des hauteurs conjuguées Y , en fonction du nombre de Froude Fr_1 et du facteur de compacité γ (défini comme le rapport de la longueur du rouleau Lr^* (classique) et de la position x du seuil) d'une part. La relation entre la position relative du seuil et le profil de surface du ressaut en fonction du facteur de compacité γ .

Concernant la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées, nous avons constaté pour les trois types des ressauts que pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, le rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Le deuxième résultat obtenu sur la variation de la hauteur relative du seuil S nous avons constaté que pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative du seuil S diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Ces constatations donnent plus d'avantages à notre bassin de dissipation en ce qui concerne sa conception. Les résultats expérimentaux de $y = f(X)$ du profil de la surface du ressaut, montre que cette fonction est de type tangente hyperbolique et pour un rapport de compacité important ; la distance de la position du seuil diminue ce qui donne une configuration minime du bassin de dissipation.

Conclusion générale

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans le premier chapitre de la partie bibliographique, on a abordé les travaux de Wanoschek et Hager (1989) où le ressaut hydraulique dans un canal trapézoïdal symétrique de 45° de pente latérale est analysé. Sur la base de l'approche de la dynamique unidimensionnelle, les auteurs ont montré que le rendement est significativement plus élevé que pour les ressauts dans des canaux rectangulaires. Cette propriété attire l'attention sur ses caractéristiques hydrauliques, soit à un niveau d'eau amont réduit et des avantages sur la construction des parois latérales inclinées.

Par rapport au ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires, le ressaut dans les canaux trapézoïdaux est régi par des caractéristiques importantes d'écoulement spatial.

Une autre propriété particulière des ressauts trapézoïdaux est la présence d'un rouleau de fond et de zones de retour latéral. D'autres considérations se rapportent au rapport des profondeurs conjuguées, aux principales caractéristiques du rouleau de fond, au retour latéral et à la longueur du ressaut. Les auteurs ont décrit les différents types d'instabilités inhérentes à ces ressauts. Ainsi, ils ont présenté un aperçu complet du schéma d'écoulement interne des ressauts dans les canaux trapézoïdaux, au moins en ce qui concerne les propriétés temporelles.

L'étude de Kateb, Debabeche et Benmalek (2013), a permis d'analyser expérimentalement trois types de ressauts à savoir : le ressaut contrôlé par seuil mince, ressaut contrôlé par marche positive et le ressaut force type A. En effet, il a été trouvé, pour les trois configurations de ressaut, des relations empiriques permettant le dimensionnement du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Une étude comparative a été effectuée entre ces trois types de ressauts et il ressort que pour le même nombre de Froude Fr_1 , la profondeur conjuguée d'aval, la position de la marche et la hauteur du seuil sont plus réduites dans le ressaut force de type A, que pour leurs homologues contrôlés par marche positive et par seuil mince. L'étude aborde ensuite, la variation du rendement η en fonction du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, et ceci pour les trois configurations de ressauts étudiées.

L'étude a montré que les points de mesures expérimentales du ressaut de type A, forcé par marche positive, se présente légèrement au-dessus de ceux contrôlés par marche positive, par conséquent, l'effet de la dissipation de l'énergie, pour les trois configurations de ressauts, est quasi identique.

Le deuxième chapitre porte sur les ressauts hydrauliques dans des canaux horizontaux, rectangulaires et non prismatiques. On a distingué les conditions d'écoulement non séparées et

séparées; le premier type est appelé un ressaut hydraulique dans un canal graduellement élargi, tandis que le second est un ressaut dans un élargissement brusque. Les résultats incluent une prédiction rationnelle du rapport des hauteurs conjuguées, de la perte d'énergie relative et des caractéristiques de longueur. Les principales conclusions tirées sont les suivantes:

- Comparé au ressaut hydraulique classique dans un canal prismatique rectangulaire, un ressaut dans un canal élargi nécessite une profondeur d'écoulement initial minimal pour des conditions d'admission identiques.
- La perte d'énergie relative dans le cas non prismatique est la plus faible pour le ressaut hydraulique classique et importante pour un élargissement brusque.
- Les caractéristiques de longueur sont presque indépendantes du rapport de largeur et ont le même ordre de grandeur que dans les canaux prismatiques.
- Le volume des ressauts hydrauliques dans les canaux rectangulaires horizontaux dépend uniquement du nombre de Froude incident, mais pas du rapport de largeur.
- Les ressauts hydrauliques dans les canaux horizontaux sont assez instables par rapport à la position longitudinale; la stabilisation peut être obtenue en fournissant des irrégularités de fond telles que des seuils, des marches positives ou négatives, ou d'autres obstacles.

De même, des mesures approfondies ont été effectuées pour étudier les effets des pentes latérales et le degré d'élargissement d'un bassin de dissipation sur les caractéristiques d'écoulements moyens des ressauts hydrauliques en canal trapézoïdal graduellement élargi. Les caractéristiques du ressaut étudié sont la profondeur en aval, la perte d'énergie et la longueur du ressaut.

En effet, la profondeur conjuguée dans un ressaut hydraulique en canal graduellement élargi dépend de la longueur de ressaut. La longueur de ressaut et le profil de surface ont été prédits avec une équation pour le rapport de profondeur conjuguée. Dans cette étude, un profil quart-elliptique a été utilisé et une équation implicite a été proposée pour la profondeur conjuguée et la perte d'énergie dans un ressaut hydraulique dans un canal graduellement élargi de pente latérale et un angle de divergence. Les résultats montrent un assez bon accord entre le profil proposé et les données expérimentales dans la gamme des expériences réalisées.

Dans un canal rectangulaire élargi, la hauteur conjuguée et la longueur du ressaut se réduisent et la perte d'énergie relative augmente.

Pour chaque angle de divergence, une réduction de la pente latérale entraîne une réduction de la hauteur conjuguée et une augmentation de la perte d'énergie relative et de la

longueur du ressaut. Toute augmentation de l'angle de divergence entraîne une réduction de la profondeur conjuguée et de la longueur du ressaut et une augmentation de la perte d'énergie relative. Par conséquent, pour un bassin de dissipation trapézoïdal, l'élargissement peut être utilisé pour réduire la profondeur d'écoulement et la longueur du ressaut hydraulique.

Dans le troisième chapitre, l'approche de Khattaoui et Achour 2012 a montré que l'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal composé droit a abouti à une équation fonctionnelle de forme $\phi(Fr_1, Y, \beta, \tau) = 0$.

Une nouvelle approche est proposée en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du développement théorique mené par Achour (2000) sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. Après l'injection de cette force dans ce développement, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y , en diminuant, ainsi que de celles du rendement η , en augmentant, se sont certainement rapproché de la réalité.

Afin de trouver l'expression définitive de cette force de résistance, étroitement liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement entre le lit mineur et le lit majeur, des mesures, sur modèle réduit au laboratoire, sont indispensables.

