

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  
Ref :.....



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

Thèse présentée en vue de l'obtention  
du Diplôme de

## Doctorat en sciences

Spécialité : **Hydraulique**

Option : **Sciences Hydrauliques**

THÈME

### Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée

Présentée par :

**RIGUET FERHAT**

Soutenue le : 09 /12 / 2021

Devant le jury composé de :

Président :	OUAMANE Ahmed	Professeur	Université de Biskra
Rapporteur :	DEBABECHE Mahmoud	Professeur	Université de Biskra
Examineur :	HOUICHI Larbi	Professeur	Université de Batna
Examineur :	KATEB Samir	Professeur	Université d'Ouargla

## Résumé

Cette présente thèse a pour but d'analyser expérimentalement le ressaut hydraulique contrôlé et le ressaut de type A forcé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive évoluant dans un canal rectangulaire de section composée. L'objectif principal de cette étude est d'examiner expérimentalement l'effet de la section composée ainsi que l'influence du seuil et de la marche positive sur les caractéristiques du ressaut. En outre, plusieurs relations empiriques ont été obtenues, permettant le dimensionnement du bassin de dissipation pour les deux configurations du ressaut.

**Mots clés:** Ressaut hydraulique, canal rectangulaire composé, bassin de dissipation, nombre de Froude, Ressaut forcé, marche positive, Canal a ciel ouvert.

## Abstract

The purpose of this thesis is to experimentally analyze the controlled hydraulic jump and the type A jump forced by a thin sill, by thick sill and by positive step evolving in a rectangular channel of compound section. The main objective of this study is to experimentally examine the effect of the compound section as well as the influence of the sill and the positive step on the characteristics of the jump. In addition, several empirical relationships have been obtained, allowing the dimensioning of the stilling basin for the two projection configurations of jump.

**Keywords:** hydraulic jump, rectangular channel of compound section, stilling basin, Froude number, Forced jump, positive step, Open-air canal.

## ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو التحليل التجريبي للقفزة الهيدروليكية المراقبة والقفزة الهيدروليكية المجرية من النوع - أ. بعتبة رفيعة ، بعتبة سميكة وبعتبة إيجابية في قناة مستطيلة ذات مقطع مركب. الهدف الرئيسي من هذه الدراسة هو البحث عن مدى تأثير المقطع المركب للقناة وكذلك تأثير نوع العتبة على خصائص القفزة المائية. وقد تم الحصول على العديد من العلاقات التجريبية التي تسمح بتحديد أبعاد حوض التهدئة لنموذجي القفزة المائية.

**الكلمات المفتاحية :** قفزة هيدروليكية ، قناة مستطيلة مركبة ، حوض التهدئة ، عدد فرود ، قفزة مجرية ، عتبة إيجابية ، قناة مفتوحة.

## REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier DIEU de m'avoir donné la force, la patience, la volonté et le courage de mener à bon terme ce modeste travail.

Je tiens à remercier vivement mon encadreur, monsieur Debabeche Mahmoud, professeur à l'université de Biskra, qui n'a, à aucun instant, cessé de prodiguer ses judicieux conseils ses aides et assistance scientifique et morale, afin de rendre plus facile mon travail pour l'achèvement de ma thèse.

Je remercie très chaleureusement monsieur Ouamane Ahmed, professeur à l'université de Biskra, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury de soutenance.

J'exprime mes plus sincères remerciements à monsieur Houichi Larbi, professeur à l'université de Batna, qui m'a fait l'honneur d'accepter de juger cette thèse.

Je tiens encore à exprimer mes profondes gratitude et mes vives reconnaissances à monsieur Kateb Samir, professeur à l'université d'Ouargla, d'avoir accepté de participer au jury de soutenance.

Je remercie profondément monsieur Ghomri Ali, professeur à l'université d'El Oued, pour son aide permanente.

Mes plus vifs remerciements vont également à tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

# إهداء

أهدي هذا العمل المتواضع إلى روح والدي الكريم رحمه

الله واسكنه فسيح جنانه حبا له وتقديرا لفضله

إلى أمي برا وحنانا أطال الله في عمرها

إلى رفيقة دربي وشريكتي في الحياة زوجتي على صبرها الجميل

و مسانبتها التي لا تقدر بثمن

إلى أولادي قصي، منار، رزان و معاذ راجيا من الله تعالى أن

يحفظهم و يوفقهم في دراستهم و في حياتهم

كما اهدي هذا العمل إلى كل من يفرح لفرحي و يحزن لحزني.

# *Sommaire*

## SOMMAIRE

Sommaire.....	i
Liste des photos et figures.....	viii
Liste des tableaux.....	xxiv
Principales notations.....	xxix
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE.....</b>	<b>01</b>
<b><u>Première partie</u></b>	
<b>SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE</b>	
<b>INTRODUCTION À LA PREMIÈRE PARTIE.....</b>	<b>04</b>
<b>Chapitre. I</b>	
<b>RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE DANS UN CANAL</b>	
<b>RECTANGULAIRE</b>	
I.1. Introduction.....	05
I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE .....	05
I.2.1. Forme du ressaut classique.....	06
I.2.2. ÉTUDE DE HAGER ET AL (1990).....	07
I.2.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut.....	08
I.2.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut .....	09
I.2.2.2.1. Longueur du rouleau.....	09
I.2.2.2.2. Longueur du ressaut.....	11
I.2.2.3. Rendement du ressaut.....	12
I.2.3. ETUDE DE HAGER (1992).....	14
I.2.3.1. Procédure expérimentale.....	14
I.2.3.2. Analyse des données.....	15
I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL MINCE.....	16
I.3.1. APPROCHE DE FORSTER ET SKRINDE (1950).....	16
I.3.2. ETUDE DE ACHOUR ET AL (2002).....	17
I.3.2.1. Essais pour $X \approx Lr$ .....	17
I.3.2.2. Essais pour $X \approx Lj$ .....	19
I.4. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL EPAIS.....	21
I.4.1. APPROCHE DE FORSTER ET SKRINDE (1950).....	21
I.4.2. APPROCHE DE ACHOUR ET AL (2002).....	23

I.4.2.1. Configuration avec vanne de fond .....	23
I.4.2.2. Configuration avec déversoir standard .....	25
I.5. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR MARCHE POSITIVE .....	27
I.5.1. APPROCHE DE FORSTER ET SKRINDE (1950).....	27
I.6. Conclusion .....	28

## **Chapitre .II**

### **RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE**

II.1. Introduction .....	30
II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE PAR SEUIL MINCE.....	30
II.2.1. APPROCHE DE RAND (1957) .....	30
II.2.2. APPROCHE DE RAJARATNAM (1964) .....	32
II.2.3. APPROCHE DE RAJARATNAM ET MURAHARI (1971).....	33
II.2.4. APPROCHE DE BRETZ (1988).....	33
II.2.4. 1. Généralités .....	33
II.2.4.2. Procédure expérimentale.....	34
II.2.4.3. Hauteurs conjuguées du ressaut .....	35
II.2.4.4. Longueur relative du bassin .....	37
II.2.4.5. Approche de Hager et Li (1992) .....	39
II.2.4.5.1. Rapport des hauteurs conjuguées .....	39
II.2.4.5.2. Longueur du bassin .....	40
II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE PAR MARCHE POSITIVE.....	41
II.3.1. TRAVAUX DE HAGER ET SINNIGER (1986) .....	42
II.3.2. TRAVAUX DE HAGER ET BRETZ (1987) .....	44
II.4. Conclusion .....	46

## **Chapitre III**

### **RESSAUT HYDRAULIQUE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE**

#### **COMPOSE**

III.1. Introduction.....	48
III.2. ETUDE DE KHATTAOUI ET ACHOURE (2012).....	48
III.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées.....	48
III.2.2. Rendement du ressaut.....	51
III.3. ETUDE DE BENABDESSELAM ET AI (2017).....	52
III.3.1. Installation expérimental.....	52

III.3.2. Approche théorique pour les hauteurs conjuguées.....	53
III.4. La perte d'énergie relative.....	54
III.5. Résultats et discussions .....	55
III.5.1. Validation de la relation des hauteurs conjuguées.....	55
III.5.2. Validation de la relation de la perte d'énergie relative.....	57
III.6. Conclusion.....	58

<b>CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE.....</b>	<b>60</b>
--	-----------

## **Deuxième partie**

<b>ETUDE EXPERIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE EVOLUANT DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE SECTION COMPOSÉE</b>	
<b>INTRODUCTION A LA DEXIEME PARTIE.....</b>	<b>63</b>

### **CHAPITRE .IV**

<b>RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE</b>	
I.1. Introduction.....	65
I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ PAR SEUIL MINCE EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE.....	65
I.2.1. Description du modèle .....	65
I.2.1.1. Description du canal .....	65
I.2.1.2. Mesure du débit .....	68
I.2.1.3. Limnimétrie .....	68
I.2.1.4. les Seuils mince.....	70
I.2.2. Résultats expérimentaux .....	70
I.2.2.1. Position du problème.....	70
I.2.2.2. Procédure expérimentale :.....	71
I.2.3. Analyse des résultats expérimentaux .....	73
I.2.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	73
I.2.3.2. Longueurs caractéristiques du ressaut .....	80
I.2.3.2.1. Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	80

I.2.3.2.2. Variation de la longueur relative $L_r/h_1$ du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	82
I.2.3.3. Variation du la hauteur relative $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	83
I.2.3.4. Rendement du ressaut hydraulique.....	89
I.2.3.5. Profil de surface du ressaut .....	92
<b>I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ PAR SEUIL EPAIS EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE.....</b>	<b>94</b>
I.3.1. Description du modèle.....	94
I.3.1.1. Description du canal.....	94
I.3.1.2. Les Seuils épais.....	94
I.3.2. Résultats expérimentaux .....	95
I.3.3. Analyse des résultats expérimentaux .....	96
I.3.3.1.Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	96
I.3.3.2. Longueurs caractéristiques du ressaut .....	103
I.3.3.2.1. Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction $F_1$ .....	103
I.3.3.2.2. Variation de la longueur relative $L_r/h_1$ du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	105
I.3.3.3. Variation du la hauteur relative $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	106
I.3.3.4. Rendement du ressaut hydraulique .....	111
I.3.3.5. Profil de surface du ressaut .....	113
<b>I.4. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ PAR MARCHE POSITIVE EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE.....</b>	<b>115</b>
I.4.1. Description du modèle .....	115
I.4.1.1. Description du canal .....	115
V.4.1.2. Les marches positives.....	115
I.4.2. Résultats expérimentaux .....	116
I.4.3. Analyse des résultats expérimentaux .....	117
I.4.3.1.Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	117
I.4.3.2. Longueurs caractéristiques du ressaut .....	124
I.4.3.2.1. Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	124

I.4.3.2.2. Variation de la longueur relative $L_r/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	126
I.4.3.3. Variation de la hauteur relative $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	127
I.4.3.4. Rendement du ressaut hydraulique .....	132
I.4.3.5. Profil de surface du ressaut .....	134
I.5. ETUDE COMPARATIVE.....	136
I.5.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$	136
I.5.2. hauteur relative du seuil et de la marche positive .....	137
I.5.3. Longueur relative du bassin .....	138
I.5.3. Rendement du ressaut hydraulique.....	138
I.6. Exemple d'application .....	139
I.6.1. Ressaut contrôlé par seuil mince .....	139
I.6.2. Ressaut contrôlé par seuil épais .....	140
I.6.3. Ressaut contrôlé par marche positive .....	140
I.7. Conclusion .....	141

## **CHAPITRE .II**

### **RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE TYPE A DANS UN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSEE**

II.1. Introduction .....	143
II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE PAR SEUIL MIN EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE.....	143
II.2.1 DESCRIPTION DU MODELE .....	143
II.2.1.1. Description du canal .....	143
II.2.1.2. Position du problème .....	144
II.2.2. Résultats expérimentaux .....	145
II.2.2.1. Procédure expérimentale .....	145
II.2.3 Analyse des résultats expérimentaux .....	147
II.2.3.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	147
II.2.3.2. position relative du seuil.....	148
II.2.3.3 Longueur relative $\lambda_B=L_B/h_1$ du bassin.....	150
II.2.3.4 Hauteur relative du seuil.....	151

II.2.3.5 Rendement du ressaut hydraulique .....	160
<b>II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE PAR SEUIL E</b>	
<b>EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE.....</b>	<b>162</b>
II.3.1 DESCRIPTION DU MODELE .....	162
II.3.1.1. Description du canal .....	162
II.3.2. Résultats expérimentaux .....	163
II.3.2.1. Procédure expérimentale .....	163
II.3.3 Analyse des résultats expérimentaux .....	164
II.3.3.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	164
II.3.3.2. position relative du seuil épais.....	165
II.2.2.3 hauteur relatif du seuil.....	167
II.2.3.4 Rendement du ressaut hydraulique .....	174
<b>II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE PAR MARCHE POSITIV</b>	
<b>EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE.....</b>	<b>175</b>
II.3.1 DESCRIPTION DU MODELE .....	175
II.3.1.1. Description du canal.....	175
II.3.2 Résultats expérimentaux .....	177
II.3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ .....	177
II.3.2.2. position relative de la marche positive $\lambda_s = L_s/h_1$ .....	178
II.3.2.3 hauteur relatif de la marche positive.....	180
II.3.2.4. Rendement du ressaut hydraulique.....	187
<b>II.4. INFLUENCE DU SEUIL SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE EN CANALE</b>	
<b>RECTANGULAIRE COMPOSE.....</b>	<b>189</b>
II.4.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut .....	189
II.4.2. position relative du seuil et de la marche positive.....	191
II.4.3. Rendement du ressaut hydraulique.....	192
II.5. Exemple d'application.....	193
II.5. 1. Ressaut forcé par seuil mince .....	194
II.5. 1. Ressaut forcé par seuil épais .....	194
II.5. 1. Ressaut forcé par marche positive .....	195
II.6. Conclusion.....	195

<b>CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE</b> .....	197
<b>CONCLUSION GÉNÉRALE</b> .....	200
Référence bibliographique.....	207

## LISTE DES PHOTOS ET FIGURES

PREMIERE PARTIECHAPITRE I

Figure I.1	Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957). a) Pré-ressaut, b) Ressaut de transition, c) Ressaut stable, d) Ressaut agité .....	07
Figure I.2	Ressaut hydraulique classique.....	08
Figure I.3	Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828).....	09
Figure I.4	Ressaut hydraulique avec: a) rouleau développé. b) rouleau non développé.....	10
Figure I.5	Longueur du ressaut classique $L_j/h_2$ en fonction de $F_1$ (Peterka 1958). Domaines du ressaut: 1 ressaut de transition, 2 ressaut bon, 3 ressaut acceptable, 4 ressaut moins accepté.....	11
Figure I.6	(---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique.....	12
Figure I.7	Rendement $\eta$ du ressaut classique en fonction du nombre de Froude $F_1$ (—) Courbe tracée selon la relation (1.13), (-----) courbe tracée Selon la relation (I.14).....	14
Figure I.8	Données expérimentales de Bakhmeteff et Matzke (1936); $F_1 = 1,99$ ( $\blacktriangle$ ); $2,92$ ( $\blacksquare$ ); $4,10$ ( $\bullet$ ); $5,52$ ( $\blacktriangledown$ ) et $8,64$ ( $\blacklozenge$ ); et pour Schröder (1963), $F_1=3,85$ ( $\triangle$ ); $4,25$ ( $\square$ ); $4,8$ ( $\circ$ ); $5,41$ ( $\nabla$ ) et $6,06$ ( $\diamond$ ); (—) équation (I.16) selon (Hager1992).....	15
Figure I.9	ressaut contrôlé par seuil mince.....	16
Figure I.10	Variation expérimentale du nombre de Froude $F_1$ en fonction de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil a paroi mince pour quelques valeurs de $x/h_2$ , selon Forster et skrinde (1950).....	17
Figure I.11	Variation expérimentale de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil a paroi mince en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de $x/h_2$ .....	18
Figure I.12	Variation expérimentale de $C_o$ en fonction de la position relative $X/h_2$ du seuil à paroi mince.....	18
Figure I.13	Contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour $X \cong L_j$ .....	19
Figure I.14	Variation expérimentale du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil à paroi mince	

	( $X \cong L_j$ ) (---) courbe tracée selon la relation (I.29).....	20
Figure I.15	Variation expérimentale de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude $F_1$ de l'écoulement incident ( $X \cong L_j$ ). (---) courbe tracée selon la relation (I.30).....	20
Figure I.16	Variation expérimentale de la position relative $X/h_2$ du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude incident $F_1$ lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire( $X \cong L_j$ ).....	21
Figure I.17	Variation expérimentale de la position relative $X/h_1$ du seuil à paroi mince en fonction de $(F_1 - 1)$ lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire( $X \cong L_j$ ). (---) courbe tracée selon la relation (I.31).....	21
Figure I.18	Écoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur $s$ et de longueur $L$ .....	22
Figure I.19	Variation expérimentale du nombre de Froude $IF_1$ en fonction de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (I.33).....	23
Figure I.20	Ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse à l'aval d'une vanne de fond, selon Achour (1998).....	23
Figure I.21	Ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse à l'aval d'un déversoir standard. P.d.c : pertes de charge sur le parement aval du déversoir.....	26
Figure I.22	Ressaut forcé par marche positive de hauteur "s", les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.....	27
Figure I.23	Variation du nombre de Froude $F_1$ , en fonction de $h_3/h_1$ et de la hauteur relative $s/h_1$ de la marche positive, selon Forster et Skrinde (1950).....	28

## Chapitre II

Figure II.1	Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes : 0) ressaut classique; 1) classe 1, longueur $L_{S,min}$ ; 2) classe 2, longueur intermédiaire $L_S$ ; 3) classe 3, longueur $L_{S,max}$ , et 4) ressaut classique avec hauteurs conjuguées $h_1$ et $h_2$ . $s$ : hauteur du seuil, $s_c$ : hauteur critique du seuil et $s_{max}$ : hauteur maximale du seuil.....	31
Figure II.2	Hauteurs conjuguées $h_2/h_1 = f(S, K)$ pour $F_1 = 9$ . Valeurs et courbes expérimentales ; (---) limite d'influence de l'aval sur l'amont.....	32

Figure II.3	Variation du coefficient de traîné $C_d$ en fonction de la position relative du seuil $\lambda_s = L_s/L_r$ dans l'écoulement Rajaratnam (1964); points expérimentaux et courbe moyenne.....	33
Figure II.4	Ressaut forcé par seuil à paroi mince. Répartition des vitesses pour $F_1 = 5,6$ et $s = 50$ mm.....	33
Figure II.5	Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour $IF_1=5,23$ et $S=1,42$ . a) ressaut type A; b) ressaut type B; c) ressaut type B minimum; d) ressaut type C et e) onde. (Bretz, 1987).....	34
Figure II.6	Ressaut forcé par seuil : définition des termes. $H_1$ charge amont, $H_2$ charge aval, $\Delta H$ perte de charge. $H_1$ hauteur d'eau amont, $h_2$ hauteur d'eau aval, $s$ hauteur du seuil, $x_0$ position du pied du ressaut, $x_s$ position du seuil, $x_{rf}$ position de la fin du rouleau de fond a l'aval, $L_{rf}$ position de la fin du rouleau de fond a l'aval, $L_R$ longueur du rouleau de surface, $L_{RF}$ longueur du rouleau de fond aval, $L_B$ distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval.....	35
Figure II.7	Ressaut forcé type A. rapport des hauteurs conjuguées $Y_A = f(F_1, S)$ avec $0.5 \leq S \leq 6$ . $S=s/h_1$ . (—) courbe selon l'équation de Bélanger. (---) courbe du ressaut classique selon l'équation (1.48).....	36
Figure II.8	Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_B = f(IF_1, S)$ . Même notation que la figure II.7.....	36
Figure II.9	Ressaut forcé type B-min. Rapport des hauteurs conjuguées $Y_{B-min} = f(IF_1, S)$ . Même notation que la figure II.7.....	37
Figure II.10	longueur relative $\lambda_s = f(F_1)$ pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B-min. (—) courbe selon l'équation : a) (II.6), b) (II.8) et c) (II.10) respectivement. (---) courbe limite.....	38
Figure II.11	longueur relative $\lambda_B = f(F_1)$ pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B-min. (—) courbe selon l'équation : a) (II.7), b) (II.9) et c) (II.11) respectivement. (---) courbe limite.....	38
Figure II.12	Réduction de hauteur aval $\Delta Y_s$ suite à la présence du seuil, fonction de la position relative $(1-\Lambda)^2$ et de la hauteur relative $S$ du seuil. $S = (\nabla) 1$ , (o) 2, ( $\Delta$ ) 3 et ( $\square$ ) 4. (...) équation (II.13). (---) équation (II.14).....	39
Figure II.13	Variation de $\delta$ en fonction de la position relative $(1-\Lambda)$ pour $S = (\nabla) 1$ ,	

	(•) 2, ( $\Delta$ ) 3 et ( $\square$ ) 4.....	40
Figure II.14	I Longueur relative $\Phi$ du bassin en fonction de la position relative du seuil ( $1 - \Delta$ ). $S = (\nabla)$ 1, (o) 2, ( $\Delta$ ) 3 et ( $\square$ ) 4 pour un ressaut du type B. Les signes blancs correspondent aux ressauts des types A et B-minimum. (—) équation (II.16).....	41
Figure II.15	types de ressaut hydraulique évaluant dans un canal doté d'une marche positive. (a) ressaut type A (b) ressaut type B. (c) ressaut type B-min... 42	
Figure II.16	a) zones de séparation d'écoulement pour une marche positive, (+) et (-) indiquent respectivement les suppressions et les dépressions par rapport à la pression hydrostatique. b) répartition de la pression autour du volume de contrôle.....	43
Figure II.17	variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour différentes hauteurs relatives $S$ de marche positive. (-) courbes théorique pour divers $S$ selon Hager et Sinniger (1986); points expérimentaux de Froude et Forster Skrinde (1950) (---) la limite théorique.....	43
Figure II.18	variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de FROUDE $F_1$ pour les marche positive et négative dans un canal rectangulaire prismatique (.....) ressaut type A, (-) ressaut type B et Bmin, (---) la limite inférieure de l'apparition du ressaut sur marche positive.....	44
Figure II.19	efficacité $\eta = \Delta H / H_1$ en fonction de $F_1$ et de $S$ (.....) ressaut type A marche négative, ( $s = 0$ ) ressaut type B sur marche positive (---) ressaut type B-min sur marche négative.....	45
<b><u>CHAPITRE III</u></b>		
Figure III.1	Schéma de définition du ressaut hydraulique en canal composé droit....	48
Figure III.2	Variation de $Y$ , calculé par (III.4), en fonction de $F_1$ . (- - -) : $\beta = 1$ .....	50
Figure III.3	Variation de $Y$ en fonction de $F_1$ . (o) : équation (III.6), (+) : équation (III.4).....	51
Figure III.4	Variation de $\varepsilon$ en fonction de $F_1$ . (- - -) : $\beta = 1$ . $Y$ est calculé par l'équation (III.3).....	51
Figure III.5	Variation de $\eta$ en fonction de $F_1$ . (0) : équation (III.2), (+) : équation (III.1).....	52

Figure III.6	Schéma de définition du ressaut hydraulique dans un canal composé rectangulaire droit .....	52
Figure III.7	Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident pour $\tau_y = 0,25$ (sans $F_x$ ) .....	56
Figure III.8	Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident pour $\tau_y = 0,333$ (sans $F_x$ ) .....	56
Figure III.9	Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident pour $\tau_y = 0,5$ (avec $F_x$ ) .....	56
Figure III.10	Perte d'énergie relative en fonction du nombre de Froude incident ; Valeurs théoriques et expérimentales dans le canal composé rectangulaire droit et dans le canal rectangulaire .....	57
Figure III.11	Evolution de la perte d'énergie relative (valeurs théoriques et expérimentales), entre les deux limites de $\pm 5\%$ .....	58

## DEUXIEME PARTIE

### CHAPITRE I

Figure I.1	Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé, ayant servi à l'expérimentation.....	66
Photos I.1	Photographie du canal de mesure utilisé.....	66
Photos I.2	Photographie d'une série de convergent.....	67
Photos I.3	Photographie de la boîte en charge.....	67
Photos I.4	Photographie d'une vanne de régulation du débit.....	67
Photos I.5	Photographie d'une Pompe centrifuge.....	67
Photos I.6	Photographie du bassin d'accumulation.....	67
Photos I.7	Photographie du déversoir rectangulaire.....	67
Photos I.8	pointe limnimétrique.....	69
Figure I.2	Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.....	69
Photos I.9	Photographie de la série de seuil.....	70
Figure I.3	configuration du ressaut en canal rectangulaire composé.....	70
Figure I.4	Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire composé.....	71
Photo I.10	Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince $F_1 = 5,58$ ; $s = 6$ cm; $L_j = 103$ cm; $h_2 = 15,8$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm.....	72

Photo I.11	Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince $F_1 = 8,24$ ; $s = 15$ cm; $L_j = 186$ cm; $h_2 = 24,9$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm.....	72
Figure I.5	Variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal, (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	73
Figure I.6	Variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil. (o) points de mesures expérimentales en lit majeur ; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) courbes d'ajustement .....	75
Figure I.7	Variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil Pour $h/h_2 < 1$ . ( $\diamond$ ) $h_1 = 2$ cm ; ( $\square$ ) $h_1 = 2,5$ cm ; ( $\Delta$ ) $h_1 = 3$ cm ; (o) $h_1 = 3,5$ cm ; ( $*$ ) $h_1 = 4$ cm.....	75
Figure I.8	Variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil respectivement pour $h_1/B = (0,03 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066)$ . (o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.....	76
Figure I.9	Variation du paramètre 'b' en fonction de $h_1/B$ .....	78
Figure I.10	Variation de $Y_{exp}$ en fonction de $Y_{app}$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $Y_{exp} = Y_{app}$ .....	79
Figure I.11	Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	80
Figure I.12	Variation de la longueur relative $L_r/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	82
Figure I.13	Variation de la hauteur relative $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	84

Figure I.14	Variation du rapport $S = s/h_1$ de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude $F_1$ Pour $h_0/h_2 \geq 1$ . ( $\diamond$ ) $h_1=2$ cm ; ( $\square$ ) $h_1=2,5$ cm ; ( $\Delta$ ) $h_1=3$ cm ; ( $\circ$ ) $h_1=3,5$ cm ; ( $*$ ) $h_1=4$ cm.....	84
Figure I.15	Variation du rapport de la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ du ressaut respectivement pour $h_1/B = (0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,06)$ . ( $\circ$ ) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.....	85
Figure I.16	Variation du paramètre 'a' en fonction de $h_1/B$ .....	87
Figure I.17	Variation du paramètre 'b' en fonction de $h_1/B$ .....	87
Figure I.18	Variation de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil en fonction de la relation $f(F_1, h_1/B)$ . ( $\circ$ ) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$ .....	88
Figure I.19	Variation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ . ( $\circ$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur.....	90
Figure I.20	Profil de surface du ressaut.....	92
Figure I.21	Profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée, $h_1$ : ( $\diamond$ ) 2 ; ( $\square$ ) 2,5 ; ( $\Delta$ ) 3 ; ( $\circ$ ) 3,5 ; ( $*$ ) 4.....	92
Figure I.22	Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé, ayant servi à l'expérimentation.....	94
Photo I.12	Photographie des seuils épais.....	95
Figure I.23	Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais évoluant dans un canal rectangulaire composé.....	95
Photo I.13	Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais $F_1 = 5,34$ ; $s = 5.4$ cm; $L_j = 102$ cm; $h_2 = 15,6$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm.....	95
Photo I.14	Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais $F_1 = 8,33$ ; $s = 15$ cm; $L_j = 183$ cm; $h_2 = 25,2$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm.....	96
Figure I.24	Variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux cas du canal, ( $\circ$ ) points de mesures en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	96
Figure I.25	Variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil. $\circ$ ) points de mesures en	

	lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures en lit mineur. (—) courbe d'équation.....	98
Figure I.26	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil épais Pour $h_0/h_2 < 1$ . $h_1$ : ( $\diamond$ ) 2 ; ( $\square$ ) 2,5 ; ( $\Delta$ ) 3 ; (o) 3,5 ; ( $*$ ) 4.....	98
Figure. I.27	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil épais en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil respectivement pour $h_1/B = (0,03 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066)$ . (o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.....	99
Figure. I.28	Variation du coefficient "a" en fonction de la hauteur relative "y <sub>1</sub> ".....	101
Figure. I.29	Variation du coefficient "b" en fonction de la hauteur relative "y <sub>1</sub> ".....	102
Figure. I.30	Variation de Y exp en fonction de Y app. (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $Y_{exp} = Y_{app}$ .....	102
Figure. I.31	Variation du la longueur relative $L_j/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , (o) points de mesures en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	104
Figure. I.32	Variation du la longueur relative $L_r/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , (o) points de mesures en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	105
Figure. I.33	Variation de la hauteur relative $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , (o) Points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	107
Figure. I.34	Variation du rapport $S = s/h_1$ de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ . $h_1$ : ( $\diamond$ ) 2 ; ( $\square$ ) 2,5 ; ( $\Delta$ ) 3 ; (o) 3,5 ; ( $*$ ) 4.....	107
Figure. I.35	Variation du rapport de la hauteur relative du seuil $S = s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ du ressaut respectivement pour $h_1/B = (0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,06)$ . (o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.....	108
Figure. I.36	Variation du paramètre 'b' en fonction de $h_1/B$ .....	110
Figure. I.37	Variation de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil en fonction de la relation	

	f ( $F_1, h_1/B$ ). (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$ .....	110
Figure. I.38	Variation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ . (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur.....	112
Figure. I.39	Profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composé, $h_1$ : ( $\diamond$ ) 2 ; ( $\square$ ) 2,5 ; ( $\Delta$ ) 3 ; (o) 3,5 ; ( $\ast$ ) 4.....	113
Figure. I.40	Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé, ayant servi à l'expérimentation.....	115
Photo I.15	Photographie des marches positives.....	116
Figure. I.41	Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive évoluant dans un canal rectangulaire composé.....	116
Photo I.16	Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive $F_1 = 5,504$ ; $s = 5,4$ cm; $L_j = 100$ cm; $h_2 = 15,8$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm.....	116
Photo I.17	Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive $F_1 = 8,56$ ; $s = 15$ cm; $L_j = 189$ cm; $h_2 = 25,4$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm.....	117
Figure. I.42	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux cas du canal, (o) points de mesures en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	117
Figure. I.43	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil. (o) Points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) courbe d'équation.....	119
Figure. I.44	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche positive Pour $h_0/h_2 < 1$ . $h_1$ : ( $\diamond$ ) 2 ; ( $\square$ ) 2,5 ; ( $\Delta$ ) 3 ; (o) 3,5 ; ( $\ast$ ) 4.....	119
Figure. I.45	Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par marche positive en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ de la marche respectivement pour $h_1/B = (0,03 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066)$ . (o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.....	120

Figure. I.46	Variation du coefficient "a" en fonction de la hauteur relative "y <sub>1</sub> ".....	122
Figure. I.47	Variation du coefficient "b" en fonction de la hauteur relative "y <sub>1</sub> ".....	123
Figure. I.48	Variation de Y <sub>exp</sub> en fonction de Y <sub>app</sub> . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : Y <sub>exp</sub> = Y <sub>app</sub> .....	123
Figure. I.49	Variation de la longueur relative L <sub>j</sub> /h <sub>1</sub> en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> , (o) points de mesures en lit majeur; (Δ) points de mesures en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	125
Figure. I.50	Variation de la longueur relative L <sub>r</sub> /h <sub>1</sub> en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> , (o) points de mesures en lit majeur; (Δ) points de mesures en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	126
Figure. I.51	Variation de la hauteur relative s/h <sub>1</sub> en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> , (o) points de mesures en lit majeur; (Δ) points de mesures en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.....	128
Figure. I.52	Variation du rapport S = s/h <sub>1</sub> de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> pour h <sub>0</sub> /h <sub>2</sub> ≥ 1. . h <sub>1</sub> : (◇) 2 ; (□) 2,5 ; (Δ) 3 ; (o) 3,5 ; (*) 4.....	128
Figure. I.53	Variation du rapport de la hauteur relative du seuil S = s/h <sub>1</sub> en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> du ressaut respectivement pour h <sub>1</sub> /B = (0,033, 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,06). (o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.....	129
Figure. I.54	Variation du coefficient "a" en fonction de la hauteur relative "y <sub>1</sub> ".....	131
Figure. I.55	Variation du coefficient "b" en fonction de la hauteur relative "y <sub>1</sub> ".....	131
Figure. I.56	Variation de la de la hauteur relative s/h <sub>1</sub> du seuil en fonction de la relation f (F <sub>1</sub> , y <sub>1</sub> ). (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : s/h <sub>1</sub> = f (F <sub>1</sub> , h <sub>1</sub> /B).....	131
Figure. I.57	Variation du Rendement η en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> . (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (◇ ) points de mesures expérimentales en lit mineur.....	133
Figure. I.58	Profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composé, h <sub>1</sub> : (◇) 2 ; (□) 2,5 ; (Δ) 3 ; (o) 3,5; (*) 4.....	134
Figure. I.59	variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude F <sub>1</sub> , pour les trois configurations.	

	Contrôler par ( $\diamond$ ) seuil mince, ( $\Delta$ ) seuil épais, et ( $\circ$ ) marche positive...	136
Figure. I.60	variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude $F_1$ , pour les trois configurations. Pour $h_0/h_2 \geq 1$ . ( $\diamond$ ) seuil mince, ( $\Delta$ ) seuil épais, ( $\circ$ ) marche positive....	136
Figure. I.61	variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude $F_1$ , pour les trois configurations. Pour $h_0/h_2 < 1$ . ( $\diamond$ ) seuil mince, ( $\Delta$ ) seuil épais, ( $\circ$ ) marche positive....	137
Figure. I.62	variation de la hauteur relative $S=s/h_1$ du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude $F_1$ , pour les trois configurations. ( $\diamond$ ) seuil mince, ( $\Delta$ ) seuil épais, ( $\circ$ ) marche positive.....	137
Figure. I.63	variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$ , pour les trois configurations. ( $\diamond$ ) seuil mince, ( $\Delta$ ) seuil épais, ( $\circ$ ) marche positive.....	138
Figure. I.64	variation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ , pour les trois configurations. Contrôler par ( $\diamond$ ) seuil mince, ( $\Delta$ ) seuil épais, et ( $\circ$ ) marche positive.....	138

## CHAPITRE II

Figure. II.1	Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé, ayant servi à l'expérimentation.....	144
Figure. II.5	Variation du rapport $L_r/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composé. ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur ; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) courbes d'ajustements.....	149
Figure. II.2	Ressaut hydraulique forcé par seuil : a) ressaut type A. b) Ressaut type B. c) Ressaut type $B_{min}$ .....	145
Figure. II.3	Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique forcé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire composé.....	146
Photos II.1	Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par seuil mince type A $F_1 = 6, 16$ ; $s = 4$ cm; $L_B = 107$ cm; $h_2 = 16,3$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm.....	146
Photos II.2	Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par seuil mince type A $F_1 = 8, 38$ ; $s = 11$ cm; $L_B = 171$ cm; $h_2 = 23,5$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm.....	146
Figure. II.4	Variation du rapport des hauteurs conjuguées Y en fonction du nombre	

	de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composée. ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements.....	147
Figure. II.5	Variation du rapport $L_r/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composé. ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur ; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) courbes d'ajustements.....	149
Figure. II.6	Variation du rapport $L_B/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composée. ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements.....	150
Figure. II.7	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composée. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour $h_0/h_2 < 1$ . ( $\circ$ ) $h_1=2\text{cm}$ , ( $\square$ ) $h_1=2.5\text{cm}$ , ( $\Delta$ ) $h_1=3\text{cm}$ , ( $\diamond$ ) $h_1=3.5\text{cm}$ , ( $*$ ) $h_1=4\text{cm}$ . (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements.....	152
Figure. II.8	Variation du rapport $S = s/h_1$ de la hauteur relative du seuil du ressaut forcé en fonction de nombre de Froude respectivement pour $h_1/B = (0,03 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066)$ . ( $\circ$ ) points expérimentaux. (—) courbe d'ajustement .....	153
Figure. II.9	Variation du paramètre 'b' en fonction de $h_1/B$ .....	155
Figure. II.10	Variation de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil en fonction de la relation $f(F_1, h_1/B)$ . ( $\circ$ ) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$ .....	155
Figure. II.11	Variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées du ressaut forcé en fonction de la hauteur relative $S = s/h_1$ du seuil. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour $h_0/h_2 < 1$ . ( $\circ$ ) $h_1=2\text{cm}$ ; ( $*$ ) $h_1=2,5\text{cm}$ ; ( $\diamond$ ) $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\square$ ) $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $\Delta$ ) $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbe d'ajustement.....	156