Dans le quatrième chapitre, l'étude de Debabeche 2003 sur l'effet de la compacité du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation du rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident. L'auteur a montré que pour chaque rapport γ de compacité, relatif à une configuration donnée du ressaut, les points de mesures expérimentales s'ajustent au tour d'une courbe de type linéaire, de la forme: $Y = a Fr_1 + b$.

À travers la deuxième partie de notre étude on a examiné expérimentalement l'effet du seuil sur les configurations du ressaut hydraulique évoluant dans trois types des canaux, à savoir, le canal trapézoïdal, le canal trapézoïdal brusquement élargi à un canal rectangulaire et le canal rectangulaire composé. Pour les trois types des ressauts on a abouti à des relations empiriques adimensionnelles exprimant la variation de la hauteur relative du seuil S , ainsi que celle du rapport des hauteurs conjuguées Y , en fonction du nombre de Froude Fr_1 et du facteur de compacité γ (défini comme le rapport de la longueur du rouleau Lr^* (classique) et de la position x du seuil) d'une part. La relation entre la position relative du seuil et le profil de surface du ressaut en fonction du facteur de compacité γ .

Concernant la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées, nous avons constaté pour les trois types des ressauts que pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de

l'écoulement incident, le rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Le deuxième résultat obtenu sur la variation de la hauteur relative du seuil S nous avons constaté que pour une valeur donnée du nombre de Froude Fr_1 de l'écoulement incident, la hauteur relative du seuil S diminue lorsque le rapport de compacité γ augmente.

Ces constatations donnent plus d'avantages à notre bassin de dissipation en ce qui concerne sa conception. Les résultats expérimentaux de $y = f(X)$ du profil de la surface du ressaut, montre que cette fonction est de type tangente hyperbolique et pour un rapport de compacité important ; la distance de la position du seuil diminue ce qui donne une configuration minime du bassin de dissipation.

PRINCIPALES NOTATIONS

A_1	L'aire de la section mouillée initiale	$[m^2]$
A_2	L'aire de la section mouillée finale	$[m^2]$
b	Largeur de la base du canal trapézoïdal	$[m]$
Fr_1	Nombre de Froude incident	$[-]$
F_x	Force de pression relative sur les parois du canal	$[N]$
g	Accélération de la pesanteur	$[m/s^2]$
h_0	Profondeur initiale de l'écoulement	$[m]$
h_1	Hauteur initiale du ressaut	$[m]$
h_2	Hauteur finale du ressaut	$[m]$
$h(x)$	Profondeur de l'eau à la distance x du pied de ressaut	$[m]$
h_b	Hauteur maximale du rouleau de fond	$[m]$
h_a	La profondeur moyenne du ressaut	$[m]$
L_r	Longueur du rouleau	$[m]$
L_j	Longueur du ressaut	$[m]$
L_r^*	Longueur du rouleau classique	$[m]$
L_u	Distance entre le pied du ressaut et le début du rouleau de fond	$[m]$
L_b	Longueur du rouleau de fond	$[m]$
L_0	Longueur de la zone de séparation	$[m]$
m	cotangente de l'angle d'inclinaison de la paroi du canal par rapport à l'horizontale	$[-]$
M	Rapport de forme du canal trapézoïdal	$[-]$
Q	Débit volume	$[m^3/s]$
R_L	Perte d'énergie relative	$[m]$
s	Hauteur du seuil	$[m]$
S	Hauteur relative du seuil	$[-]$
V_1	Vitesse moyenne dans la section mouillée initiale	$[m/s]$
V_2	Vitesse moyenne dans la section mouillée finale	$[m/s]$
x	Position du seuil	$[m]$
X	Position relative du seuil	$[-]$
Y	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut	$[-]$

V_j	Volume du ressaut	$[m^3]$
W	Largeur équivalente du ressaut	$[m]$
γ	Rapport de compacité	$[-]$
η	Rendement du ressaut	$[\%]$
λ_b	Longueur relative du rouleau de fond	$[-]$
λ_u	Longueur relative entre le pied du ressaut et le début du rouleau de fond	$[-]$
λ_j	Longueur relative du ressaut	$[-]$
λ_r	Longueur relative du rouleau	$[-]$
α	Angle d'inclinaison du talus du canal trapézoïdal	$[rd]$

LISTE DES TABLEAUX

PREMIERE PARTIE

Chapitre II

Tableau 2.1 : Conditions expérimentales.....	40
--	----

DEUXIEME PARTIE

Chapitre I

Tableau 1.1 : Valeurs expérimentales exprimant la relation entre Lr^*/h_1 et le nombre de Froude.....	80
Tableau 1.2 : Centres des classes de valeurs du rapport de compacité.....	82
Tableau 1.3 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$	83
Tableau 1.4 : Coefficients des relations expérimentales issues de l'ajustement de la relation liant Y au nombre de Froude Fr_1 pour différents rapport moyens de compacité γ	84
Tableau 1.5 : Erreur relative entre la relation ψ et les valeurs expérimentaux du rapport des hauteurs conjuguées Y.....	86
Tableau 1.6 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $S = f(Fr_1)$	88
Tableau 1.7: Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude Fr_1 pour différents γ de compacité.....	88
Tableau 1.8 : Erreur relative entre la hauteur relative du seuil S et la relation Π	90
Tableau 1.9 : Variation de la position relative du seuil x/h_2 pour chaque intervalle du rapport de compacité γ	91
Tableau 1.10: Valeurs expérimentales de X et de y pour chaque valeurs de compacité γ de ressaut contrôlé.....	94
Tableau 1.11: Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant y au nombre de Froude X pour différents γ de compacité.....	94
Tableau 1.12 : Erreur relative entre les valeurs expérimentales de y est les valeurs de la relation théorique obtenue Ψ	97
<u>Chapitre II</u>	
Tableau 2.1 : Centres des classes de valeurs du rapport de compacité.....	104

Tableau 2.2 : Valeurs expérimentales exprimant la relation entre Lr^*/h_1 et le nombre de Froude.....	105
Tableau 2.3 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$	107
Tableau 2.4 : Coefficients des relations expérimentales issues de l'ajustement de la relation liant Y au nombre de Froude Fr_1 pour différents rapport γ de compacité.....	107
Tableau 2.5 : Erreur relative entre les valeurs expérimentales de Y est les valeurs de la relation théorique obtenue Φ	110
Tableau 2.6 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $S = f(Fr_1)$	112
Tableau 2.7: Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude Fr_1 pour différents γ de compacité.....	112
Tableau 2.8 : Erreur relative entre la hauteur relative du seuil S et la relation ψ	114
Tableau 2.9 : Variation de la position relative du seuil x/h_2 pour chaque intervalle du rapport de compacité γ	115
Tableau 2.10 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$	118
Tableau 2.11 : Valeurs expérimentales de X et de y pour quatre rapports intermédiaires γ de compacité du ressaut contrôlé.....	119
Tableau 2.12 : Erreur relative entre y et la relation théorique obtenue Γ	121
<u>Chapitre III</u>	
Tableau 3.1 : Centres des classes de valeurs du rapport de compacité.....	127
Tableau 3.2 : Valeurs expérimentales exprimant la relation entre Lr^*/h_1 et le nombre de Froude pour $h_0/h_2 \geq 1$	128
Tableau 3.3 : Valeurs expérimentales exprimant la relation entre Lr^*/h_1 et le nombre de Froude pour $h_0/h_2 < 1$	129
Tableau 3.4 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$	131
Tableau 3.5: Coefficients des relations expérimentales issues de l'ajustement de la relation liant Y au nombre de Froude Fr_1 pour différents rapport γ de compacité. Cas où $h_0/h_2 \geq 1$	131
Tableau 3.6 : Coefficients des relations expérimentales issues de l'ajustement de la relation liant Y au nombre de Froude Fr_1 pour différents rapport γ de compacité. Cas où $h_0/h_2 < 1$	132

Tableau 3.7: Erreur relative entre les valeurs expérimentales de Y est les valeurs de la relation théorique obtenue φ pour $h_0/h_2 \geq 1$	135
Tableau 3.8: Erreur relative entre les valeurs expérimentales de Y est les valeurs de la relation théorique obtenue Δ pour $h_0/h_2 < 1$	138
Tableau 3.9: Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$	139
Tableau 3.10: Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $Y = f(Fr_1)$ pour $h_0/h_2 < 1$	139
Tableau 3.11: Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude Fr_1 pour différents γ de compacité et $h_0/h_2 \geq 1$	140
Tableau 3.12: Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant S au nombre de Froude Fr_1 pour différents γ de compacité et $h_0/h_2 < 1$	140
Tableau 3.13: Erreur relative entre les valeurs expérimentales de S est les valeurs de la relation théorique obtenue Θ (cas où $h_0/h_2 \geq 1$).....	143
Tableau 3.14: Erreur relative entre les valeurs expérimentales de S est les valeurs de la relation théorique obtenue Σ (cas où $h_0/h_2 < 1$).....	145
Tableau 3.15 : Variation de la position relative du seuil x/h_2 pour chaque intervalle du rapport de compacité γ pour $h_0/h_2 \geq 1$	146
Tableau 3.16 : Variation de la position relative du seuil x/h_2 pour chaque intervalle du rapport de compacité γ pour $h_0/h_2 \geq 1$	148
Tableau 3.17 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$	151
Tableau 3.18 : Valeurs expérimentales de X et de y pour quatre rapports intermédiaires γ de compacité du ressaut contrôlé pour $h_0/h_2 \geq 1$	151
Tableau 3.19 : Erreur relative entre les valeurs expérimentales de y est les valeurs de la relation théorique obtenue Ω pour $h_0/h_2 \geq 1$	154
Tableau 3.20 : Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes $y = f(X)$ pour $h_0/h_2 < 1$	156
Tableau 3.21: Valeurs expérimentales de X et de y pour quatre rapports intermédiaires γ de compacité du ressaut contrôlé pour $h_0/h_2 < 1$	156
Tableau 3.22: Erreur relative entre les valeurs expérimentales de y est les valeurs de la	

relation théorique obtenue \mathcal{K} pour $h_0/h_2 < 1$ 158

LISTE DES FIGURES

PREMIERE PARTIE

Chapitre I

Figure 1.1 : Ressaut hydraulique.....	5
Figure 1.2 : Ressaut ondulé.....	6
Figure 1.3 : Le pré-ressaut.....	6
Figure 1.4 : Ressaut de transition.....	6
Figure 1.5 : Ressaut stable.....	7
Figure 1.6 : Ressaut clapoteux.....	7
Figure 1.7 : Schéma de définition pour le ressaut hydraulique.....	8
Figure 1.8 : Dissipation de l'énergie relative, $\eta = \Delta H / H_1$ en fonction de Fr_1 et de M pour un canal rectangulaire ($M = 0$) et triangulaire ($1/M = 0$).....	9
Figure 1.9 : Vue schématique des directions principales de l'écoulement pour un ressaut en canal trapézoïdal. (—>) courants de surface, (— —>) courants de fond.....	11
Figure 1.10: Variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ pour différents valeurs de M . (—) Courbe lié à l'équation théorique (4). (...) Courbe pour $M = 0$ (canal rectangulaire), (▼) $M = 0.1$, (■) $M = 0.2$, (▲) $M = 0.3$, (●) $M = 0.4$. (· — ·) Courbe pour $M = \infty$ (canal triangulaire).....	12
Figure 1.11: Caractéristiques principales du rouleau de fond: a) distance d'approche. b) longueur maximale. c) hauteur maximale adimensionnelle h_b/h_2 en fonction de Fr_1 , et de M . Les notations sont celles de la Figure 10. d) croquis de définition.....	13
Figure 1.12 : Longueur relative du ressaut $\lambda_j = L_j/h_2$ en fonction de Fr_1 et M . Les notations sont conformes à la Figure 1.9. (····) Courbe du ressaut hydraulique en canal rectangulaire.....	14
Figure 1.13 : Photographies du canal de mesure.....	15
Figure 1.14 : a) photographie d'une série de convergents. b) mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique. (c) Photographie des séries de marches positive.....	16
Figure 1.15 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude Fr_1 . (o) ressaut contrôlé par seuil mince; (□) ressaut contrôlé par	

<p>marche positive; (Δ) ressaut force de type A par marche positive; (- - -) courbe tracée selon la relation théorique (1).....</p>	18
<p>Figure 1.16 : Variation du rapport S de la marche en fonction du nombre de Froude Fr_1. (\blacktriangle) ressaut contrôlé par marche; (\square) ressaut contrôlé par seuil mince; (\times) ressaut force de type A par marche positive.....</p>	19
<p>Figure 1.17 : Variation de la position de la marche en fonction du nombre de Froude Fr_1. (\blacktriangle) ressaut contrôlé par marche; (\square) ressaut contrôlé par seuil mince; (\times) Ressaut force de type A par marche positive.....</p>	20
<p>Figure 1.18 : Schéma du ressaut hydraulique. a) ressaut contrôlé. b) ressaut force de type A. b, largeur de la base du canal; B, largeur du canal au niveau de la surface libre; h_1, profondeur conjuguée amont; h_2, profondeur conjuguée aval; h_s, profondeur d'eau au droit du seuil; L_r, longueur du rouleau; L_j, longueur du ressaut; Q, débit volume; s, hauteur de la marche; x, position de la marche par rapport au pied du ressaut; α, angle d'inclinaison du talus du canal trapézoïdal.....</p>	20
<p>Figure 1.19 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude Fr_1. (\blacktriangle) ressaut contrôlé par marche; (\square) ressaut contrôlé par seuil mince; (*) ressaut force de type A par marche positive.....</p>	22
<u>Chapitre II</u>	
<p>Figure 2.1 : Ressaut hydraulique dans une transition de canal avec variation linéaire de la largeur et sur fond presque horizontal (a); profil de surface moyen pour canal divergent (b), et canal convergent (c).....</p>	25
<p>Figure 2.2 : Hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude $Fr_1 = Q/(gb_1^2 h_1^3)^{1/2}$ pour des canaux rectangulaires convergents ($\beta < 1$) et divergents ($\beta > 1$); comparaison entre l'équation (2.3) (points ouverts) et des essais de Rubatta (1963), (1964). (\blacksquare) $\zeta = 0,5$; (\bullet) $\zeta = 1,0$; (\blacktriangle) $\zeta = 2,0$; et Khalifa et McCorquodale (1975) pour $1,2 < \beta < 1.85$ (\blacktriangledown).....</p>	27
<p>Figure 2.3 : Perte de charge relative $\Delta H/H_1$ en fonction du nombre de Froude $Fr_1 = Q/(gb_1^2 h_1^3)^{1/2}$ et le rapport des largeurs pour des élargissements graduels ($\beta > 1$), des canaux prismatiques ($\beta = 1$) et des contractions graduées ($\beta < 1$).....</p>	28
<p>Figure 2.4 : Longueur du ressaut L_j/h_2 en canaux divergents ($\beta > 1$, signes pleins), convergents ($\beta < 1$, signes ouverts) et prismatique ($\beta = 1$, Peterka 1983)</p>	