Figure II.12	Variation du rapport $Y$ de la hauteur conjuguée du ressaut forcé en fonction de la hauteur relative du seuil $S$ , respectivement pour $h_1/B = (0,03 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066)$ . (o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.....	157
Figure II.13	Variation du paramètre 'a' en fonction de $h_1/B$ .....	159
Figure II.14	Variation du paramètre 'b' en fonction de $h_1/B$ .....	159
Figure II.15	Variation de la hauteur conjuguée $Y$ du ressaut en fonction de la relation $f(h_1/B, s/h_1)$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $Y = f(h_1/B, s/h_1)$ .....	160
Figure II.16	Variation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ . ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; (o) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements.....	161
Figure II.17	Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé, ayant servi à l'expérimentation .....	162
Figure II.18	Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique forcé par seuil épais évoluant dans un canal rectangulaire composé .....	163
Photo II.5	Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par seuil épais $F_1 = 5,99$ ; $s = 4,5$ cm; $L_s = 58$ cm; $h_2 = 15,7$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm.....	163
Photo II.6	Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par seuil épais $F_1 = 8,38$ ; $s = 10,9$ cm; $L_s = 115$ cm; $h_2 = 23,4$ cm ; $h_1 = 2,5$ cm.....	164
Figure II.19	Variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composée. (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil épais. (—) Courbes d'ajustements.....	164
Figure II.20	Variation du rapport $L_s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composée. (o) Points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil épais. (—) Courbes d'ajustements.....	166
Figure II.21	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composée. (+) points de mesures expérimentales en	

	lit mineur; Pour $h_0/h_2 < 1$ . (o) $h_1=2\text{cm}$ ; ( $\square$ ) $h_1=2,5\text{cm}$ ; ( $\Delta$ ) $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\diamond$ ) $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $*$ ) $h_1=4\text{cm}$ . (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements.....	167
Figure II.22	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour le lit majeur du canal composée. (o) $h_1=2\text{cm}$ ; ( $\square$ ) $h_1=2,5\text{cm}$ ; ( $\Delta$ ) $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\diamond$ ) $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $*$ ) $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbes d'ajustements.....	168
Figure II.23	Variation du paramètre 'b' en fonction de $h_1/B$ .....	169
Figure II.24	Variation de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil en fonction de la relation $f(F_1, h_1/B)$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$ .....	170
Figure II.25	Variation de la position relative du seuil $\lambda s$ en fonction de sa hauteur relative $s/$ . (+) points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour $h_0/h_2 < 1$ . (o) $h_1=2\text{cm}$ ; ( $*$ ) $h_1=2,5\text{cm}$ ; ( $\diamond$ ) $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\square$ ) $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $\Delta$ ) $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbe d'ajustement.....	171
Figure II.26	Variation de la position relative du seuil $\lambda s$ en fonction de sa hauteur relative $s/h_1$ , Dans le lit majeur. (o) $h_1=2\text{cm}$ ; ( $*$ ) $h_1=2,5\text{cm}$ ; ( $\diamond$ ) $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\square$ ) $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $\Delta$ ) $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbe d'ajustement.....	171
Figure II.27	Variation du paramètre 'a' en fonction de $h_1/B$ .....	172
Figure II.28	Variation de la position relative $Ls/h_1$ du seuil en fonction de la relation $f(s/h_1, h_1/B)$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $Ls/h_1 = f(s/h_1, h_1/B)$ .....	173
Figure II.29	Variation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ . ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; (o) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil épais. (—) Courbes d'ajustements.....	174
Figure II.30	Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé, ayant servi à l'expérimentation.....	175
Figure II.31	Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique forcé par marche positive évoluant dans un canal rectangulaire composé.....	176
Photo II.7	Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par marche positif $F_1 = 6,67$ ; $s = 5,4\text{ cm}$ ; $Ls = 70\text{ cm}$ ; $h_2 = 16,9\text{ cm}$ ; $h_1 = 2,5\text{ cm}$ .....	176
Photo II.8	Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par marche positif $F_1 = 8,52$ ; $s = 11,8\text{ cm}$ ; $Ls = 126\text{ cm}$ ; $h_2 = 23,1\text{ cm}$ ; $h_1 = 2,5\text{ cm}$ .....	176

Figure. II.32	Variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y_A$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composée. ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; (o) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par marche positive. (—) Courbes d'ajustements.....	177
Figure. II.33	Variation du rapport $Ls/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composée. (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par marche positive. (—) Courbes d'ajustements.....	179
Figure. II.34	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour les deux lits du canal composée. ( $\square$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour $h_0/h_2 < 1$ . (o) $h_1=2\text{cm}$ , ( $\Delta$ ) $h_1=2.5\text{cm}$ , ( $\diamond$ ) $h_1=3\text{cm}$ , ( $*$ ) $h_1=3.5\text{cm}$ , (+) $h_1=4\text{cm}$ . (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements.....	180
Figure. II.35	Variation du rapport $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ pour le lit majeur du canal composée. (o) $h_1=2\text{cm}$ ; ( $\Delta$ ) $h_1=2,5\text{cm}$ ; ( $\diamond$ ) $h_1=3\text{cm}$ ; ( $*$ ) $h_1=3,5\text{cm}$ ; (+) $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbes d'ajustements.....	181
Figure. II.36	Variation des paramètres 'a' et 'b' en fonction de $h_1/B$ .....	182
Figure. II.37	Variation de la hauteur relative $s/h_1$ du seuil en fonction de la relation $f(F_1, h_1/B)$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice.....	183
Figure. II.38	Variation de la position relative du seuil $\lambda_s$ en fonction de sa hauteur relative $s/h_1$ . (+) points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour $h_0/h_2 < 1$ . ( $\square$ ) $h_1=2\text{cm}$ ; ( $\Delta$ ) $h_1=2,5\text{cm}$ ; (o) $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\diamond$ ) $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $*$ ) $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbe d'ajustement.....	183
Figure II.39	Variation de la position relative du seuil $\lambda_s$ en fonction de sa hauteur relative $s/h_1$ , Dans le lit majeur. ( $\square$ ) $h_1=2\text{cm}$ ; ( $\Delta$ ) $h_1=2,5\text{cm}$ ; (o) $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\diamond$ ) $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $*$ ) $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbe d'ajustement.....	184
Figure II.40	Variation du paramètre 'a' en fonction de $h_1/B$ .....	185
Figure II.41	Variation de la position relative $Ls/h_1$ du seuil en fonction de la relation $f(s/h_1, h_1/B)$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $Ls/h_1 = f(s/h_1, h_1/B)$ .....	186

Figure II.42	Variation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ . ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; (o) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par marche positive.....	188
Figure II.43	Variation du rapport $Y$ des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude $F_1$ . a) en lit mineur, b) en lit majeur. Ressaut contrôlé : ( $\diamond$ ) Par seuil mince. ( $\Delta$ ) Par seuil épais (o) Par marche positive. Ressaut forcé de type A : ( $\square$ ) Par seuil mince. ( $*$ ) Par seuil épais. (+) Par marche positive.....	189
Figure II.44	Variation de la position relative du seuil en fonction du nombre de Froude $F_1$ . a) en lit mineur, b) en lit majeur. Ressaut contrôlé : ( $\diamond$ ) Par seuil mince. ( $\Delta$ ) Par seuil épais (o) Par marche positive. Ressaut forcé de type A : ( $\square$ ) Par seuil mince. ( $*$ ) Par seuil épais. (+) Par marche positive.....	191
Figure II.45	Variation du rendement $\eta$ en fonction du nombre de Froude $F_1$ . Ressaut contrôlé : ( $\diamond$ ) Par seuil mince. ( $\Delta$ ) Par seuil épais (o) Par marche positive. Ressaut forcé de type A : ( $\square$ ) Par seuil mince. ( $*$ ) Par seuil épais. (+) Par marche positive.....	193

**LISTE DES TABLEAUX**

**PREMIERE PARTIE**

**CHAPITRE III**

Tableau III.1	Gammes expérimentales des paramètres .....	53
Tableau III.2	Valeurs limites du nombre de Froude incident selon $\tau_z$ (Eq. (III.11))...	54
Tableau III.3	Performances de chaque modèle selon les valeurs de $\tau_y$ (Eqs. (III.13) et (III.15)) .....	55

**DEUXIEME PARTIE**

**CHAPITRE I**

Tableau I.1	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	74
Tableau I.2	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(s/h_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	77
Tableau I.3	Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant $Y$ a la hauteur relative du seuil pour différentes hauteur $h_1$ des ouvertures .....	78
Tableau I.4	Ecarts relatifs entre $Y$ expérimental et $Y$ de la relation (I.6).....	79
Tableau I.5	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $L_j/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	81
Tableau I.6	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $L_r/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	82
Tableau I.7	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	86
Tableau I.8	Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant $S = s/h_1$ au nombre de Froude, pour différentes hauteur $h_1$ des ouvertures .....	87
Tableau I.9	Ecarts relatifs entre $S$ expérimental et $S$ de la relation (I.14).....	88
Tableau I.10	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure I.19.....	91

Tableau I.11	Mesures expérimentales du profil de surface ( $y= f(X)$ ) du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire de section composée.....	93
Tableau I.12	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	97
Tableau I.13	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(s/h_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	100
Tableau I.14	Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant $Y$ a la hauteur relative du seuil pour différentes hauteur $h_1$ des ouvertures .....	101
Tableau I.15	Ecarts relatifs entre $Y$ expérimental et $Y$ de la relation (I.27).....	103
Tableau I.16	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $L_j/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	104
Tableau I.17	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $L_r/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	106
Tableau I.18	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	109
Tableau I.19	Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant $S = s/h_1$ au nombre de Froude, pour différentes hauteurs $h_1$ des ouvertures .....	109
Tableau I.20	Ecarts relatifs entre $Y$ expérimental et $Y$ de la relation (I.34).....	111
Tableau I.21	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure I.37.....	112
Tableau I.22	Mesures expérimentales du profil de surface ( $y= f(X)$ ) du ressaut contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire de section composée.....	114
Tableau I.23	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	118
Tableau I.24	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(s/h_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	121
Tableau I.25	Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant $Y$ a la hauteur relative du seuil pour différentes hauteur $h_1$ des ouvertures.....	122

Tableau I.26	Ecarts relatifs entre Y expérimental et Y de la relation (I.40).....	124
Tableau I.27	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $L_j/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	125
Tableau I.28	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $L_r/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	127
Tableau I.29	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	130
Tableau I.30	Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant $S = s/h_1$ au nombre de Froude, pour différentes hauteur $h_1$ des ouvertures.....	130
Tableau I.31	Ecarts relatifs entre S expérimental et S de la relation (I.48).....	132
Tableau I.32	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure I.56.....	133
Tableau I.33	Mesures expérimentales du profil de surface ( $y = f(X)$ ) du ressaut contrôlé par marche positive dans un canal rectangulaire de section composée.....	135

## Chapitre II

Tableau II.1	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	148
Tableau II.2	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des graphiques de $L_r/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	149
Tableau II.3	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des graphiques de $\lambda_B =$ $f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	151
Tableau II.4	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	154
Tableau II.5	Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant $s/h_1$ au nombre de Froude $F_1$ pour différentes hauteurs $h_1$ des ouvertures.....	154
Tableau II.6	Mesures expérimentales ayant servi au traçage des graphique de $Y =$ $f(s/h_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	158
Tableau II.7	Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant Y a la hauteur relative S, pour différents hauteur $h_1$ des ouvertures.....	158

Tableau II.8	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure II.16.....	161
Tableau II.9	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	165
Tableau II.10	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des graphiques de $Ls/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	166
Tableau II.11	Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant $s/h_1$ au nombre de Froude $F_1$ , pour différentes hauteurs $h_1$ des ouvertures.....	168
Tableau II.12	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	169
Tableau II.13	Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant $\lambda_s$ a la hauteur relative $S$ , pour différentes hauteurs $h_1$ des ouvertures.....	172
Tableau II.14	Valeurs expérimentales ayant servi au <i>traçage</i> des courbes $Ls/h_1 =$ $f(s/h_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	173
Tableau II.15	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure II.29.....	174
Tableau II.16	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Y_A = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	178
Tableau II.17	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $Ls/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	179
Tableau II.18	Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant $s/h_1$ au nombre de Froude $F_1$ , pour différentes hauteurs $h_1$ des ouvertures.....	181
Tableau II.19	Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes $s/h_1 = f(F_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	182
Tableau II.20	Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant $\lambda_s$ a la hauteur relative $S$ , pour différentes hauteurs amont $h_1$ .....	184
Tableau II.21	Valeurs expérimentales ayant servi au <i>traçage</i> des courbes $Ls/h_1 =$ $f(s/h_1)$ pour $h_0/h_2 \geq 1$ et $h_0/h_2 < 1$ .....	186
Tableau II.22	Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure II.42.....	188
Tableau II.23	valeur des constantes $a$ et $b$ de l'équation (II.34) pour les six type de ressaut.....	190

Tableau II.24	valeur des constantes a et b de l'équation (II.35) pour les six type de ressaut.....	192
---------------	--	-----

## Principales notations

$A_1$	Aire de la section au pied du ressaut	$[m^2]$
$A_2$	Aire de la section à la fin du ressaut	$[m^2]$
$B$	largeur du lit majeur	$[m]$
$b$	largeur du lit mineur	$[m]$
$F_1$	Nombre de Froude incident	$[-]$
$f_x$	force de résistance	$[N/m^2]$
$f_l$	Les forces hydrostatiques au pied du ressaut	$[N]$
$f_2$	Les forces hydrostatiques à la fin du ressaut	$[N]$
$g$	Accélération de la pesanteur	$[m/s^2]$
$h_0$	Hauteur de plein bord du lit mineur	$[m]$
$h_1^*$	Première hauteur conjuguée relative	$[m]$
$h_2^*$	Deuxième hauteur conjuguée relative	$[m]$
$h_1$	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	$[m]$
$H_1$	charge totale au pied du ressaut	$[m]$
$H_2$	charge totale a la fin du ressaut	$[m]$
$\Delta H$	pertes de charge due au ressaut	$[m]$
$k$	coefficient	$[-]$
$L_B$	Longueur du bassin	$[m]$
$L_m$	Lit mineur	$[-]$
$L_M$	Lit majeur	$[-]$
$L_n$	Logarithme népérien	$[-]$
$L_r^*$	Longueur du rouleau classique	$[m]$
$L_j^*$	Longueur du ressaut classique	$[m]$
$L_r$	Longueur du rouleau	$[m]$
$L_j$	Longueur du ressaut	$[m]$
$L_{RF}$	Longueur du rouleau de fond	$[m]$
$L_S$	Position du seuil ou d'une marche par rapport au début du ressaut	$[m]$
$Q$		$[m^3/s]$

s	Débit volume	[m]
S	Hauteur du seuil ou de la marche positive	[m]
V	Hauteur relative du seuil ou de la marche positive	[m <sup>3</sup> ]
v <sub>1</sub>	Le volume	[m/s]
v <sub>2</sub>	La vitesse moyenne au pied du ressaut	[m/s]
x	La vitesse moyenne a la fin du ressaut	[m]
X	Position de seuil ou de la marche	[m]
X <sub>rf</sub>	Position relative de seuil ou de la marche	[m]
Y*	Position de la fin du rouleau de fond à l'aval	[-]
Y	Rapports des hauteurs conjuguées du ressaut classique	[-]
Y <sub>F</sub>	Rapports des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé	[-]
Y <sub>A</sub>	Rapports des hauteurs conjuguées du ressaut force	[-]
Y <sub>B</sub>	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type A	[-]
Y <sub>B-min</sub>	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type B	[-]
Y=h <sub>2</sub> /h <sub>1</sub>	Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut de type B-min	[-]
W	Rapport des hauteurs conjuguées	[-]
τ <sub>y</sub> = β = b/B	Rapport d'aspect W = h <sub>0</sub> /b	[-]
β <sub>1</sub>	Rapport de l'élargissement	[-]
β <sub>2</sub>	Coefficient de Boussinesq au pied du ressaut	[-]
τ <sub>z</sub> = τ = h <sub>1</sub> /h <sub>0</sub>	Coefficient de Boussinesq à la fin du ressaut	[-]
η	rapport des hauteurs	[-]
ρ	Rendement du ressaut	[kg/m <sup>3</sup> ]
α	Masse volumique	[-]
ω	Facteur de correction de l'énergie cinétique	[N/m <sup>3</sup> ]
ξ	Poids spécifique du liquide	[-]
λ <sub>j</sub> = L <sub>j</sub> /h <sub>1</sub>	coefficient tenant compte des pertes par frottement	[-]
λ <sub>r</sub> = L <sub>r</sub> /h <sub>1</sub>	longueur relative du ressaut	[-]
	longueur relative du rouleau	

# Introduction Générale

## INTRODUCTION GENERALE

Pour éviter l'immersion des ouvrages hydrauliques tels que les barrages pendant les fortes crues, et par la suite leur rupture, il est nécessaire d'équiper la crête de ces ouvrages par un déversoir d'orage. Le volume d'eau déversé par ce dernier, va créer un écoulement torrentiel caractérisé par des forces tractrices présentant un caractère érosif à l'aval (*Debabeche 2003*). Pour cela, l'ouvrage hydraulique doit avoir un bassin amortisseur à son pied, dans lequel le ressaut hydraulique sera formé. Ce dernier permet de passer brusquement du régime d'écoulement torrentiel au régime fluvial sur une courte distance produisant une diminution des forces tractrices.

La forme du bassin d'amortissement est liée à la forme géométrique naturelle de la rivière, son dimensionnement est basé essentiellement sur l'étude des caractéristiques du ressaut hydraulique. Celles-ci sont principalement les hauteurs d'eau en amont et en aval du ressaut (hauteurs conjuguées), et les longueurs du ressaut hydraulique.

Récemment, ce phénomène a attiré l'attention de nombreux chercheurs. À titre d'exemple, nous citons les travaux de : *Hager et Bretz (1987)*, *Hager (1992)*, *Ead et Rajaratnam (2002)*, *Achour et al (2002)*, *Chanson (2009)*, qui ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire horizontal. *Hager et Wanoschek (1987)*. *Achour et Debabeche (2003)* et *Debabeche et Achour (2007)*, ont examiné le ressaut hydraulique évoluant dans un canal triangulaire horizontal. *Debabeche et al. (2009)* ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal triangulaire en pente, *Ghomri et al 2012* ont étudié le ressaut hydraulique dans un canal profilé en U, *Kateb, Debabeche et Riguet (2013)* qui ont étudié le ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal incliné.