d'après Rubatta 1963, 1964; (●) 2°, (■) 4°, (▲) 8°, (▼) 16°, (♣) 24°.....	29
Figure 2.5 : Vue schématique de l'élargissement brusque des canaux avec b et B comme largeurs de canaux en amont et en aval; ω désigne l'angle d'élargissement moyen de la zone d'écoulement, et L_0 correspond à la longueur de la zone de séparation.....	31
Figure 2.6 : Tangente de l'angle de divergence, $\tan \omega = 2L_0 / [b(\beta - 1)]$ en fonction du nombre de Froude amont Fr_1 d'après Rajaratnam et al. (1968). (▲) $\beta = 3/2$, (■) $\beta = 2$, (●), $\beta = 3$, (■) $\beta = 6$. (—) courbe d'après la relation (2.10).....	31
Figure 2.7 : Hauteurs conjuguées $Y = h_2 / h_1$ en fonction du nombre de Froude amont $Fr_1 = Q / (gb^2h_1^3)^{1/2}$, et le rapport des largeurs $\beta = B/b$ pour des canaux rectangulaires brusquement élargi: observations de Herbrand (1971) (■) $\beta = 1$; (●) $\beta = 1,4$; (▲) $\beta = 2$; (▲) $\beta = 3,5$; de Rajaratnam et Subramanya (1968) (□) $\beta = 1,2$; (o) $\beta = 1,5$; (▢) $\beta = 2$; (▲) $\beta = 3$. (—) courbes d'après la relation (2.12).....	32
Figure 2.8 : Perte de charge relative $\Delta H / H_1$, dans des dissipateurs horizontaux et rectangulaires avec des élargissements brusque $\beta = B/b$ en fonction de divers nombres de Froude Fr_1	33
Figure 2.9 : Caractéristiques de longueurs des ressauts hydrauliques dans des canaux rectangulaires et horizontaux avec un élargissement brusque; mesures de Rajaratnam et Subramanya (1968) pour : a) longueur relative du rouleau L_r/h_2 , (signes ouverts), et b) longueur relative du ressaut L_j/h_2 , (signes pleins) avec (▲) $\beta = 1,2$; (▲) $\beta = 1,5$; (■) $\beta = 2$; (●) $\beta = 3$; (▲) $\beta = 6$	34
Figure 2.10 : Esquisse de définition du ressaut hydraulique dans le canal en expansion. (a) Ressaut hydraulique en coupe transversale. (b) forces de pression agissant sur la périphérie du volume de commande.....	36
Figure 2.11 : Esquisse de définition du profil de surface du ressaut.....	37
Figure 2.12 : Appareil expérimental pour le ressaut hydraulique graduellement élargi.....	40
Figure 2.13 : Profils de surface d'eau non dimensionnels supposés et expérimentaux pour différents angles de divergence (θ), pente latérale et nombre de Froude incident.....	42
Figure 2.14 : Rapport des profondeurs conjuguées expérimentale et théorique en Fonction du nombre de Froude incident pour différents angles de divergence (θ) et pentes latérales (m).....	43

Figure 2.15 : Rapport de la perte d'énergie relative expérimentale et théorique en fonction du nombre de Froude pour différents angles de divergence (θ) et la pente latérale (m).....	43
Figure 2.16 : Rapport des profondeurs conjuguées en fonction du nombre de Froude pour un angle de divergence de 5° , où les lignes pleines sont calculées avec équation (2.29).....	44
Figure 2.17: Perte d'énergie relative par rapport au nombre de Froude pour un angle de divergence de 5° , où les lignes pleines sont calculées avec équation (2.32)..	44
Figure 2.18: Longueur non-dimensionnelle du ressaut par rapport au nombre de Froude avec angle de divergence de 5°	45
Figure 2.19: Rapport de profondeur conjuguée en fonction du nombre de Froude pour un canal rectangulaire, où les lignes continues sont calculées avec l'équation (2.29).....	46
Figure 2.20: Perte d'énergie relative en fonction du nombre Froude pour un canal rectangulaire, où les lignes continues sont calculées avec l'équation (2.32).....	46
Figure 2.21: Longueur non dimensionnelle du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour un canal rectangulaire avec différents angles de divergence y compris le ressaut classique.....	47
Figure 2.22: Longueur non dimensionnelle du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour un canal rectangulaire avec différents angles de divergence, y compris le ressaut classique et le guidage du Bureau de Récupération des États-Unis (USBR).....	47
Figure 2.23: Rapport des profondeurs conjuguées en fonction du nombre de Froude dans un canal trapézoïdal graduellement élargi pour $m = 0,5$; où les lignes continues sont calculées avec équation (2.29).....	48
Figure 2.24: Perte d'énergie relative en fonction du nombre de Froude dans un canal trapézoïdal graduellement élargi pour $m = 0,5$; où les lignes continues sont calculées avec équation (2.32).....	48
Figure 2.25 : Longueur non dimensionnelle d'un ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude pour un canal trapézoïdal graduellement élargi avec une pente latérale de $0,5: 1$	49

Chapitre III

Figure 3.1 : Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit.....	52
Figure 3.2 : Variation de Y, calculé par (3.1), en fonction de Fr_1 . (- - -) : $\beta = 1$	54
Figure 3.3 : Variation de Y en fonction de Fr_1 . (o) : équation (3.2), (+) : équation (3.1)...	55
Figure 3.4 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (- - -) : $\beta = 1$. Y est calculé par l'équation (3.3).....	56
Figure 3.5 : Variation de η en fonction de Fr_1 . (0) : équation (3.2), (+) : équation (3.1)....	56

Chapitre IV

Figure 4.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par un seuil continu à paroi mince..	58
Figure 4.2 : Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction du nombre de Froude Fr_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (\square) 1, (\diamond) 1,15 ; (Δ) 1,3 ; (\circ) 1,45 ; (\blacktriangle) 1,6 ; (\bullet) 1,93. (- - -) Courbe théorique du ressaut classique selon Bélanger ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbe d'ajustements.....	60
Figure 4.3 : Variation du rapport Y de hauteurs conjuguées en fonction de ($Y = 1,386Fr_1 - \sqrt{2}Ln(\gamma) - 0,617$). (\circ) points expérimentaux. (—) droite d'équation : $h_2/h_1 = 1,386Fr_1 - \sqrt{2}Ln(\gamma) - 0,617$	60
Figure 4.4 : Variation de s/h_1 en fonction du nombre de Froude Fr_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (\blacksquare) 0,9 ; (\diamond) 1,15 ; (\circ) 1,45 ; (\bullet) 1,93. (—) Courbes d'ajustements.....	61
Figure 4.5 : Variation de ζ (S, γ) en fonction de Fr_1-1 . (\circ) points expérimentaux. (—) Droite d'équation : $(S + 0,48)/(1,07 - 0,29\gamma) = Fr_1-1$	62
Figure 4.6 : Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . (—) Courbe d'ajustement.....	62
Figure 4.7 : Variations expérimentales du profil de surface ($y=f(X)$) du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite rectangulaire, pour trois rapports intermédiaires de compacité. (—) courbes d'ajustements. (---) courbe selon l'équation $y = \tanh(1,5X)$	63
Figure 4.8 : Variation expérimentale de Π en fonction de y , pour différentes configurations de ressaut contrôlé dans un canal rectangulaire. (—) première bissectrice. (\circ) point expérimentaux. $\Pi = \tanh[(2\gamma - 0,3)X]$..	64

DEUXIEME PARTIE

Chapitre I

Figure 1.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section droite trapézoïdal, ayant servi à l'expérimentation.....	72
Figure 1.2 : Photographie du model expérimentale du canal.....	72
Figure 1.3 : Photographie montre le raccordement des pompes.....	73
Figure 1.4 : Photographie d'une boîte en charge.....	73
Figure 1.5 : Photographie du déversoir rectangulaire.....	74
Figure 1.6 : Photographie d'une série de convergent.....	74
Figure 1.7: Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....	75
Figure 1.8 : Photographie des seuils minces testés.....	76
Figure 1.9 : Photographie de support du seuil.....	76
Figure 1.10 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince....	77
Figure 1.11 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince....	77
Figure 1.12 : Photographies du ressaut hydraulique a) avec $Fr_1 = 6,70$. b) avec $Fr_1 = 11,02$	78
Figure 1.13 : Variation expérimentale de $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$. (-) Courbe d'ajustement.....	80
Figure 1.14: Différent configurations du ressaut contrôlé par seuil.....	81
Figure 1.15: Photos (a, b, et c) pour différent configurations du ressaut contrôlé par seuil mince pour: $x = 120$ cm, $h_1 = 2$ cm and $\Delta x \approx 5$ cm.....	81
Figure 1.16 : Variation du rapport des profondeurs conjuguées Y en fonction du nombre de Froude Fr_1 et de cinq valeurs du rapport moyen de compacité: $\gamma = 0,96$ (\square); $1,07$ (Δ); $1,18$ (\times); $1,29$ (*); $1,40$ (o). (----) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbe d'ajustement.....	83
Figure 1.17 : Variation du coefficient a en fonction du rapport γ de compacité. (—) courbe d'ajustement.....	84
Figure 1.18: Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction de $\psi = (1,10\gamma^{0,16})Fr_1$. (o) points expérimentaux. (—) Première bissectrice.....	85
Figure 1.19 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ :(\square) $0,96$; (Δ) $1,07$; (\times) $1,18$; (*) $1,29$; (o) $1,40$. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbes d'ajustement.....	87
Figure 1.20 : Variation du coefficient « a » en fonction de rapport de compacité γ	89

Figure 1.21 : Variation du coefficient « a » en fonction de rapport de compacité γ	89
Figure 1.22: Variation des hauteurs relatives $S=s/h_1$ du seuil en fonction de la relation $\Pi = (1,04 - 0,26.\gamma).Fr_1 - (1,63.\gamma - 0,52)$. (o) points expérimentaux. (—) Première bissectrice.....	90
Figure 1.23: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ pour le ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$). (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.....	91
Figure 1.24: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.....	92
Figure 1.25 : Variation expérimentales du profil de surface [$y = f(X)$] du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section droite trapézoïdal, pour Cinq rapports de compacité. (—) courbes d'ajustements.....	93
Figure 1.26 : Variation du coefficient « a » en fonction du rapport γ de compacité. (—) courbe d'ajustement.....	95
Figure 1.27 : Variation du coefficient « b » en fonction du rapport γ de compacité. (—) courbe d'ajustement.....	95
Figure 1.28: Variation expérimentale de y en fonction de Ψ , pour différent configuration de ressaut contrôlé dans un canal trapézoïdal. (—) première bissectrice. (o) points expérimentaux. $\Psi = (1,05\gamma + 0,14) \tanh [(0,43\gamma + 1,53) X]$	96

Chapitre II

Figure 2.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section trapézoïdal brusquement élargie à un canal rectangulaire, ayant servi à l'expérimentation.....	100
Figure 2.2 : Photographie du canal de mesure de section trapézoïdal brusquement élargie à un canal rectangulaire.....	101
Figure 2.3 : Photographie des seuils minces testés.....	102
Figure 2.4 : Photographie de support du seuil.....	102
Figure 2.5 : Photographies du canal trapézoïdal brusquement élargi. (a) Élargissement brusque trapèze-rectangle. (b) Déversoir rectangulaire pour le mesure du débit.....	103
Figure 2.6: Trois configurations différentes du ressaut contrôlé par seuil mince dans un Canal de section droite trapézoïdale brusquement élargi, obtenues à débit Croissant pour une position x de seuil et une hauteur initiale h_1 fixées.....	104
Figure 2.7 : Variation expérimental de $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$. (—) Courbe d'ajustement.....	105