Par ailleurs, les chercheurs ont classifié le ressaut hydraulique en différentes catégories relatives à sa configuration. En effet, la modification des conditions à l'amont (débit, hauteurs, ...etc.) et à l'aval (type d'obstacle, sa position, son hauteur, la pente du canal, ...etc.) peut conduire à différentes configurations du ressaut (*Debabeche et al, 2009*). Le ressaut est dit classique lorsqu'il se forme dans un canal rectangulaire de pente nulle ou faible, sans obstacle à l'aval (*Hager, Bremen et Kawagoshi, 1990*). Il est dit contrôlé lorsque sa formation est conditionnée par la mise en place d'un obstacle (*Hager et Bretz, 1988*). Il est dit forcé lorsqu'il se forme de part et d'autre de l'obstacle (*Rand, 1957 ; Bretz, 1988*). Le rôle de l'obstacle (ou seuil) est uniquement de provoquer la formation du ressaut et le contrôle de sa position.

Tous les chercheurs dans ce domaine sont d'accord que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. C'est en d'autres termes la seconde loi de Newton qui est appliquée, qui montre que la variation de la quantité de mouvement entre les sections initiale et finale du ressaut est égale à la résultante des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement (*Debabeche et al, 2009*).

L'application de l'équation de la quantité de mouvement a eu pour but d'évaluer le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de *Froude*  $F_1$  caractérisant l'écoulement à l'amont. La relation la plus simple est celle obtenue par *Belanger (1828)* pour le cas du ressaut classique en canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible et dont la validité a été vérifiée par plusieurs auteurs.

En ce qui concerne la longueur du ressaut  $L_j$ , la bibliographie montre qu'à ce jour aucun développement théorique ne peut conduire à la création d'une relation analytique permettant son évaluation; seuls les essais au laboratoire ont permis de la quantifier. C'est ainsi que *Bradley et Peterka (1957)* ont élaboré une courbe moyenne expérimentale, représentant la variation de la longueur relative  $L_j^*/h_2^*$  en fonction du nombre de *Froude*  $F_1$  à l'amont du ressaut. La longueur du ressaut  $L_j$  prend sa place du pied du ressaut à la fin des bulles d'air où se termine la zone de risque.

Une autre caractéristique géométrique du ressaut est la longueur  $L_r$  sur laquelle s'étend son rouleau de surface. Comme pour la longueur  $L_j$ ,  $L_r$  n'a pu être évaluée que par voie expérimentale, plusieurs auteurs ont quantifié cette longueur *Bradley et Peterka (1957)*, *Bakhmeteff et Matzke (1936)*, mais nous citerons surtout les travaux relativement récents de *Hager (1990)* qui montrent que la longueur relative  $L_r^*/h_1$  dépend à la fois du nombre de *Froude*  $F_1$  et du rapport d'aspect  $w = h_1/b$ ;  $h_1$  et  $b$  sont respectivement la hauteur initiale du ressaut et la largeur du canal rectangulaire.

L'objectif de cette thèse est d'analyser expérimentalement deux types de ressaut hydraulique, à savoir le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive, et le ressaut hydraulique forcé de type A, par seuil mince, par seuil épais et par marche positive dans un canal rectangulaire de section composée. Cette recherche fondamentale n'a jamais fait l'objet d'études antérieures, à l'exception l'étude théorique du ressaut hydraulique en lit composé de *Khattaoui et Achour (2012)*, la compacité du ressaut qui a été faite par *Benmalek (2018)*. Par ailleurs, l'étude la plus récente est celle de *benabdesselam et Al (2017 et 2020)*, consacrée à l'étude théorique et la validation

expérimentale des relations obtenue. C'est dans le but de combler cette lacune que notre étude a été proposée.

Notre thèse comporte deux grandes parties principales : une première partie bibliographique, à travers laquelle, nous nous concentrons sur les travaux les plus importants accomplis dans ce domaine. Elle est à son tour divisée en trois chapitres, et à travers lesquels nous aborderons le ressaut hydraulique classique, le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive, ainsi que le ressaut forcé type A par seuil mince et par marche positive, en plus du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé.

Une deuxième partie concernant notre propre contribution dans cette étude, se proposera d'examiner par voie expérimentale, le ressaut contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive et le ressaut de type A, forcé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive dans un canal de section droite rectangulaire de section composée. Des relations fonctionnelles, en termes adimensionnels, liant les différentes caractéristiques du ressaut seront également proposées. Une étude comparative entre le ressaut hydraulique contrôlé et forcé type A par les trois types d'obstacles sera effectuée.

# **Première Partie**

## Synthèse bibliographique

## INTRODUCTION A LA PREMIERE PARTIE

Dans cette partie de notre étude, nous ferons une brève présentation des travaux les plus importants accomplis dans le domaine du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire.

Cette partie bibliographique comprend trois chapitres :

**Le premier chapitre** présentera les travaux les plus importants relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire. Quatre types de ressaut seront alors cités:

- Le ressaut hydraulique classique, où nous rappellerons essentiellement les travaux de *Bradley et Peterka (1957)* concernant la forme du ressaut et ceux de *Hager et al. (1990)* relatifs aux caractéristiques du ressaut classique.
- Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, où nous citerons les travaux de *Forster et Skrinde (1950)* et l'étude de *Achour et al (2002)*.
- Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais, où nous examinerons l'étude de *Forster et Skrinde (1950)* et celle de *Achour et al (2002)*.
- Le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive, la contribution de *Forster et Skrinde (1950)*.

**Le deuxième chapitre** de cette partie sera consacré aux travaux les plus importants concernant le ressaut hydraulique forcé type A dans un canal rectangulaire.

Deux types de ressaut seront alors étudiés:

- Le ressaut hydraulique forcé par seuil mince, où nous montrerons les travaux de *Rand (1957)*, Nous présenterons également les travaux de *Rajaratnam (1964)*. Nous présenterons ensuite l'étude de *Bretz (1988)*, les travaux de *Hager et Li (1992)*.
- Le ressaut forcé par marche positive, où nous présenterons les travaux de *Hager et Sinniger (1986)* et celles de *Hager et Bretz (1987)*.

**Le troisième et dernier chapitre** de cette étude bibliographique évoquera les travaux de *Khattaoui et Achour (2012)* concernant l'étude théorique du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composée, Nous présenterons également les travaux de benabdesselam et Al (2017 et 2020) relatif a l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique en canal rectangulaire composé.

# *Chapitre I*

Ressaut hydraulique contrôlé  
dans un Canal rectangulaire

## **CHAPITRE I**

### ***Ressaut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire***

#### **I.1. Introduction**

Le model du canal rectangulaire prismatique de pente et de rugosité nulle, fait l'objet des premières investigations dans le domaine des recherches sur le ressaut hydraulique, qui s'appelle le ressaut hydraulique classique.

Dans ce chapitre nous allons donner un bref aperçu sur les travaux les plus intéressants entrepris sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal de section droite rectangulaire. Quatre types de ressaut, en canal rectangulaire, seront alors examinés:

Le ressaut hydraulique classique, où nous rappellerons essentiellement les travaux de *Bradley et Peterka (1957)* concernant la forme du ressaut et ceux de *Hager (1990) et (1992)* relatifs respectivement aux caractéristiques du ressaut classique, le développement d'une formule permettant de présenter le profil de surface du ressaut hydraulique.

Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, où nous donnerons un aperçu sur les travaux de *Forster et Skrinde (1950)* et ceux de *Achour (2002)*.

Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais, où il sera question des travaux de *Forster et Skrinde (1950)* et ceux de *Achour (2002)*.

Le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive. Nous soulignons enfin les travaux de *Forster et Skrinde (1950)*.

#### **I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CLASSIQUE**

Idiomatiquement, la transition soudaine du régime d'écoulement turbulent à un régime d'écoulement fluvial est connue sous le nom de ressaut hydraulique. Ce passage s'accompagne d'une perturbation de la surface libre de l'écoulement qui s'étend sur une longueur  $L_r$  appelée longueur du rouleau (*Hager 1990*). Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu' il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible.

Le ressaut hydraulique est caractérisé par les longueurs  $L_r$  et  $L_j$ , qui désignent respectivement la longueur du rouleau et la longueur du ressaut, les hauteurs  $h_1$  et  $h_2$ , appelées également hauteurs conjuguées. Le ressaut hydraulique est dit classique lorsqu' il se forme dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle ou faible.

Une dissipation d'énergie est associée à la formation du ressaut hydraulique. Sa capacité peut être évaluée par le rapport de la perte de charge occasionnée entre ses sections initiale et finale.

Les paramètres essentiels pour déterminer le nombre de Froude sont le débit volumique  $Q$ , la hauteur initiale  $h_1$  et la forme géométrique du canal. Si le nombre de Froude est supérieur à l'unité, on dit que l'écoulement est torrentiel, ce qui provoque la formation du ressaut hydraulique.

On s'accorde à dire que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement dont l'application a pour objectif de définir la relation  $Y=h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude  $F_1$  (Debabeche, 2003).

Le ressaut hydraulique peut être contrôlé par un seuil à paroi mince ou épaisse, continu ou discontinu ainsi que par une marche positive ou négative. Le rôle de tous ces obstacles est d'assurer la formation et de contrôler sa position lors de changement des paramètres de l'écoulement.

### **I.2.1. Forme du ressaut classique**

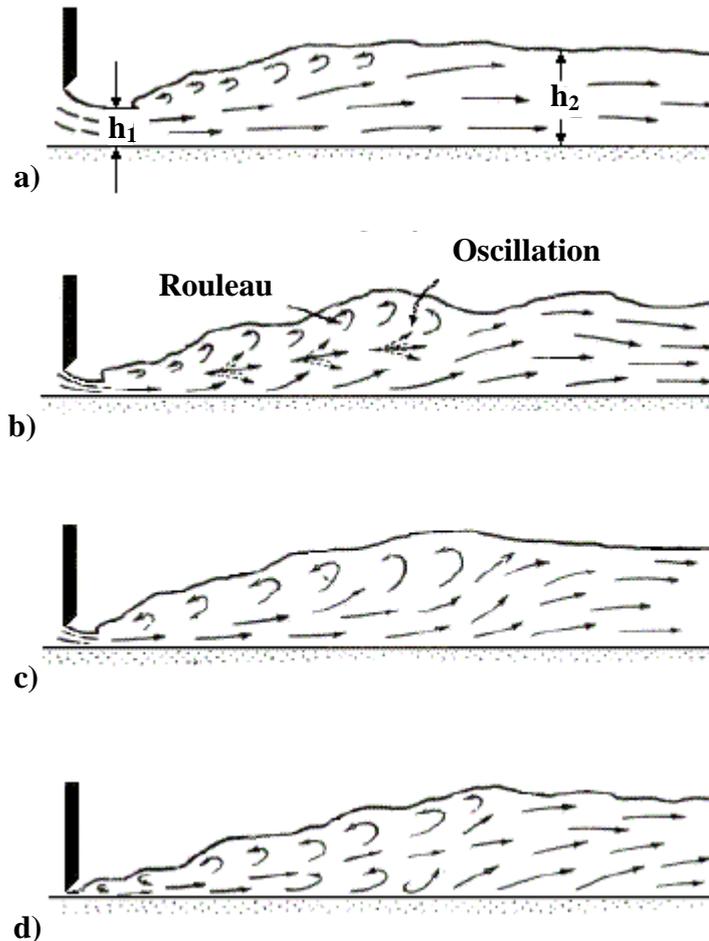
Les chercheurs *Bradley et Peterka (1957)* ont proposé une classification du ressaut hydraulique classique qui comprend quatre formes différentes :

- LE PRE-RESSAUT avec  $1,7 < F_1 < 2,5$  (figure I.1,a) : la surface du ressaut est composée d'une série de petits rouleaux pour  $F_1 = 1,7$ , les rouleaux s'intensifient au fur et à mesure que le nombre de Froude  $F_1$  augmente. La répartition des vitesses dans la section amont du ressaut est pratiquement uniforme mais le rendement obtenu est très faible.

- LE RESSAUT DE TRANSITION avec  $2,5 < F_1 < 4,5$  (figure I.1,b) : ce type de ressaut se manifeste sous forme de battements de larges vagues à des périodes très irrégulières, pouvant occasionner un effet érosif sur les parois latérales du canal.

- LE RESSAUT STABLE obtenu pour la gamme  $4,5 < F_1 < 9$  (figure I.1,c) : c'est ce type de ressaut que l'on utilise souvent dans les bassins de dissipation d'énergie en raison notamment de son bon rendement (entre 45 et 70%), de sa compacité ainsi que de sa stabilité.

- LE RESSAUT AGITE OU CLAPOTEUX obtenu pour  $F_1 > 9$  (figure I.1,d) : le jet entrant dans la section initiale du ressaut est caractérisé par une faible profondeur et une vitesse très élevée. Il présente une instabilité verticale et ne peut adhérer constamment au fond du canal. La surface libre du ressaut est irrégulière et très écumeuse.



**Figure I.1 :** Forme du ressaut classique selon la classification de Bradley et Peterka (1957).  
 a) Pré-ressaut, b) Ressaut de transition, c) Ressaut stable, d) Ressaut agité.

### I.2.2. ÉTUDE DE HAGER ET AL (1990)

Hager *et al.* (1990) ont étudié les caractéristiques du ressaut hydraulique classique. Ces caractéristiques sont essentiellement la hauteur initiale  $h_1$  mesurée au pied du ressaut hydraulique et la hauteur finale  $h_2$  mesurée à la fin du ressaut hydraulique où la profondeur est considérée maximale par rapport à la surface libre. Le rapport  $Y = h_2/h_1$  est défini comme le rapport des hauteurs conjuguées.

Les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique qui sont : la longueur  $L_r$  du rouleau de surface mesurée dans la zone de tourbillon d'eau, et la longueur  $L_j$  du ressaut mesurée entre les hauteurs initiale  $h_1$  et finale  $h_2$  du ressaut.

La figure I.2 montre un ressaut classique évoluant entre ses sections initiale et finale 1 et 2.

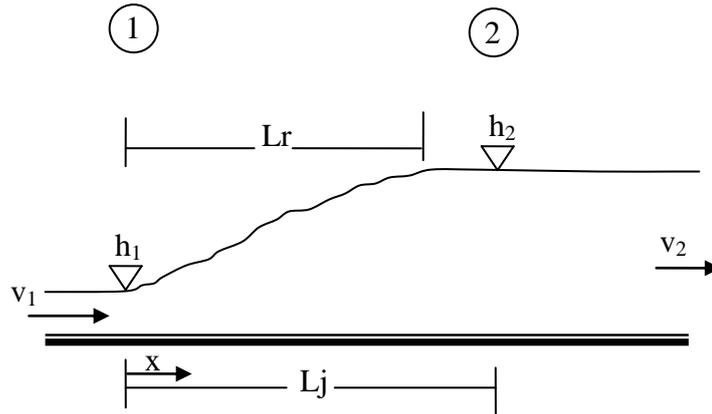


Figure I.2 : Ressaut hydraulique classique.

### I.2.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut

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

L'écoulement à l'amont du ressaut (à l'origine) est caractérisé par une profondeur  $h_1$  et une vitesse moyenne  $V_1$ . L'équation de continuité permet d'écrire :

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

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

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

$$F_1^2 = Q^2 / (g \cdot b^2 \cdot h_1^3) \quad (\text{I.2})$$

La division de l'équation (I.1) par  $\left( \frac{2}{\rho g b h_1^2} \right)$  conduit à la relation suivante :

$$Y^* = \frac{h_2^*}{h_1} = 0,5 \left[ \sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 \right] \quad (\text{I.3})$$

Cette relation (I.3) permet de calculer le rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . Elle est connue sous le nom d'équation de Bélanger.

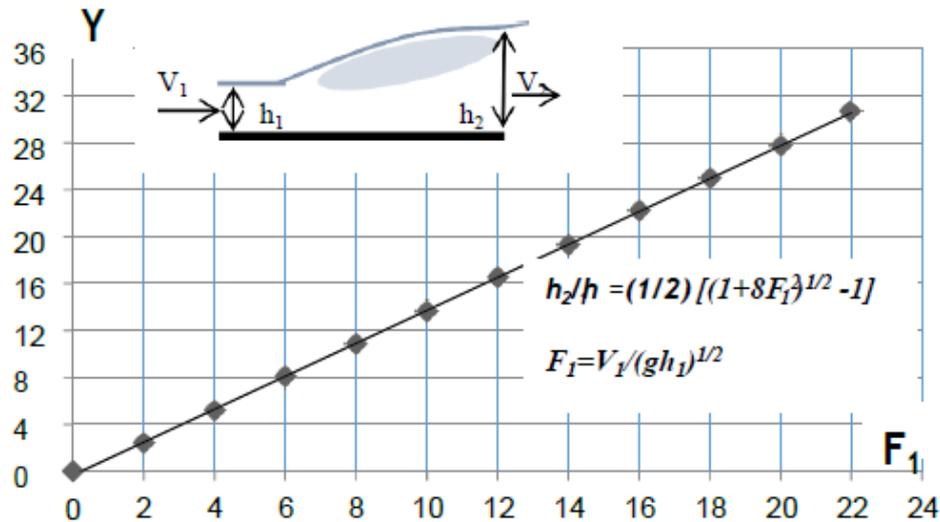


Figure I.3 : Représentation graphique de l'équation de Bélanger(1828)

Pour des valeurs relativement grandes de nombre de Froude  $F_1 > 2$ , Hager et Sinniger (1985) ont développé une relation à partir de l'équation (I.3). Elle peut s'écrire comme suit :

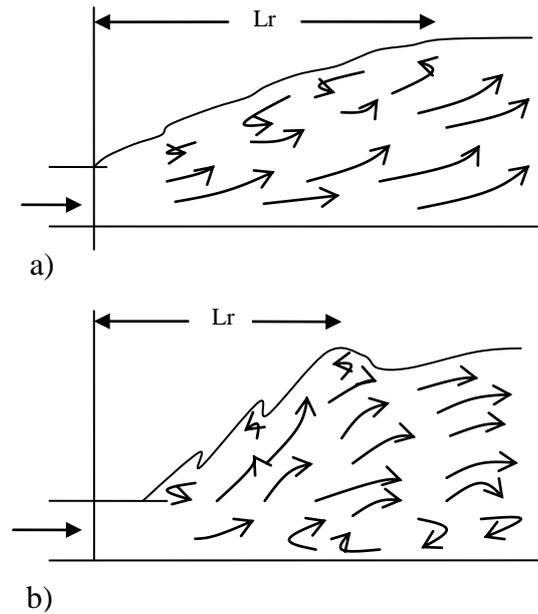
$$Y = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2}F_1 - \frac{1}{2} \quad (\text{I.4})$$

### I.2.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut

Les études ont montré que, parmi les caractéristiques du ressaut hydraulique qui ne peuvent être déterminées que par l'expérience, la longueur  $L_r$  de son rouleau ainsi que la longueur  $L_j$  sur laquelle il s'étend.

#### I.2.2.2.1. Longueur du rouleau

Hager, et al. (1990) ont distingué deux longueurs de rouleau: rouleau développé et non développé selon le type du ressaut étudié, La figure (I.4) montre ces deux types des longueurs de rouleau  $L_r$ .



**Figure I.4 :** ressaut hydraulique avec :  
a) rouleau développé. b) rouleau non développé.

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

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

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

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = -12 + 160 \operatorname{Tgh} \left( \frac{F_1}{20} \right) \quad \text{pour } w = h_1/b < 0,1 \quad (\text{I.5})$$

$$\lambda_r = \frac{L_r}{h_1} = -12 + 160 \operatorname{Tgh} \left( \frac{F_1}{12,5} \right) \quad \text{pour } 0,1 < w < 0,7 \quad (\text{I.6})$$

Tel que, « Tgh » désigne la tangente hyperbolique.

### I.2.2.2.2. Longueur du ressaut

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

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

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

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

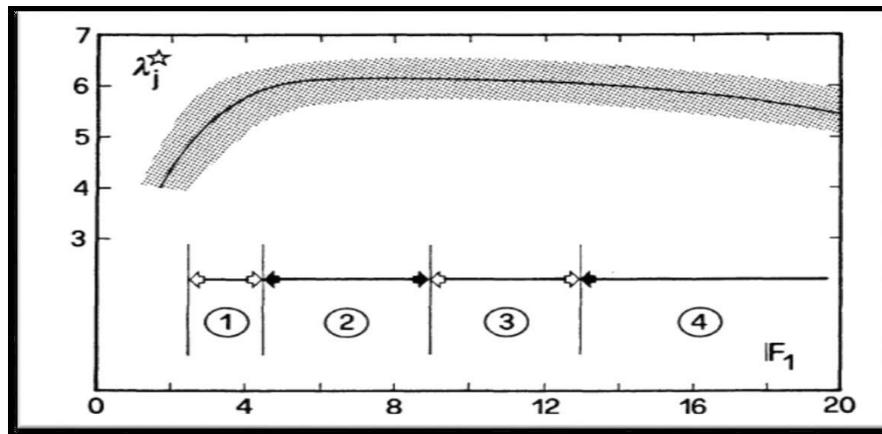
Selon les essais de *Bradley et Peterka (1957)*, *Hager et al. (1990)* ont déterminé une relation permettant d'évaluer la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . Cette relation peut s'écrire comme suit:

$$\frac{L_j}{h_1} = 220 Tgh \left[ \frac{F_1 - 1}{22} \right] \quad (\text{I.7})$$

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

$$L_j = 6 h_2 \quad (\text{I.8})$$

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



**Figure I.5 :** Longueur du ressaut classique  $L_j/h_2$  en fonction de  $F_1$  (Peterka 1958). Domaines du ressaut : ① ressaut de transition, ② ressaut bon, ③ ressaut acceptable, ④ ressaut moins accepté.

### I.2.2.3. Rendement du ressaut

La figure I.6 montre la ligne de charge totale le long de la longueur  $L_j$  sur laquelle s'étend le ressaut classique.

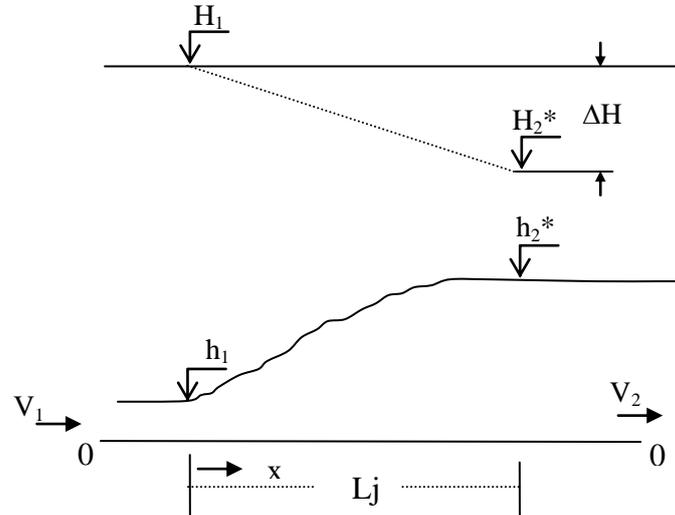


Figure I.6 : (---) Ligne de charge totale le long du ressaut classique

Par l'application du théorème de *Bernoulli* (1738), on peut déterminer la perte d'énergie,  $\Delta H_{12} = H_1 - H_2$  produite par le ressaut en admettant que  $Z_1 = Z_2$  (canal horizontal), (figure I.6), on obtient :

$$\Delta E_{12} = \Delta H_{12} = \left( \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \right) - \left( \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \right) \quad (\text{I.9})$$

D'où : les charges totale dans les sections amont et aval sont respectivement :

$$H_1 = \alpha_1 \frac{v_1^2}{2g} + h_1 \quad (\text{I.10})$$

$$H_2 = \alpha_2 \frac{v_2^2}{2g} + h_2 \quad (\text{I.11})$$

$V_1$  et  $V_2$  désignent respectivement les vitesses moyennes correspondent aux sections amont et aval du ressaut et le facteur de correction de l'énergie cinétique «  $\alpha$  » est admis égal à l'unité.

Puisque l'écoulement est permanent l'équation de la quantité de mouvement donne :

$$Q = V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 \quad (\text{I.12})$$

$$\text{Ou : } A_1 = b \cdot h_1$$

$$A_2 = b \cdot h_2$$

En introduisant la relation (1.12) dans (1.9) on obtient :

$$\Delta H_{12} = (h_1 - h_2) + \left( \frac{1}{h_1^2} - \frac{1}{h_2^2} \right) \left( \frac{q^2}{2g} \right) \quad (\text{I.13})$$

$q = \frac{Q}{b}$ , est le débit unitaire. Son expression peut être déduite de l'expression de la quantité de mouvement définie par la relation (1.1).

$$\frac{q^2}{2g} = \frac{(h_1 h_2^2 + h_1^2 h_2)}{4} \quad (\text{I.14})$$

En remplaçant la relation (I.14) dans (I.13) on obtient :

$$\Delta H_{12} = \frac{(h_2 - h_1)^3}{(4h_2 h_1)} \quad (\text{I.15})$$

La capacité de dissipation du ressaut est représentée par  $\eta$  :

$$\eta = \frac{\Delta H_{12}}{H_1} = \frac{(H_1 - H_2)}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} \quad (\text{I.16})$$

Le rapport  $\frac{H_2}{H_1}$  désigne l'efficacité du ressaut. Les relations (1.10) et (1.11) sont utilisées pour déterminer les charges totales dans les sections amont et aval. Tout en tenant compte de la relation (1.5) du nombre de *Froude* on obtiendra :

$$H_1 = h_1 \left( 1 + \frac{F_1^2}{2} \right) \quad (\text{I.17})$$

$$H_2 = h_1 \left( Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right) \quad (\text{I.18})$$

Où  $Y$  est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique défini par la relation (I.3) de *Bélanger (1828)*.

En remplaçant les relations (I.17) et (I.18) dans l'expression du rendement du ressaut (I.16) on obtiendra :

$$\eta = 1 - \left[ \left( Y + \frac{F_1^2}{2Y^2} \right) / \left( 1 + \frac{F_1^2}{2} \right) \right] \quad (\text{I.19})$$

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

$$\eta = \left[ 1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1} \right]^2 \quad (\text{I.20})$$

L'équation (I.20) indique une petite efficacité pour les ressauts avec  $F_1 < 3$ . Pour  $F_1 > 5$ , plus de 50% d'énergie peut être dissipée.

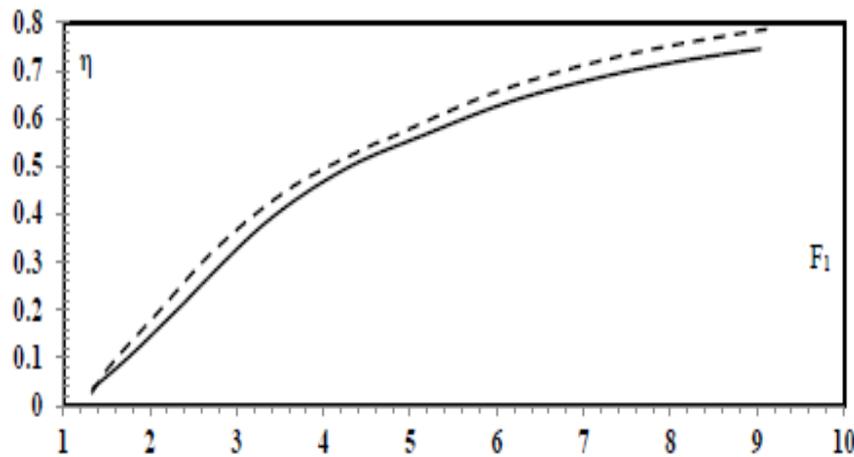


Figure I.7 : Rendement  $\eta$  du ressaut classique en fonction du nombre de Froude  $F_1$  (—) Courbe tracée selon la relation (1.19), (---) courbe tracée Selon la relation (1.20)

D'après l'analyse de la courbe  $\eta = f(F_1)$  nous constatons que les rendements obtenus par l'application de la relation exacte (1.19) sont légèrement inférieurs à ceux calculés par la relation (1.20) d'autre part; l'écart maximum observé peut atteindre les 2 %.

### I.2.3. ETUDE DE HAGER (1992)

Hager (1992) a développé une formule permettant de présenter le profil de surface libre pour un ressaut hydraulique classique. Le développement de cette formule a été basé sur des données des essais expérimentaux réalisés par Hager et d'autres auteurs. Cette approche tient compte de la longueur de rouleau et est basée sur la formule (1.5) présentée précédemment.

#### I.2.3.1. Procédure expérimentale

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

### I.2.3.2. Analyse des données

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

$$X = \frac{x}{L_r} \quad , \quad y = \frac{h - h_1}{h_2 - h_1} \quad (\text{I.21})$$

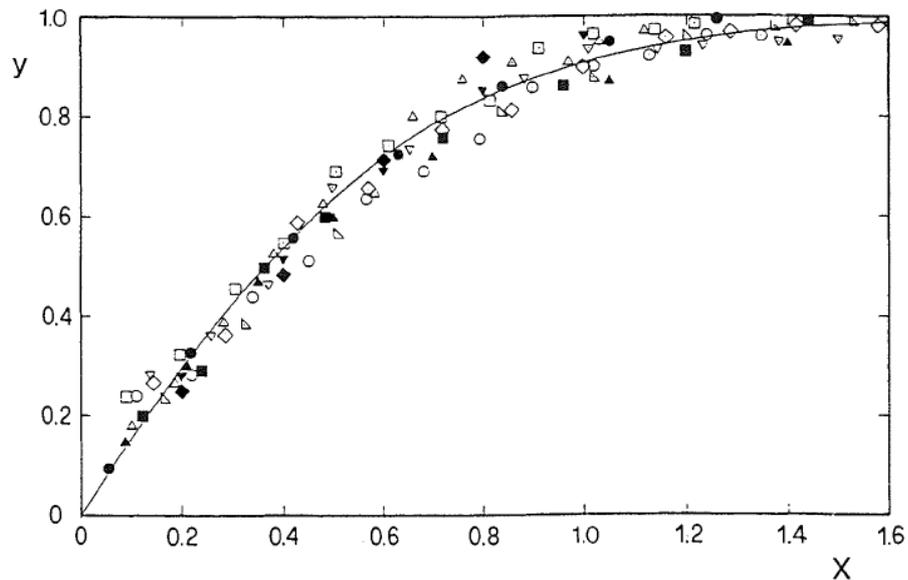
Où  $x$  est la coordonnée horizontale qui prend pour origine le pied du ressaut.

Le profil de surface libre du ressaut hydraulique classique est présenté dans la figure (I.8), selon l'équation (I.21).

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

$$y = \text{tgh}(1,5.X) \quad (\text{I.22})$$

La figure (I.8) montre que les données présentées pour les nombres de Froude donnent un raisonnable accord avec l'équation (I.22).



**Figure I.8.** Données expérimentales de *Bakhmeteff et Matzke (1936)*;  $F_1 = 1,99$  ( $\blacktriangle$ );  $2,92$  ( $\blacksquare$ );  $4,10$  ( $\bullet$ );  $5,52$  ( $\blacktriangledown$ ) et  $8,64$  ( $\blacklozenge$ ); et pour *Schröder (1963)*;  $F_1 = 3,85$  ( $\triangle$ );  $4,25$  ( $\square$ );  $4,8$  ( $\circ$ );  $5,41$  ( $\nabla$ ) et  $6,06$  ( $\diamond$ ); (—) équation (I.22) selon (*Hager 1992*).

La relation (I.22) peut s'écrire sous la forme suivante :

$$\frac{h - h_1}{h_2 - h_1} = \tan gh \left( 1,5 \frac{x}{L_r} \right) \quad (\text{I.23})$$

La comparaison des données de *Bakhmeteff et Matzke (1936)*, de *Schröder (1963)* avec l'équation (I.23), présentée dans La figure (I.8) montre un accord global entre les données et l'équation (I.23).

La relation (I.23) développée par *Hager* nous permet de tracer le profil de surface libre d'un ressaut hydraulique classique, Le profil de surface obtenu à partir de cette équation correspond bien aux données expérimentales pour un intervalle des nombres de Froude entre 2 et 10. L'équation (I.23) peut être considérée comme un profil de ressaut classique universel.

### I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL MINCE

#### I.3.1. APPROCHE DE FORSTER ET SKRINDE (1950)

En admettant une répartition hydrostatique des pressions et une distribution uniforme des vitesses dans les sections de part et d'autre du ressaut, *Forster et Skrinde (1950)*, ont trouvé un diagramme, qui lie les trois paramètres adimensionnels suivants :

1. le nombre de Froude  $IF_1$  de l'écoulement incident ;
2. la position relative du seuil  $x / h_2$  ;
3. la hauteur relative du seuil  $s / h_1$ .

L'étude de *Forster et Skrinde (1950)* vise à analyser expérimentalement la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $IF_1$  de l'écoulement incident, pour des valeurs données de la position  $x/h_2$  du seuil.

Pour chaque essai effectué, le rapport  $x / h_2$  est maintenu constant tout en assurant la formation complète du ressaut. La longueur du bassin amortisseur est à la limite égale à la position  $x$  du seuil comptée à partir du début du ressaut (figure I.9).

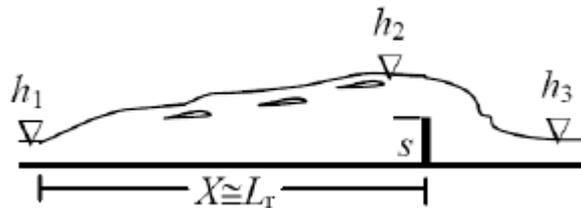
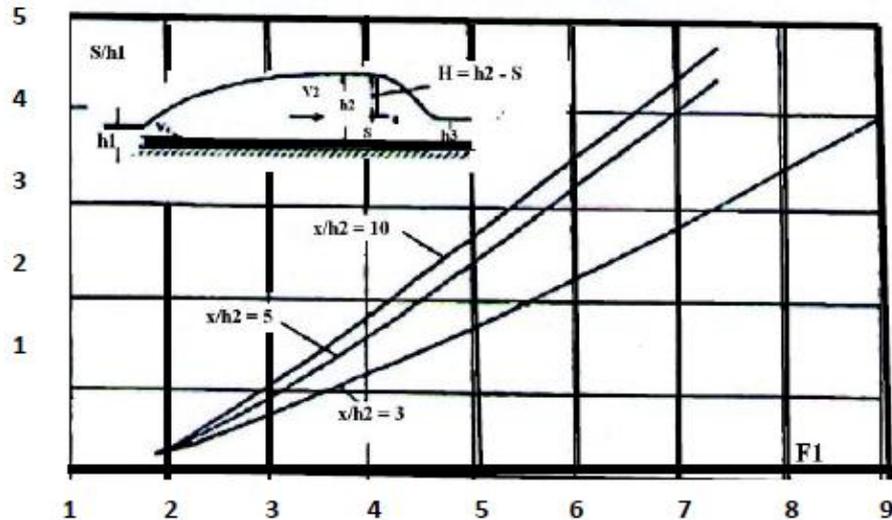


Figure I.9: ressaut contrôlé par seuil mince

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

$$h_3 < h_2 - 0,75.s \quad (I.24)$$

La Figure 1.10 montre la variation expérimentale de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour les valeurs de la position relative  $x/h_2$  du seuil testé ( $x/h_2 = 3 ; 5$  et  $10$ ).



**Figure I.10:** Variation expérimentale du nombre de Froude  $F_1$  en fonction de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil à paroi mince pour quelques valeurs de  $x/h_2$ , selon Forster et Skrinde (1950).

Trois courbes sont alors obtenues. Chaque courbe correspond à une valeur de  $x/h_2$  bien déterminée. On peut remarquer que pour toute la gamme des valeurs du nombre de Froude  $F_1$  testés, les courbes expérimentales obtenues se rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que  $x/h_2$  augmente. Certainement les courbes correspondant à  $x/h_2$  compris entre 5 et 10, ce qui signifie que la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil ne subit pas de grandes variations. En pratique, on considère que la position relative  $x/h_2$  du seuil est approximativement égale à 6.

Le diagramme de la figure I.10 représente la méthode approuvée pour le dimensionnement des bassins d'amortissement contrôlé par seuil à paroi mince. Tous ces considérations ont incité Achour *et al* (2002) qui ont mené une étude expérimentale dans le but de compléter les essais de Forster et Skrinde (1950), et ainsi de définir une relation explicite  $f(F_1, S, x/h_2) = 0$ .