Figure 2.8 : (—) Variation de Y en fonction Fr_1 pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité : γ : (□) 0,96 ; (Δ) 1,07 ; (×) 1,18 ; (*) 1,29 ; (o) 1,40. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$).....	106
Figure 2.9 : (—) Variation du coefficient « a » en fonction de γ	108
Figure 2.10 : (—) Variation du coefficient « b » en fonction de γ	108
Figure 2.11 : Variation de Y en fonction de $\phi = (0,84 - 0,09\gamma)Fr_1 + (0,76 - 0,26\gamma)$. (o) points expérimentaux. (—) Première bissectrice.....	109
Figure 2.12 : Variation de la hauteur relative du seuil $S=s/h_1$ en fonction du nombre de Froude Fr_1 et pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité γ : (□) 0,96 ; (Δ) 1,07 ; (×) 1,18 ; (*) 1,29 ; (o) 1,40. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbes d'ajustement.....	111
Figure 2.13 : (—) Variation de coefficient « a » en fonction de γ	113
Figure 2.14 : (—) Variation de coefficient « b » en fonction de γ	113
Figure 2.15 : Variation S en fonction de $\psi = (0,73 - 0,12\gamma)Fr_1 + (0,55 - 0,12\gamma)$. (—) Première bissectrice. (o) Points expérimentaux.....	114
Figure 2.16: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ pour le ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$). (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.....	115
Figure 2.17: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ . (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.....	116
Figure 2.18: Variation expérimentales du profil de surface [$y = f(X)$] du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section trapézoïdal brusquement élargi, pour quatre rapports intermédiaires de compacité. (...) Courbe correspond au ressaut classique selon l'équation $y = 0,87 \tanh [5,77X]$ ($\gamma \leq 0,9$). (—) Courbes d'ajustements pour : (▲) $\gamma=1,01$; (◆) $\gamma=1,22$; (×) $\gamma=1,43$ et (●) $\gamma=1,64$	117
Figure 2.19 : (—) Variation de coefficient « a » en fonction de γ	119
Figure 2.20 : (—) Variation de coefficient « b » en fonction de γ	119
Figure 2.21: Variation expérimentale du profil de surface du ressaut y en fonction de $\Gamma = (0,09\gamma + 0,79) \tanh [(1,93\gamma + 4,08)X]$. (o) points expérimentaux. (—) première bissectrice.....	120

Chapitre III

Figure 3.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé,

ayant servi à l'expérimentation.....	124
Figure 3.2 : Photographie du canal de mesure de section rectangulaire composé.....	124
Figure 3.3 : Photographie des seuils minces testés.....	125
Figure 3.4 : Photographie de support du seuil.....	125
Figure 3.5 : Forme du canal rectangulaire composé.....	126
Figure 3.6 : Différentes configurations du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince, obtenues à débit croissant pour une position de seuil $x = 72$ cm, une hauteur initiale $h_1 = 2$ cm et $\Delta x \approx 5$ cm. a : $IFr_1 = 5,00$ $s = 6$ cm, $h_2 = 13$ cm, $\gamma = 0,81$. b : $IFr_1 = 8,95$ $s = 8$ cm, $h_2 = 18$ cm, $\gamma = 1,09$. c : $IFr_1 = 10,55$ $s = 10$ cm, $h_2 = 20,5$ cm, $\gamma = 1,42$	127
Figure 3.7 : Variation expérimentale de $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$. (-) Courbe d'ajustement.....	128
Figure 3.8: Variation expérimentale de $Lr^*/h_1 = f(Fr_1)$ pour $h_0/h_2 < 1$. (-) Courbe d'ajustement.....	129
Figure 3.9: (—) Variation de Y en fonction Fr_1 pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité : γ :(\square) 1,01 ; (Δ) 1,22 ; (\circ) 1,43; (*) 1,64. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$).....	130
Figure 3.10 : (—) Variation du coefficient « a » en fonction de γ	132
Figure 3.11 : (—) Variation du coefficient « b » en fonction de γ	133
Figure 3.12: Variation expérimentale du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de $\varphi = (1,40 - 0,17\gamma) Fr_1 + (0,31 + 0,40\gamma)$ pour ($h_0/h_2 \geq 1$). (\circ) points expérimentaux. (—) première bissectrice.....	134
Figure 3.13 : (—) Variation du coefficient « a » en fonction de γ	136
Figure 3.14 : (—) Variation du coefficient « b » en fonction de γ	136
Figure 3.15 : Variation expérimentale du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction de $\mathcal{D} = (1,18 - 0,29\gamma) Fr_1 + (0,99 + 1,49\gamma)$ pour ($h_0/h_2 < 1$). (\circ) points expérimentaux. (—) première bissectrice.....	137
Figure 3.16 : (—) Variation de S en fonction Fr_1 pour différentes valeurs du rapport moyen de compacité pour ($h_0/h_2 \geq 1$) et ($h_0/h_2 < 1$): γ :(\square) 1,01 ; (Δ) 1,22 ; (\times) 1,43; (*) 1,64. (---) Courbe du ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$).....	138
Figure 3.17 : (—) Variation du coefficient « a » en fonction de γ	141
Figure 3.18 : (—) Variation du coefficient « b » en fonction de γ	141
Figure 3.19 : Variation expérimentale de la hauteur relative du seuil S en fonction de	

$\Theta = (1 - 0,31\gamma).Fr_1 + (0,43\gamma - 2,06)$ pour $(h_0/h_2 \geq 1)$. (o) points Expérimentaux. (—) première bissectrice.....	142
Figure 3.20 : (—) Variation du coefficient « a » en fonction de γ	144
Figure 3.21: (—) Variation du coefficient « b » en fonction de γ	144
Figure 3.22 : Variation expérimentale de la hauteur relative du seuil S en fonction de $\Sigma = (2,27 - 1,01\gamma).Fr_1 + (7,30\gamma - 13,78)$. (o) points expérimentaux. (—) première bissectrice.....	145
Figure 3.23: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ pour le ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$) et $(h_0/h_2 \geq 1)$. (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.....	146
Figure 3.24: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction des rapports moyens de compacité γ pour $(h_0/h_2 \geq 1)$. (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.....	147
Figure 3.25: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction du rapport de compacité γ pour le ressaut classique ($\gamma \leq 0,9$) et $(h_0/h_2 < 1)$. (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.....	148
Figure 3.26: Variation de la position relative x/h_2 du seuil en fonction des rapports moyens de compacité γ pour $(h_0/h_2 < 1)$. (o) points expérimentaux. (—) Courbe d'ajustement.....	149
Figure 3.27: Variations expérimentales du profil de surface $[y = f(X)]$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section rectangulaire composé, pour quatre rapports intermédiaires de compacité pour $(h_0/h_2 \geq 1)$. (...) Courbe correspond au ressaut classique selon l'équation $y = 1,23 \tanh [1,14X]$ ($\gamma \leq 0,90$). (—) Courbes d'ajustements pour : (\square) $\gamma=1,01$; (Δ) $\gamma=1,22$; (\diamond) $\gamma=1,43$ et (\times) $\gamma=1,64$	150
Figure 3.28 : (—) Variation de coefficient « a » en fonction de γ	152
Figure 3.29: (—) Variation de coefficient « b » en fonction de γ	152
Figure 3.30: Variation expérimentale du profil de surface du ressaut y en fonction de $\Omega = (0,31\gamma + 0,97) \tanh [(0,35\gamma + 0,84)X]$ pour $(h_0/h_2 \geq 1)$. (o) points expérimentaux. (—) première bissectrice.....	153
Figure 3.31: Variations expérimentales du profil de surface $[y = f(X)]$ du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal de section rectangulaire composé, pour quatre rapports intermédiaires de compacité pour $(h_0/h_2 < 1)$.	