### I.3.2. ETUDE DE ACHOUR ET AL (2002)

#### I.3.2.1. Essais pour $X \approx Lr$

La première configuration de Achour *et al* (2002) répond aux conditions expérimentales de Forster et Skrinde (1950) ( $X = Lr$ ).

La hauteur géométrique « s » du seuil ainsi que sa position « x » sont choisies de telle sorte que le rapport  $x/h_2$  prenne des valeurs comprises entre 3 et 10 ; les essais sont exécutés avec un pas de variation  $\Delta (x/h_2) \cong 0,5$ .

L'expérimentation a montré que la relation qui lie la hauteur relative  $S=s/h_1$  du seuil au nombre de Froude  $F_1$  est de type puissance :

$$S = C_0 (F_1 - 1)^\beta \quad (\text{I.25})$$

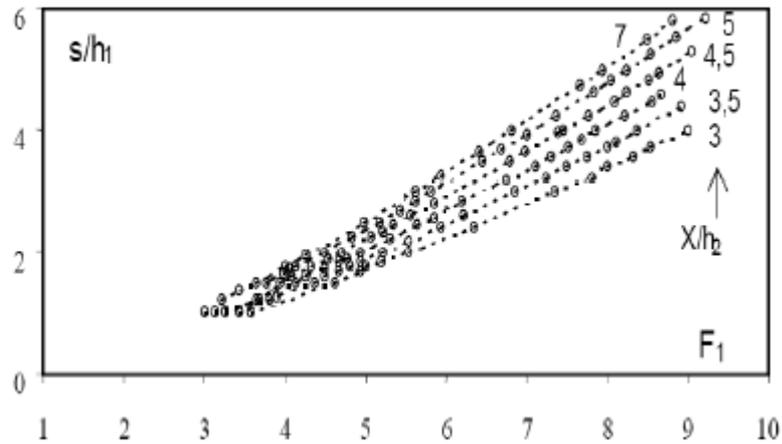


Figure 1.11 : Variation expérimentale de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour quelques valeurs de  $x/h_2$ .

Le résultat principal obtenu montre que l'exposant  $\beta$  figurant dans la relation (I.25) prend une valeur quasi constante d'environ  $5/4$  pour toute la gamme  $3 \leq X/h_2 \leq 10$ ; En revanche, le paramètre  $C_0$  varie en fonction de la position relative  $X/h_2$  du seuil par la relation expérimentale  $C_0 = \psi (X/h_2)$ .

La figure (I.12), montre que la courbe de variation  $C_0 = \psi (X/h_2)$  peut être assimilée à deux tronçons de droites  $D_1$  et  $D_2$  sur l'ensemble de l'intervalle  $3 \leq X/h_2 \leq 10$ .

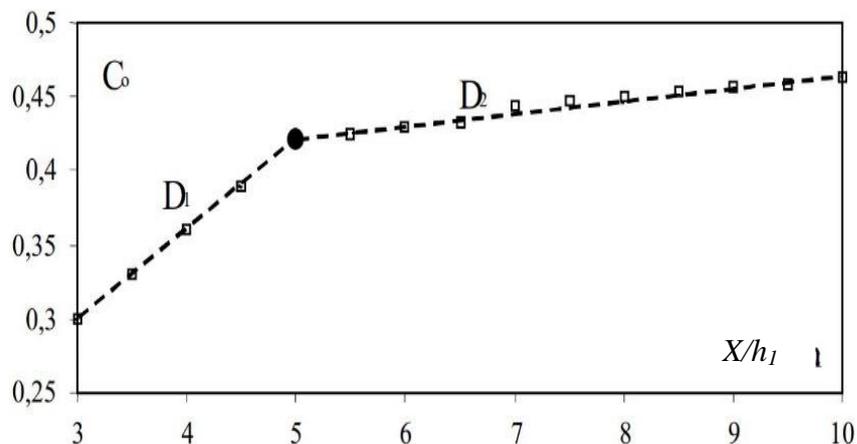


Figure 1.12: Variation expérimentale de  $C_0$  en fonction de la position relative  $X/h_2$  du seuil à paroi mince.

Une analyse complémentaire a permis d'écrire :

$$S = 0,0604(x/h_2) + 0,1186(F_1 - 1)^{1,25} \quad \text{Pour } 3 \leq x/h_2 \leq 5. \quad (\text{I.26})$$

$$S = 0,0086(x/h_2) + 0,379(F_1 - 1)^{1,25} \quad \text{Pour } 5 \leq x/h_2 \leq 10. \quad (\text{I.27})$$

### I.3.2.2. Essais pour $X \cong L_j$

Dans cette partie le seuil à paroi mince est placé à une distance  $X$  environ égale à la longueur  $L_j$  du ressaut (figure I.13).

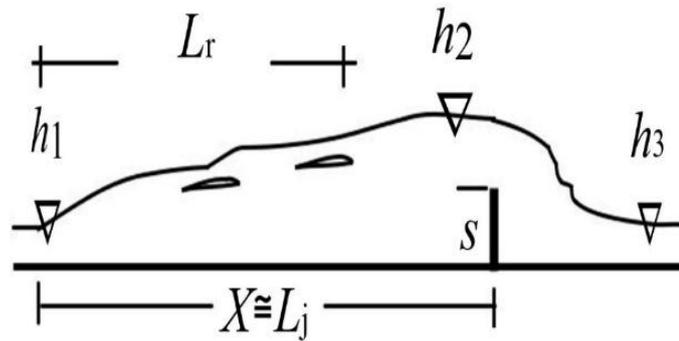


Figure I.13 : Contrôle du ressaut par un seuil à paroi mince pour  $X \cong L_j$

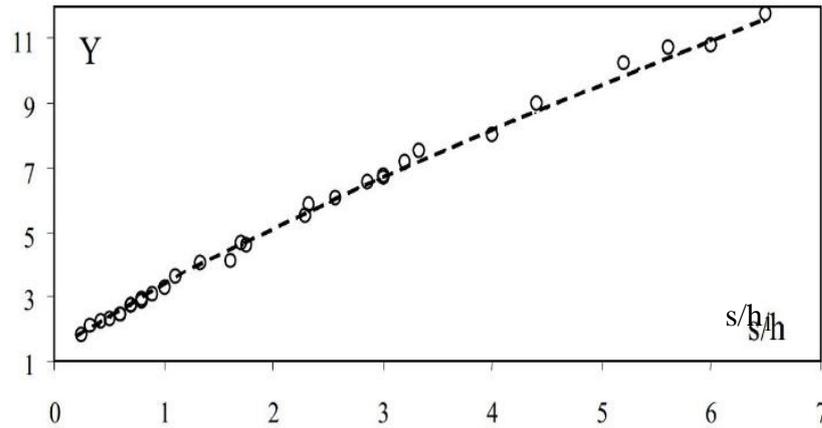
Dans la gamme de valeurs  $3 \leq F_1 \leq 9$ , aucun effet de frottement n'a été montré et le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées peut donc être évalué par application de la relation:

$$Y = \frac{1}{2} \left[ (1 + 8F_1^2)^{1/2} - 1 \right] \quad (\text{I.28})$$

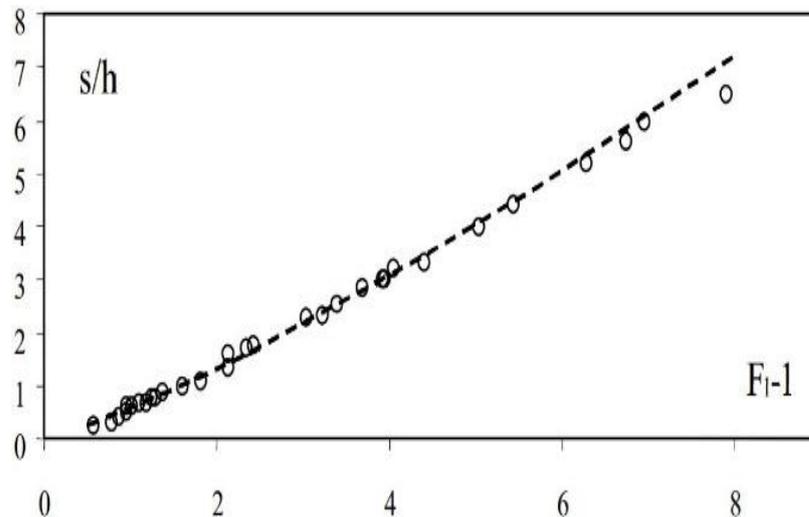
Au début, le but de cette étude est de déterminer expérimentalement la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil nécessaire à la formation du ressaut comme il est représenté sur la figure I.13 et pour la gamme pratique ci-dessus indiquée de  $F_1$ . Les figures I.14 et I.15 montrant respectivement la variation de  $\xi (Y, s/h_1) = 0$  et  $\zeta (F_1, s/h_1) = 0$ . Ainsi, des courbes uniques sont obtenues et un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis de corrélérer avec une excellente approximation les paramètres  $Y$ ,  $s/h_1$  et  $F_1$  :

$$Y = 2,37 (s/h_1)^{0,8} + 1, \quad R^2 = 0,996 \quad (\text{I.29})$$

$$s/h_1 = 0,562 (F_1 - 1)^{1,225}, \quad R^2 = 0,993 \quad (\text{I.30})$$



**Figure I.14 :** Variation expérimentale du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil à paroi mince ( $X \cong L_j$ )  
(- - -) courbe tracée selon la relation (I.29).



**Figure I.15 :** Variation expérimentale de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident ( $X \cong L_j$ ).  
(- - -) courbe tracée selon la relation (I.30).

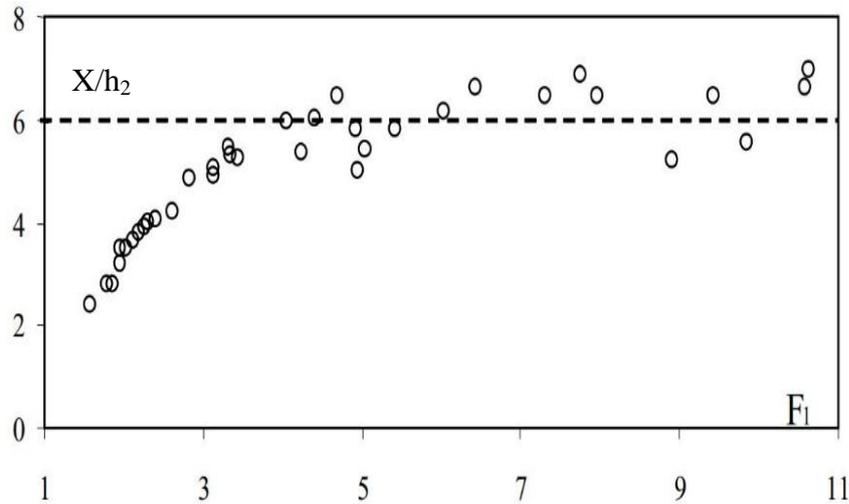
L'étude s'est enfin intéressée à l'évaluation de la position  $X$  du seuil nécessaire à la formation complète du ressaut. Lorsque le seuil est placé à une distance  $X = L_j$ , le ressaut peut être considéré comme un ressaut classique caractérisé par un rapport  $X/h_2$  environ égal à 6 (Peterka, 1983). Cette tendance semble être confirmée par les mesures expérimentales représentées graphiquement sur la figure (I.16), notamment pour les valeurs élevées du nombre de Froude incident  $F_1$ .

La figure (I.16) indique que la position relative  $X/h_2$  du seuil est indépendante de  $F$  ( $F_1 > 3$ ). A ces valeurs élevées de  $F_1$ , la perturbation de la surface libre rend la pression de la mesure limnimétrique de la profondeur  $h_2$  très difficile ( $\Delta h_2 = \pm 1,5$  cm).

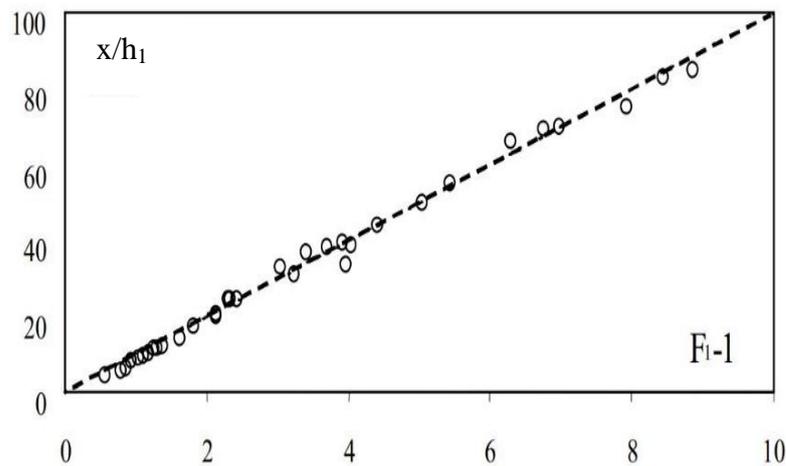
Les mesures expérimentales obtenues se traduisent alors par un nuage de points réparti toutefois autour de la valeur moyenne  $X/h_2 = 6$ . La figure (I.16) montre la variation expérimentale de la fonction  $\varphi(F_1, X/h_1) = 0$  le nombre de Froude  $F_1$  est lié à la hauteur

relative  $S = s/h_1$  par la relation (I.30). Un ajustement basé sur la méthode des moindres carrés a permis d'écrire :

$$X / h_1 = 10 (F_1 - 1) \quad , R^2 = 0,995 \quad (I.31)$$



**Figure I.16 :** Variation expérimentale de la position relative  $X/h_2$  du seuil à paroi mince en fonction du nombre de Froude incident  $F_1$  lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ( $X \cong L_j$ ).



**Figure I.17:** Variation expérimentale de la position relative  $X/h_1$  du seuil à paroi mince en fonction de  $(F_1 - 1)$  lors du contrôle du ressaut dans un canal rectangulaire ( $X \cong L_j$ ).  
(- - -) courbe tracée selon la relation (I.31).

## I.4. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLÉ PAR SEUIL EPAIS

### I.4.1. APPROCHE DE FORSTER et SKRINDE (1950)

Le seuil est considéré comme épais lorsque le profil liquide s'y écoulant est presque parallèle au fond, pour peu que la longueur  $L$  du seuil soit suffisante (figure I.18). La notion de seuil épais est également liée aux caractéristiques de l'écoulement et suivant la classification de *Rao et Murlidhar (1963)*, le seuil est considéré comme étant épais lorsque :

$$0,1 \text{ (m)} \leq (h_2 - s) \leq 0,35 \text{ (m)} \quad (\text{I.32})$$

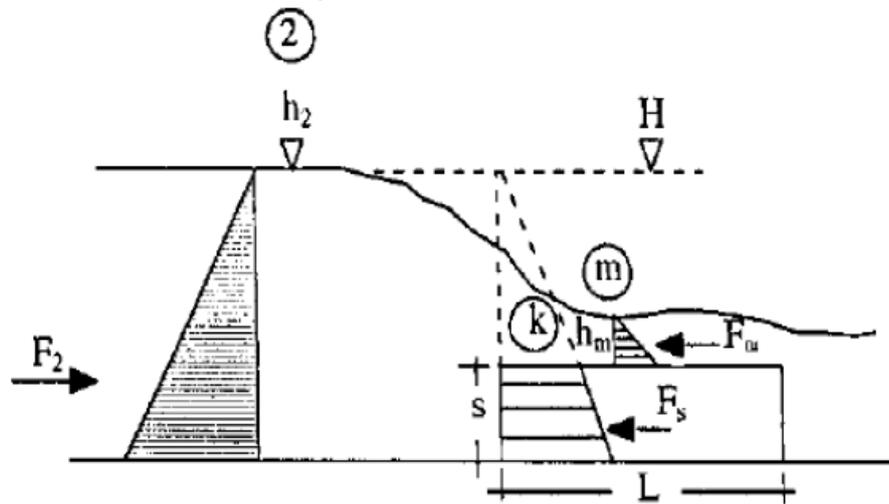


Figure I.18 : Écoulement franchissant un seuil épais continu de hauteur  $s$  et de longueur  $L$ .

Les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions.

Dans la section 2, l'écoulement est en régime fluvial de profondeur  $h_2$ . Le seuil est ensuite franchi par un écoulement en régime critique de profondeur  $k$ , suivi d'une tranche en régime torrentielle dont la profondeur finale  $h_m$  est minimale (section m).

L'étude théorique basée sur l'équation de la quantité de mouvement, appliquée entre la section initiale du ressaut et la section au droit du seuil, a abouti à une relation fortement implicite liant la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil et le nombre de Froude  $F_1$  (relation I.33). Le paramètre  $x/h_2$  n'a ainsi théoriquement aucune influence sur le contrôle du ressaut.

$$\frac{21,33 F_1^2}{\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1} = \frac{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 - 2s/h_1\right)^3}{\left(\sqrt{1 + 8F_1^2} - 1 + 2s/h_1\right)} \quad (\text{I.33})$$

Contrairement au cas du seuil à paroi mince, une seule courbe est obtenue (figure I.19) traduisant la variation de  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . Cette courbe peut être utilisée à condition que :  $h_3 < (2.h_2 + s)/3$

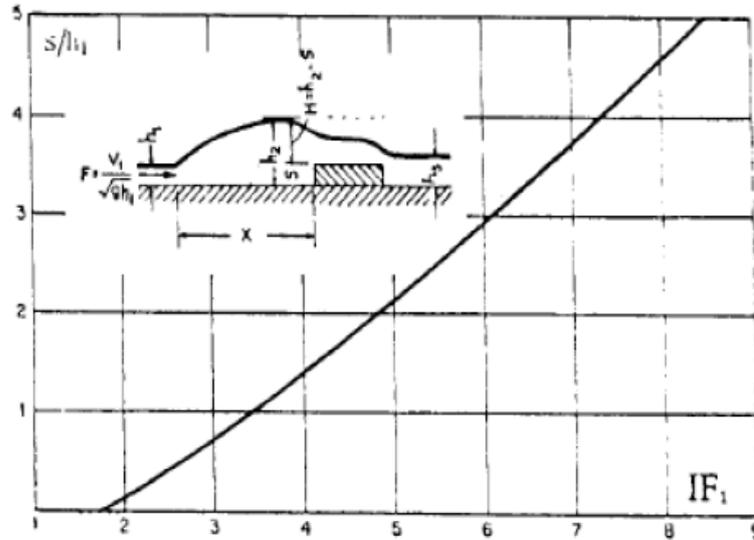


Figure I.19 : Variation expérimentale du nombre de Froude  $IF_1$  en fonction de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil à paroi épaisse, selon Forster et Skrinde (1950). Courbe tracée selon la relation (I.33).