(....) Courbe correspond au ressaut classique selon l'équation $y = 1,19 \tanh [1,40X] (\gamma \leq 0,90)$. (—) Courbes d'ajustements pour :	
(□) $\gamma=1,01$; (Δ) $\gamma=1,22$; (\diamond) $\gamma=1,43$ et (\times) $\gamma=1,64$	155
Figure 3.32: (—) Variation de coefficient « a » en fonction de γ	157
Figure 3.33 : (—) Variation de coefficient « b » en fonction de γ	157
Figure 3.34 : Variation expérimentale du profil de surface du ressaut y en fonction de $\mathcal{X} = (0,18\gamma + 1,03) \tanh [(0,35\gamma + 1,15)X]$ pour $(h_0/h_2 < 1)$. (o) points expérimentaux. (—) première bissectrice.....	159

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arabhabhirama, A. and Abella, A.* (1971). "Hydraulic Jump within Gradually Expanding Channel". Journal of the Hydraulics Division, ASCE 97(HY1), 31–34.
- Achour, B.*, (1989). Jump flowmeter in a channel of triangular cross-section without weir, Journal of Hydraulic Research 27(2), 205-214.
- Achour, B.*, (1997) Dissipation d'énergie par ressaut, thèse d'état, Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil.
- Achour, B., Debabeche, M.*, (2003). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. Journal of Hydraulic Research 41(3), 319-325.
- Achour, B.*, (2000). Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. JHR 2000; 38(4): 307-311.
- Ackers P.*, (1991). Hydraulic design of straight compound channels. SR281, HR Wallingford, Wallingford, U K, 1991.
- Andersen, J. V. M.*, (1978). Undular hydraulic jump, Proc, ASCE, Journal of the Hydraulics Division, Vol. 104, pp. 1185-1188.
- Bousmar, D., Rivière, N., Proust, S., Paquier, A., Morel, R., Zech, Y.*, (2005). Upstream discharge distribution in compound-channel flumes. J H Eng 2005, ASCE; 131(5): 408-412.
- Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, J. H., Zech, Y.*, (2004). Overbank flow in symmetrically narrowing flood plains. J H Eng 2004; 130(4): 305-312.
- Bakhmeteff, B. A., Matzke, A. E.*, (1936). The Hydraulic Jump terms of dynamic similarity, Transactions, American society of civil engineers, Vol.101, pp, 630-647.
- Belanger, J.B.*, (1828). Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes, Carilian-Goeury, Paris.
- Bradley, J. N., Peterka, A. J.*, (1957). The hydraulic design of stilling basins, Hydraulic jumps on a horizontal apron (Basin I), paper 1401; High dams, earth dams, and large canal structures (Basins II), paper 1402; short stilling basins for canal structures, small outlet works, and small spillways (Basin III), paper 1403; stilling basin and wave suppressors for canal structures, outlet works and diversion dams (Basin IV), paper 1404; stilling basin with sloping apron (Basin V), paper 1405; small basins for pipe or open channel outlets no tailwater required (Basin VI), paper 1406, Proceedings, American Society of Civil Engineers, J. hydraulics division, vol. 83, No.HY5.

- Bidone, G.*, (1819). Observations on the Height of the Hydraulic Jump, a Report Presented in Meeting of Royal Academy of Science of Turin, pp. 21-80, 1819.
- Bretz, N., V.*, (1988). Ressaut Hydraulique Forcé par seuil, Laboratoire de constructions Hydrauliques, École Polytechnique fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No. 2.
- Benmalek A.*, (2012). Étude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé par marche positive évoluant dans un canal trapézoïdal, Mémoire de magister en hydraulique, Département d'hydraulique, Université de Biskra.
- Chow, V. T.*, Open Channel Hydraulics. McGraw-Hill, New York, 1959.
- Debabeche, M., Achour, B.*, (1996). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire, 1^{er} 165 Séminaire Maghrébin sur l'eau, Université de Tizi-Ouzou.
- Debabeche, M.*, (2003). Ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Thèse de doctorat d'état, département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Debabeche, M., Achour, B.*, (2006). Effet du seuil sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Journal of Hydraulic Research (article accepter pour publication en 2007).
- Debabeche, M., Achour, B.*, (2007). Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. Journal of Hydraulic Research, Vol. 45(1), pp. 135-139.
- Debabeche, M., Lakehal, M., Mansri, N. and Achour B.*, (2008). Theoretical study of the forced hydraulic jump by positive step in a triangular channel. Journal of fluid mechanics research, Vol. 35(4), pp. 318-326.
- Debabeche, M., Lakehal, M., Mansri, N. and Achour B.*, (2006). Ressaut hydraulique force par marche positive. The third international conference on the 'Water Resources in the Mediterranean Basin', watmed 3 – Tripoli – Lebanon.
- Debabeche, M., Cherhabil, S., Hafnaoui, A. et Achour, B.* (2009), Hydraulic jump in a sloped triangular channel, Can. J. Civ; Eng. 36: 655-658 (2009).
- Diskin, M.H.* (1961). "Hydraulic Jump in Trapezoidal Channel". Water Power 13, 12–17.
- Elevatorski, E. A.*, (1959). Hydraulic energy dissipators. McGraw-Hill, New York, 1959.
- France, P. W.*, (1981). Analysis of the hydraulic jump within a diverging rectangular channel. Proc. Inst. Civil Engrs., Vol. 71, 1981, Part II, pp. 369-378.
- Hager, W. H.*, (1985). Hydraulic jump in non-prismatic rectangular channels, Journal of Hydraulic Research, 23:1, 1985, 21-35.
- Hager, W. H., Wanoschek, R.*, (1987). Hydraulic jump in triangular channel, J. of Hydraulic Research, Vol. 25, 1987, 5, pp. 549-564.