## I.4.2. APPROCHE DE ACHOUR ET AL (2002)

### I.4.2.1. Configuration avec vanne de fond

La configuration de base permettant l'analyse de Achour (1997) est représentée à la figure I.20, montrant un ressaut à l'aval d'une vanne de fond suivie d'un seuil à paroi épaisse de hauteur  $s$  et franchie par un écoulement en régime critique de profondeur  $k$ .

Les charges totales dans les sections initiale et finale du ressaut sont respectivement (en considérant le facteur de correction de l'énergie cinétique) égales à l'unité :

$$H_1 = h_1 + v_1^2 / (2g) \quad (\text{I.34})$$

$$H_2 = h_2 + v_2^2 / (2g) \quad (\text{I.35})$$

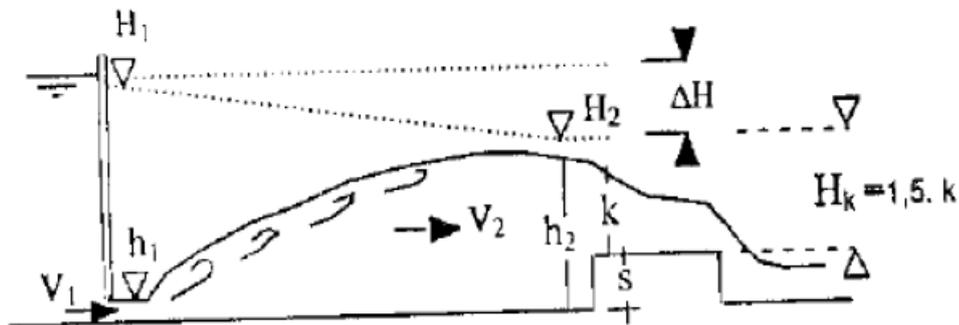


Figure I.20 : Ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse à l'aval d'une vanne de fond, selon Achour (1998).

La figure I.20 permet d'écrire que :

$$H_2 = s + 1,5k \quad (\text{I.36})$$

La perte de charge  $\Delta H$  due au ressaut est égale à la différence des charges  $H_1$  et  $H_2$  :

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad (\text{I.37})$$

La combinaison des relations (I.36) et (I.37) donne :

$$\Delta H = H_1 - (s + 1,5 k) \quad (\text{I.38})$$

En introduisant les paramètres adimensionnels  $\delta = \Delta H/k$ ,  $\Phi_1 = H_1/k$  et  $h = h_1/k$  la relation (I.38) s'écrit :

$$s/h_1 = \frac{\phi_1 - \delta - 3/2}{h_1} \quad (\text{I.39})$$

Le paramètre adimensionnel  $h_1$  est identique au paramètre  $\phi$  défini par *Lapray (1967)* par l'expression suivante :

$$\phi_2 = \left[ \phi_1^2/4 + 2/\phi_1 \right]^{1/2} - \phi_1/2 \quad (\text{I.40})$$

La variation de  $\Phi_1$ , liée à la charge totale  $H_1$  peut aisément s'écrire :

$$\phi_1 = \phi_1 + 1/(2/\phi_1) \quad (\text{I.41})$$

De même, la variation adimensionnelle  $\delta$  est liée à la perte de charge  $\Delta H$  due au ressaut défini par (I.15) :

$$k.\delta = \Delta H = (h_2 - h_1)^3 / (4h_2 h_1) \quad (\text{I.15})$$

Cette dernière relation s'écrit en fonction des paramètres  $\phi_1$  et  $\phi_2$  :

$$\delta = \frac{(\phi_2 - \phi_1)^3}{4\phi_1 \cdot \phi_2} \quad (\text{I.42})$$

Ainsi, en tenant compte des relations (I.40), (I.41) et (I.42), on peut énoncer que la hauteur  $s/h_1$  du seuil définie par (I.39) ne dépend que des paramètres  $\phi_2/\phi_1$ . Il est donc possible d'exprimer la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction de  $Y$  et de  $F_1$ .

$$F_1^2 = Q^2 / (g.b^2.h_1^3) = k^3/h_1^3 = \phi_1^{-3}$$

$$\text{Soit } \phi_1 = F_1^{-3/2} \quad (\text{I.43})$$

La variable  $\phi_2$ , liée à la charge totale finale  $H_2$  à l'aval du ressaut, s'écrit comme pour le cas de  $\phi_1$  :

$$\phi_2 = \phi_1 + 1/(2.\phi_1^2) \quad (\text{I.44})$$

$$\phi_1 = Y.\phi_1 + 1/(2.Y^2.\phi_1^2) \quad (\text{I.45})$$

En tenant compte des variables  $\phi_1$  et  $\phi_2$ , la perte de charge relative  $\delta$  due au ressaut s'écrit :

$$\delta = \phi_1 - \phi_2 \quad (\text{I.46})$$

La relation (I.39) devient alors :

$$s/h_1 = (\phi_2 - 1,5) / \phi_1 \quad (\text{I.47})$$

La combinaison des relations (I.43), (I.45) et (I.47) permet d'exprimer la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut :

$$s/h_1 = Y + \frac{1}{2} \left( \frac{F_1}{Y} \right)^2 - \frac{3}{2} F_1^{2/3} \quad (\text{I.48})$$

Cette relation présente trois paramètres adimensionnels :  $s/h_1$ ,  $F_1$  et  $Y$ ; les deux derniers étant liés entre eux par l'équation de *Belanger (1928)*:

$$Y = h_2/h_1 = 0,5 \cdot [(1 + 8 \cdot F_1^2)^{1/2} - 1] \quad (\text{I.3})$$

Les relations (I.48) et (I.3) montrent que la hauteur relative  $s/h_1$  n'est fonction que d'une seule variable,  $Y$  ou  $F_1$ .

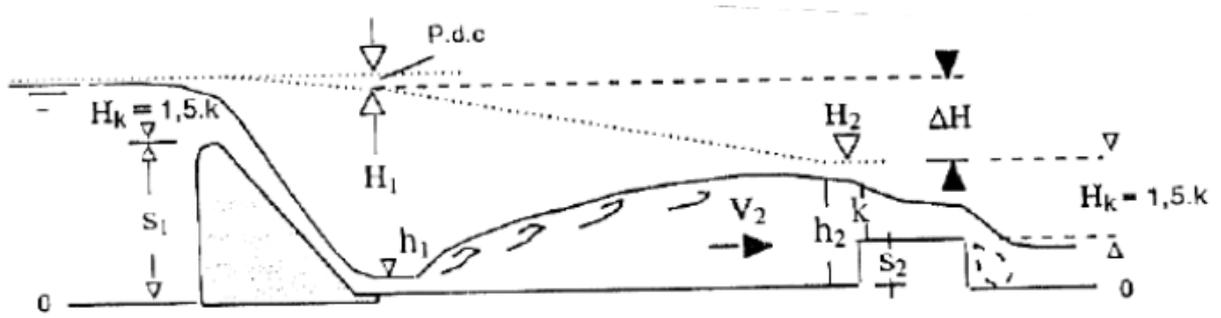
Pour la valeur de  $F_1 = 1$ , représentant la condition d'un écoulement critique, la relation (I.3) indique que  $Y = 1$ . Par la suite, en vertu de (I.48), la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil est nulle.

La relation (I.48) proposée par *Achour* tient compte de la hauteur capable de la vitesse à l'aval du ressaut. Cette démarche paraît être plus rigoureuse que celle entreprise par *Forster et Skrinde (1950)* pour le cas d'un seuil à paroi épaisse. En outre, la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil épais peut être ainsi déterminée de manière explicite, contrairement à la relation (I.33) établie par *Forster et Skrinde (1950)*.

#### I.4.2.2. Configuration avec déversoir standard

Une autre configuration du ressaut prenant naissance au pied aval d'un obstacle tel qu'un déversoir standard (figure I.21), a également fait l'objet d'une étude proposée par *Achour (1997)*.

L'écoulement à l'amont du seuil  $S_1$  est en régime fluvial et torrentiel sur le parement aval. Le passage de l'écoulement fluvial à l'écoulement torrentiel se traduit par l'application d'une section de contrôle (ou section critique) au droit même du seuil.



**Figure I.21:** Ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse à l'aval d'un déversoir standard. P.d.c : pertes de charge sur le parement aval du déversoir.

La mise en place à l'aval de l'écoulement d'un second seuil (mince ou épais) de hauteur  $s_2$  provoque l'apparition d'un ressaut. Le seuil de hauteur  $s_2$  est à son tour franchi par un écoulement critique, comme pour le cas de la configuration avec vanne de fond.

En négligeant toutes les pertes de charges autres que celles dues au ressaut, la figure I.21 permet alors d'écrire que :

$$H_1 = s_1 + 1,5.k$$

$$H_2 = s_2 + 1,5.k \quad (\text{I.49})$$

$$\text{Soit : } H_1 - H_2 = s_1 - s_2 = \Delta H$$

Ainsi, la perte de charge due au ressaut s'exprime par la différence des hauteurs des seuils  $s_1$  et  $s_2$ . Le système d'équations (I.49) peut aisément s'écrire sous la forme adimensionnelle

$$s_1 = (\phi_1 - 1,5).k \quad (1)$$

$$s_2 = (\phi_2 - 1,5).k \quad (2) \quad (\text{I.50})$$

et par suite :

$$\delta = (\phi_1 - \phi_2) = (s_1 - s_2) / k \quad (3)$$

$\delta$ ,  $\phi_1$  et  $\phi_2$  sont des paramètres identiques à ceux utilisés lors de l'étude du ressaut contrôlé par seuil en présence d'une vanne de fond. La combinaison des relations (I.50)<sub>1</sub>, (I.50)<sub>2</sub> et (I.50)<sub>3</sub> permet d'écrire :

$$1 - \frac{s_2}{s_1} = \frac{\delta}{\phi_1 - 1,5} \quad (\text{I.51})$$

$$\text{avec } \delta = \Delta H/k \text{ et } \phi_1 = H_1/k$$

Comme il a été montré,  $\delta$  et  $\Phi$  ne dépendent que de la variable  $\phi = h_1/k$  et le paramètre adimensionnel  $S = (1 - s_2/s_1)$ , lié à la hauteur géométrique des seuils situés à l'amont et à l'aval du ressaut, l'est donc aussi. Pour que le ressaut puisse se former, il est nécessaire que  $s_2$  soit strictement inférieur à  $s_1$  et l'on peut écrire alors que :

$$0 < S < 1 \quad (\text{I.52})$$

La relation (I.52) sert à évaluer la hauteur  $s_2$  nécessaire à la formation du ressaut dans la position indiquée sur la figure I.20. Les paramètres connus du problème sont :

$Q$  le débit volume évacué par l'ouvrage,  $b$  la largeur du canal rectangulaire,  $h_1$  la hauteur initiale du ressaut et  $s_1$  la hauteur du déversoir standard.

Les trois premiers paramètres ci-dessus indiqués permettent le calcul de la variable  $\phi_1$ , lié au nombre de Froude  $F_1$  caractérisant l'écoulement à l'amont du ressaut par la relation (I.43).

A partir de la valeur calculée de  $\phi_1$ , l'application successive des équations (I.40), (I.43) et (I.46) donne le paramètre adimensionnel  $S$  et par suite la valeur recherchée de la hauteur  $s_2$  nécessaire à la formation du ressaut.

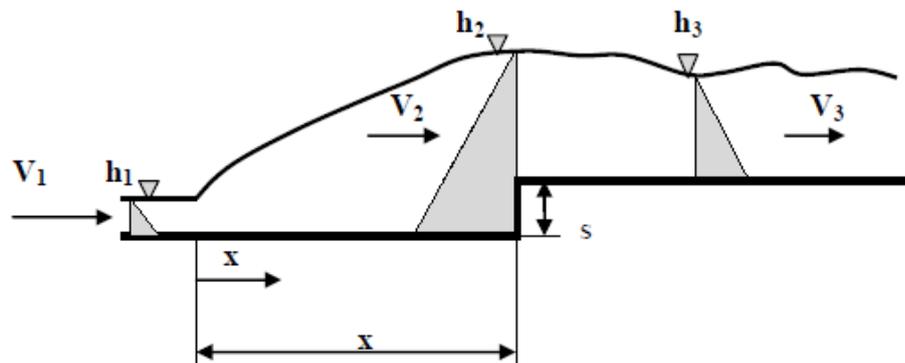
La relation (I.51) est cependant fortement implicite et une relation approchée est proposée (relation I.53) dans laquelle  $S$  est fonction des hauteurs géométriques du déversoir standard et du seuil ainsi que la hauteur relative  $\phi_1$

$$S^{9/8} + \phi_1^{9/8} = 1 \text{ avec } S = 1 - s_2 / s_1 \quad (\text{I.53})$$

## I.5. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR MARCHE POSITIVE

### I.5.1. APPROCHE DE FORSTER et SKRINDE (1950)

La figure (I.22) montre un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive de hauteur «  $s$  » franchi par un écoulement de profondeur  $h_3$ .



**Figure (I.22):** Ressaut forcé par marche positive de hauteur ' $s$ ', les parties hachurées correspondent à la répartition supposée hydrostatique des pressions

Forster et Skrinde (1950), ont prouvé expérimentalement qu'il existe une relation entre le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, et la hauteur relative  $h_3/h_1$ , pour des différentes valeurs de la hauteur relative  $s/h_1$  de la marche positive et pour  $x=5(s+h_3)$ .

A cet effet, les auteurs ont élaboré un diagramme (figure (I.23)) qui permet de déterminer les paramètres caractéristiques du bassin d'amortissement tels que : la longueur et la hauteur du

bassin ainsi que la hauteur minimale de la marche positive nécessaire à la formation du ressaut.

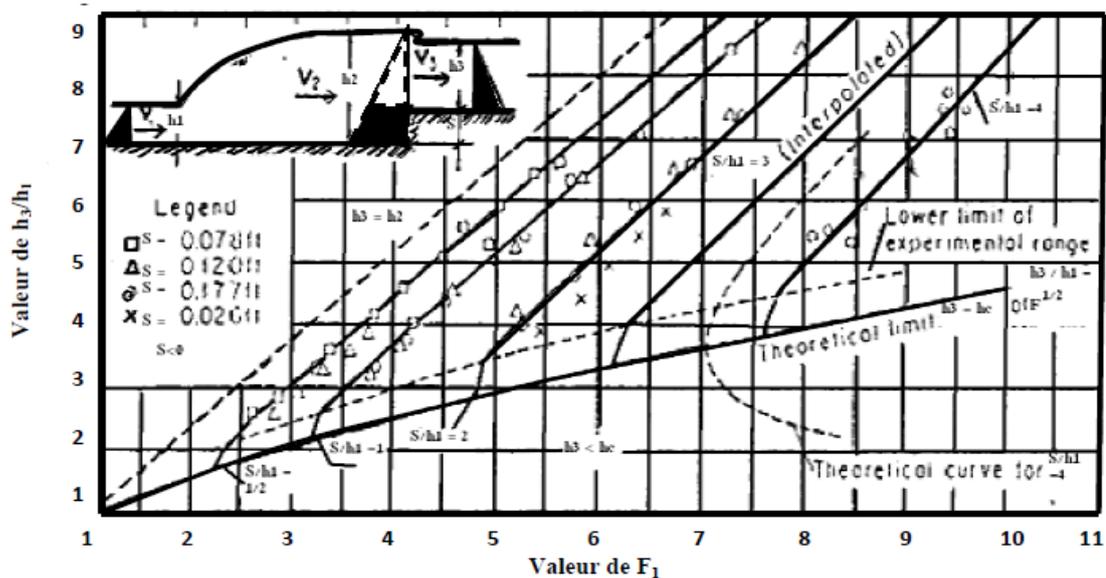


Figure (I.23): Variation du nombre de Froude  $F_1$ , en fonction de  $h_3/h_1$  et de la hauteur relative  $s/h_1$  de la marche positive, selon Forster et Skrinde (1950)

## I.6. Conclusion :

Ce premier chapitre a pour but de faire découvrir les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut hydraulique évoluent en canal rectangulaire de pente nulle, quatre types de ressaut ont été présentés :

✓ Le ressaut hydraulique classique, où nous avons abordé les travaux de *Bradley et Peterka (1957)* concernant la forme du ressaut et ceux de *Hager (1990)* relatifs aux caractéristiques du ressaut classique. Ces caractéristiques sont : ses hauteurs initiale et finale, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau et le rendement.

Nous avons remarqué que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement. Afin de définir la relation reliant le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude  $F_1$ . *Bélanger (1828)*, a fait la première démarche pour déterminer cette relation, par l'application du théorème d'Euler, entre les deux sections du ressaut. Par la suite, *Hager (1992)* a développé une formule permettant de présenter le profil de surface libre pour un ressaut hydraulique classique.

✓ le ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, où nous avons présenté les travaux de *Forster et Skrinde (1950)*. Les auteurs ont défini la variation de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour des valeurs données de  $x/h_2$ , dont trois courbes ont été établies expérimentalement. Ils ont constaté que les trois courbes se

rapprochent les unes des autres au fur et à mesure que  $x/h_2$  augmente. Par la suite, *Achour et al (2002)* ont conduit une étude expérimentale dans le but de compléter les essais de *Forster et Skrinde (1950)*, Deux configurations du ressaut sont considérées. La première configuration répond aux conditions expérimentales de *Forster et Skrinde (1950)* ( $X = L_r$ ). Ils ont défini la variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour un grand nombre de valeurs de  $X/h_2$ . La deuxième configuration correspond à un ressaut contrôlé dont la longueur  $L_j$  coïncide avec la position  $X$  du seuil. L'analyse des mesures expérimentales a permis aux auteurs de corréler de manière plus significative la position relative  $X/h_1$  du seuil au nombre de Froude incident  $F_1$ .

✓ Le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi épaisse, où nous avons examiné les travaux de *Forster et Skrinde (1950)*, qui ont montré que l'application de l'équation de quantité de mouvement est possible entre les sections initiale et finale du ressaut et la section au droit du seuil pour laquelle la hauteur de l'écoulement est minimale. Les auteurs proposent une relation analytique implicite qui lie la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil au nombre de Froude  $IF_1$ ; Contrairement au cas du seuil mince, une seule courbe est alors obtenue.