- Hager, W. H.*, (1989). Hydraulic jump in U-shaped channel, Proc.ASCE, J. Hydraulic Engineering, 115, 667-675.
- Hager, W.H., Wanoschek, R.*, (1989), Hydraulic jump in trapezoidal channel, J. hydraulic research, Vol. 27, 1989, N.3.
- Hager, W. H.*, B-jumps at abrupt channel drops. To be published in Proc. ASCE, J. Hydraulic Engineering. 1985.111:861-866.
- Hager, W. H., Sinniger, R.*, (1985). Flow characteristics of the Hydraulic jump in Stilling Channel with an abrupt bottom rise, J. Hydraulic Research Vol. 23, 1985, No. 2 pp. 101-113; Vol. 24(3), pp. 207- 215.
- Hachemi Rachedi, L.*, (2006). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, mémoire de magistère en science hydrauliques, Département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Hager, W. H.*, (1987). Der Ablufss im U-Profil. Korrespondenz Abwasser 34(5): 468-482.
- Hager, W. H., Bretz, N. V.*, (1986). Hydraulic Jump at positive and negative step; J. hydraulic research 24(4), 237-253.
- Hager, W., Bremen, R. H., et Kawogoshi, N.*, (1990). Classical hydraulic jump; length of roller, J. Hydraulic research 28(5), 591-608.
- Hager, W. H., Damei, Li.*, (1992). Sill-controlled energy dissipator, Journal of Hydraulic Research, 30:2, 165-181.
- Khalifa, A. M., McCorquodale, A. M.*, (1979). "Radial Hydraulic Jump". J. Hydraul. Division, ASCE 105(HY9), 1065–1078.
- Koloseus, H. J., Ahmad, D.*, (1969). Circular hydraulic jump. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division, Vol. 95,1969, HY1, pp. 409-422.
- Kateb, S., Debabeche, M., Benmalek, A.*, (2013). Étude expérimentale de l'effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal. Canadian Journal of Civil Engineering, 2013, 40(10): 1014-1018, 10.1139/cjce-2013-0359.
- Lawson, J. D., Phillips, B. C.*, (1983). Circular hydraulic jump. Proc. ASCE, J. Hydraulic Engineering, Vol. 109, 1983, Nr. 4, pp. 505-518.
- Lakehal, M., Debabeche, M., Mansri, N.*, (2008). Effet de la marche positive sur le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire. Larhyss journal (Article accepté pour publication).
- Mohed, M. B., Sharp, J. J.*,(1971). The hydraulic jump in trapezoidal channels. Water and Water Engineering, Jan. 1971, pp. 8-11.
- Moore, W. L.*, (1943). Energy loss at the base of a free overfall. Trans. ASCE 108, 1343-

1392.

Mansri, N., (2006). Ressaut Hydraulique Contrôlé par Marche Positive Dans un Canal Triangulaire,

Morvan, H., Pender, G., Wright, N. G., Ervine, D. A., (2002). Three-Dimensional hydrodynamics of meandering compound channels. JHE 2002; 128(7): 674-682.

Omid, M. H., Esmaeeli, V. M., Narayanan, R., (2007). Gradually expanding hydraulic jump in a trapezoidal channel, Journal of Hydraulic Research, 45:4, 512-518.

Omid, M. H., (1996). "Hydraulic Jump in a Trapezoidal Channel". Iranian Journal of Agricultural Science 28(3), 113–121.

Ohashi et al. (1973). Design of Combined Hydraulic Jump and Ski-Jump Energy Dissipator of Flood Spillway. XIII ICOLD Congress Madrid Q.41, R.19: 311-333.

Okada, A., Aki, S., (1955). Experimental study of hydraulic jump on reversed slope apron. J. Tech. Lab., 5(6), Tokyo (in Japanese).

Ohtsu, I., (1976). Free hydraulic jump and submerged hydraulic jump in trapezoidal and rectangular channels. Trans. JSCE 8, 122-125.

Posey, C.J., Hsing, P.S., (1938). "Hydraulic Jump in Trapezoidal Channel". Engineering News-Record, 121(25), 797–798.

Peterka, A. J., (1983). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators. Water Resources Technical Publications, Engineering Monograph Nr. 25, USBR, Bureau of Reclamation, Denver, Col., 1983.

Pagliara, S., Peruginelli, A., (2000). Journal of Hydraulic Engineering/ November 2000/ 847-850.

Rajaratnam, N., (1964). Discussion to Silvester (1964) Journal of Hydraulic Division, ASCE 90(HY4), 341-350.

Rajaratnam, N., Subramanya, K., (1968). Hydraulic jumps below abrupt symmetrical expansions. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division, Vol. 94, 1968, HY3, pp. 481-503.

Rubatta, A., (1963). II risalto idraulico in canale divergente. L'Energia Elettrica, Vol. 40, 1963, Nr. 10, pp. 783-790.

Rubatta, A., (1963). II risalto idraulico in canale convergente. L'Energia Elettrica, Vol. 41, 1964, Nr. 5, pp. 329-334.

Rajaratnam, N., (1963). Discussion to "General Solution of the Hydraulic Jump in sloping Channels" by P.A. Argyropoulos. Proc. ASCE, J. Hydraulics Division 89(HY1) : 258-261.

Rajaratnam, N., (1965). Hydraulic Jump in horizontal conduit, Water Power, 17, pp. 80-83.

Rajaratnam, N., (1966). Hydraulic jump in sloping channel, *J. irrigation and Power (India)*, 23(Apr): pp.137-149, Discussion, 1967, 24(Jump): pp.285-293.

Rajaratnam, N., Murahari, V., (1971). A contribution to forced hydraulic jumps, *J. Hydraulic Research*, vol. 9, 217-239.

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1967). Flow equation for the sluice gate, *Proc. ASCE, J. Irrigation and Drainage Division*, Vol. 93, IR3, 167-186.167.

Rajaratnam, N., Subramania, K., (1968, 1969, 1970). Profil of the hydraulic jump, *Proc. ASCE, J. Hydraulic Division*, vol. 94, 1968, HY3 663-673; vol. 95, 1969, HY1 546-557, HY2 725-727; vol. 96, 1970, HY2 579-581.

Rajaratnam, N., (2002). Hydraulic jump on corrugated beds, *J. Hydraulic Engrg.*, Volume 128, Issue 7,656-663.

Rand, W., (1957). An approach to generalised design of stilling basin, *Trans. New-York, Academy of Sciences*, Vol. 20(2), 173-191.

Rand, W., (1965). Flow over a vertical sill in an open channel, *Proc. ASCE, J. Hydraulic Division*, vol. 91, HY4 97-122.

Rajaratnam, N., (1964). The Forced Hydraulic Jump. *Water Power*, January, 14-19, February, 6165.

Rajaratnam, N., (1967). Hydraulic jumps, *Advances in hydro science*, 4: 197-280, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York, N.Y.

Rand W., (1957). An approach to generalized design of stilling basin. *Trans. New York academy of Sciences*. 1957. 20(2), 173-191.

Rao N.S.G., Muralidhar D., (1963). Discharge characteristics of weirs of limit crest width, *La houille Blanche*, Vol. 18,537-545.

Sandover, J. A., Holmes, P., (1962). The hydraulic jump in trapezoidal channels, *Water Power*, Nov. 1962, pp. 445-449.

Silvester, R., (1964). Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels, *Proc. ASCE, J. Hydraulics Division*, Vol. 90, HY1, January 1964, pp. 23-55.

Sharma, H. R., (1965). Der geknickte Wechselsprung. *Wissenschaftl. Zeitschrift TU Dresden*, Vol. 14, 1965, Heft 1, pp. 73-79.

Unny, T. E., (1960). Der raumliche Wechselsprung. Thesis presented at the University of Dresden, 1960.

Sellin R. H. J., (1964). A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood plain. *La Houille Blanche* 2002; 7: 793-802.

Wanoschek, R., Hager, W.H., (1989). "Hydraulic Jump in Trapezoidal Channel". Journal of Hydraulic Research, 27 :3, 429–446.