L'étude du ressaut contrôlé par un seuil à paroi épaisse franchi par un écoulement en régime critique a été également effectuée par *Achour (2002)*. Deux configurations ont été examinées; l'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est créé d'abord par la mise en place d'une vanne de fond et enfin par un déversoir standard.

Concernant la configuration avec la vanne de fond, le développement théorique a mené à l'établissement d'une relation explicite permettant d'évaluer la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

Pour le cas du ressaut précédé d'un déversoir standard, l'étude théorique a montré que le nombre de Froude  $F_1$  est lié implicitement au paramètre adimensionnel  $S=1- s_2/s_1$  dans lequel  $s_2$  représente la hauteur géométrique du seuil épais et  $s_1$  celle du déversoir standard.

✓ Le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive, où nous avons cité les travaux de *Forster et Skrinde (1950)*, ils ont élaboré un diagramme qui montre la variation du nombre de Froude  $F_1$ , en fonction du rapport  $h_3/h_1$ , pour différentes valeurs des hauteurs relatives  $s/h_1$  de la marche positive.

## **Chapitre II**

Ressaut hydraulique forcé dans  
un canal rectangulaire

## **CHAPITRE II**

### ***Ressaut hydraulique forcé dans un canal rectangulaire***

#### **II.1. Introduction**

Dans ce chapitre nous passerons en revue les recherches les plus récentes relatives au ressaut hydraulique forcé dans un canal de section droite rectangulaire. Deux types de ressaut seront alors étudiés :

Le ressaut forcé par seuil mince, où nous montrerons les travaux de *Rand (1957)*, particulièrement la classification du ressaut forcé par seuil en dix (10) cas typiques. Nous présenterons également les travaux de *Rajaratnam (1964)*, qui traite en détail six (06) cas typiques de ressaut forcé par seuil ; il rejoint ainsi la description de *Rand (1957)*. Nous présenterons ensuite l'étude de *Bretz (1988)* qui, à l'instar de *Rand*, donne trois (03) types de ressaut forcé par seuil, le type A, le type B et le type  $B_{\min}$ . Ces résultats seront repris et confirmés par *Hager et Bretz (1988)*. Nous présenterons enfin les travaux de *Hager et Li 1992*.

Le ressaut forcé par marche positive, où nous présenterons les travaux de *Hager et Sinniger (1986)* et celles de *Hager et Bretz (1987)*.

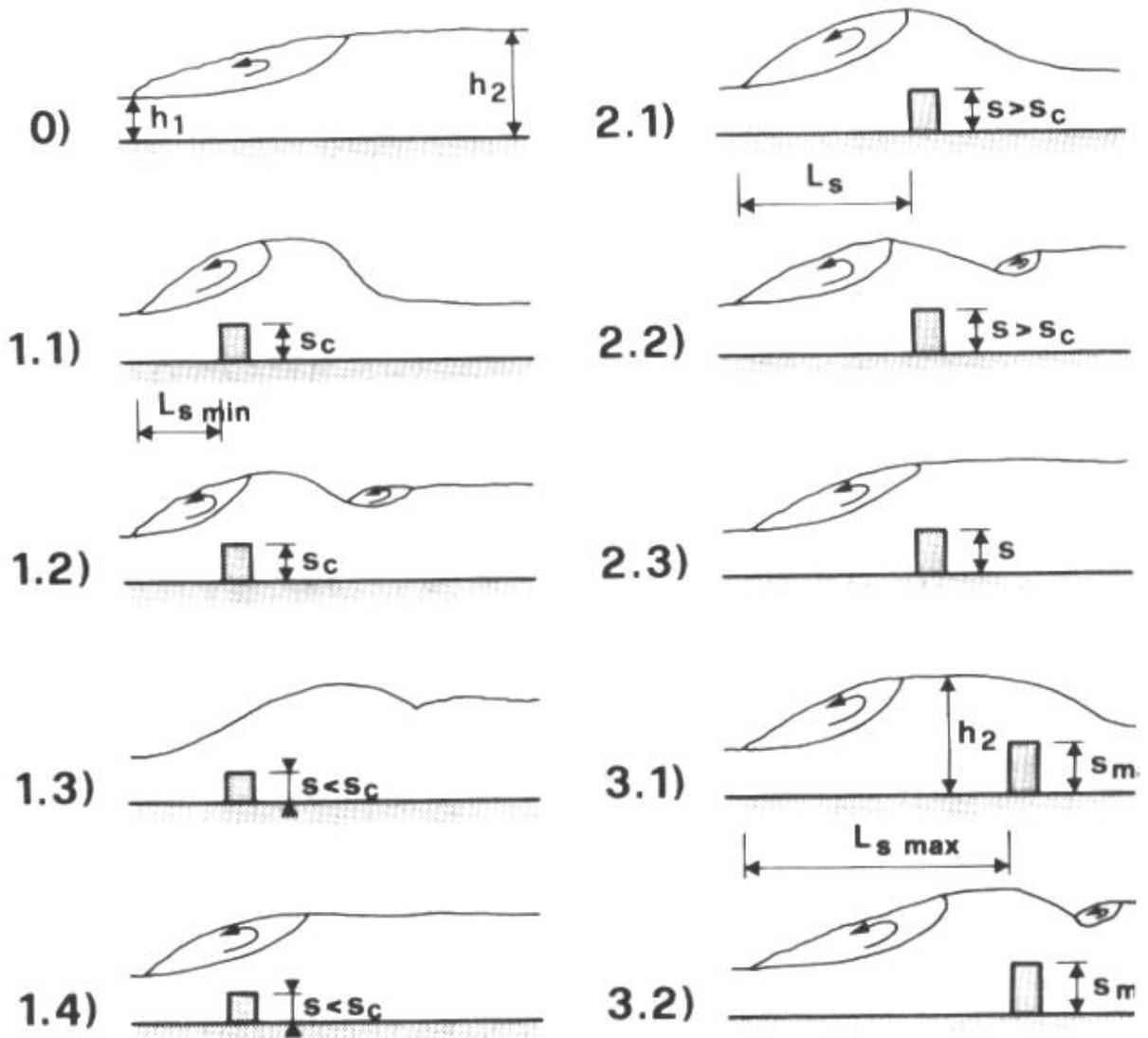
#### **II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE FORCE PAR SEUIL MINCE**

##### **II.2.1. APPROCHE DE RAND (1957)**

En 1957, *Rand* a établi une classification du ressaut forcé par seuil continu à son extrémité en 10 cas typiques, se rapportant aux effets de la hauteur du seuil et de sa position. Le ressaut classique sert de cas de référence.

Ces cas peuvent être groupés en trois classes se distinguant par la position du seuil par rapport au pied du ressaut (figure II.1) :

1. position minimale en amont  $L_S, \min$ ,
2. position intermédiaire  $L_S$ ,
3. position maximale  $L_S, \max$ .



**Figure II.1 :** Cas typiques d'écoulement divisés en trois classes :  
 0) ressaut classique ; 1) classe 1, longueur  $L_s, \min$  ; 2) classe 2, longueur intermédiaire  $L_s$  ; 3) classe 3, longueur  $L_s, \max$ , et 4) ressaut classique avec hauteurs conjuguées  $h_1$  et  $h_2$ .  $s$  : hauteur du seuil,  $s_c$  : hauteur critique du seuil et  $s_{\max}$  : hauteur maximale du seuil.

Afin de décrire tous les cas, *Rand (1957)* définit un facteur de position :

$$K = \frac{(L_s/h_1) - (L_s/h_1)_{\min}}{(L_s/h_1)_{\max} - (L_s/h_1)_{\min}} \quad (\text{II.1})$$

Variant entre  $K = 0$  pour le ressaut dans la position minimale et  $K = 1$  pour la position maximale. De plus, l'auteur en (1957) a réussi d'établir des diagrammes qui permettent d'exprimer le rapport des hauteurs conjuguées  $Y_F$  en fonction de  $IF_1$  pour différentes hauteurs relatives de seuil  $S = s/h_1$  et ceci pour 5 valeurs de  $K$ . La figure II.2 montre ce diagramme, qui montre que, l'augmentation de la hauteur relative du seuil, engendre la diminution de la hauteurs conjuguées et qu'une augmentation de  $F$  conduit à la disparition du rôle du seuil, ce

qui pourrait signifier que le seuil devient inutile, pour de très grands nombres de Froude  $IF_1$ !. La hauteur du seuil nécessaire à la formation d'un ressaut peut être tirée de ces diagrammes. *Rand (1957)* propose pour la première fois une classification des divers cas possibles du ressaut forcé par seuil et des diagrammes permettant le dimensionnement des bassins. En 1965, *Rand* a de nouveau représenté ces cartes sous une autre forme. Cette fois il a utilisé un canal avec vanne plane : la détermination de  $h_1$  est donc recommandée dans ce cas. Un diagramme pour une valeur de  $IF_1$  est dressé  $Y_F = h_2/h_1$  en fonction de  $S = s/h_1$  pour diverses valeurs de  $K$ , arrangement plus pratique à utiliser pour le dimensionnement (figure II.2), mais avec l'inconvénient qu'il faut tracer un diagramme pour chaque nombre de Froude.

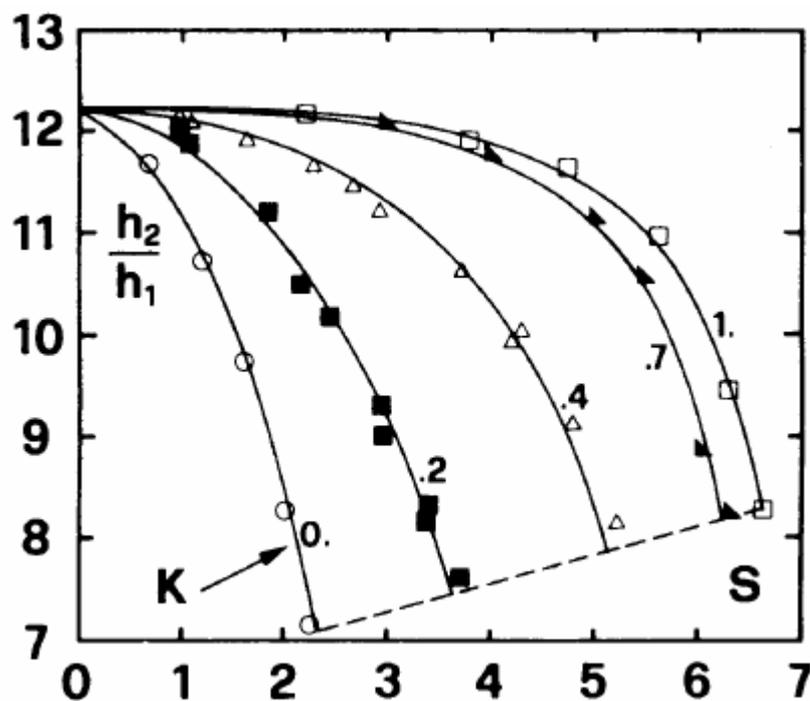


Figure II.2 : Hauteurs conjuguées  $h_2/h_1 = f(S, K)$  pour  $F_1 = 9$ . Valeurs et courbes expérimentales ; (---) limite d'influence de l'aval sur l'amont.

### II.2.2. APPROCHE DE RAJARATNAM (1964)

*Rajaratnam (1964)*, exprime le coefficient de traîné  $C_d$  en fonction de  $IF_1$ , du rapport des hauteurs conjuguées  $Y_F$  et de la hauteur relative du seuil  $S$ . A la suite d'essais, il établit un diagramme de la variation de  $C_d$  avec  $L_s/L_r$  où  $L_s$  est la position du seuil par rapport au pied du ressaut et  $L_r$  la longueur du rouleau (figure II.3). *Rajaratnam (1964)* propose une courbe moyenne et divise le domaine de  $L_s/L_r$  en quatre zones, choisies selon les cas typiques d'écoulement.

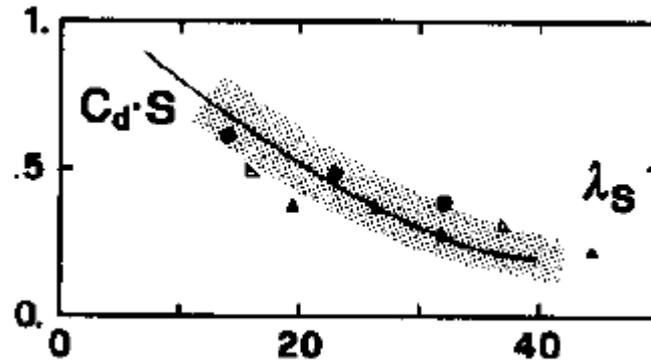


Figure II.3 : Variation du coefficient de traîné  $C_d$  en fonction de la position relative du seuil  $\lambda_s = L_s/L_r$  Rajaratnam (1964) ; points expérimentaux et courbe moyenne.

### II.2.3. APPROCHE DE RAJARATNAM ET MURAHARI (1971)

Rajaratnam et Murahari (1971) ont poursuivi les recherches, à la lumière de Rand. Le coefficient de traînée est rendu dépendant de la hauteur relative du seuil  $S = s/h_1$ . Ils ont aussi établi des diagrammes de  $C_d$  en fonction de la position relative du seuil  $L_s/h_1$  pour chaque point de  $S$ , puis les ont regroupés sur un seul avec  $C_d \cdot S = f(L_s/h_1)$  pour que les courbes ne se chevauchent pas ; les profils des surfaces et des vitesses sont mesurés. La figure II.4 représente l'évolution des vitesses dans le ressaut forcé par un seuil à paroi mince.

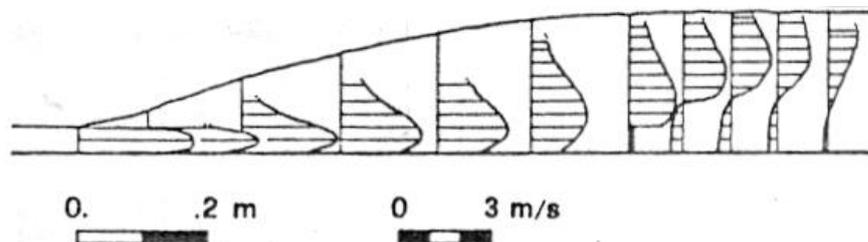


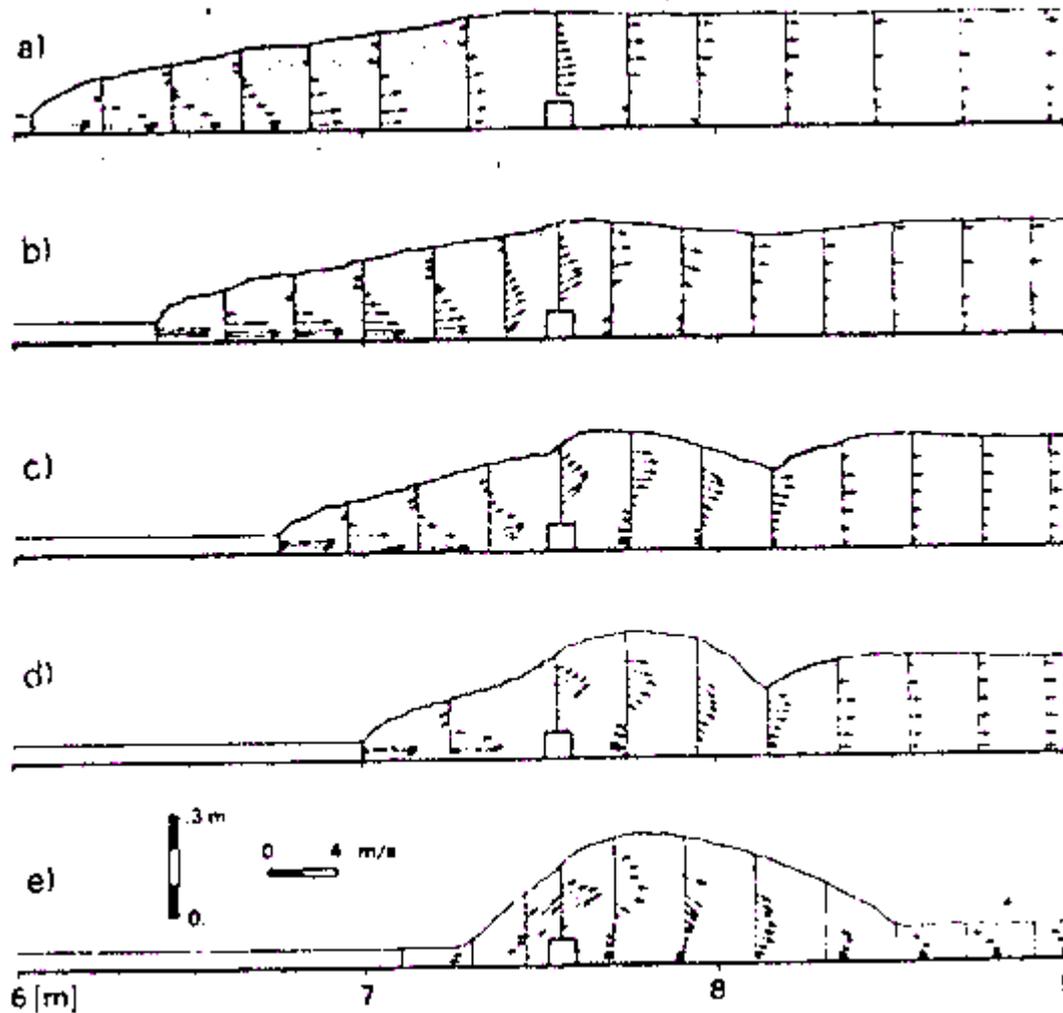
Figure II.4 : Ressaut forcé par seuil à paroi mince. Répartition des vitesses pour  $IF_1 = 5,6$  et  $s = 50$  mm.

### II.2.4. APPROCHE DE BRETZ (1988)

#### II.2.4. 1. Généralités

À l'instar de Rand (1965), Bretz en 1988 a conduit une étude expérimentale sur l'effet du seuil sur le ressaut hydraulique. Ses résultats ont été confirmés par Hager et Bretz (1988), Hager et Sinniger (1989), et Hager et Li (1991).

Une description détaillée et une classification des différents types d'écoulements du ressaut forcé par seuil sont présentées (figure II.5).

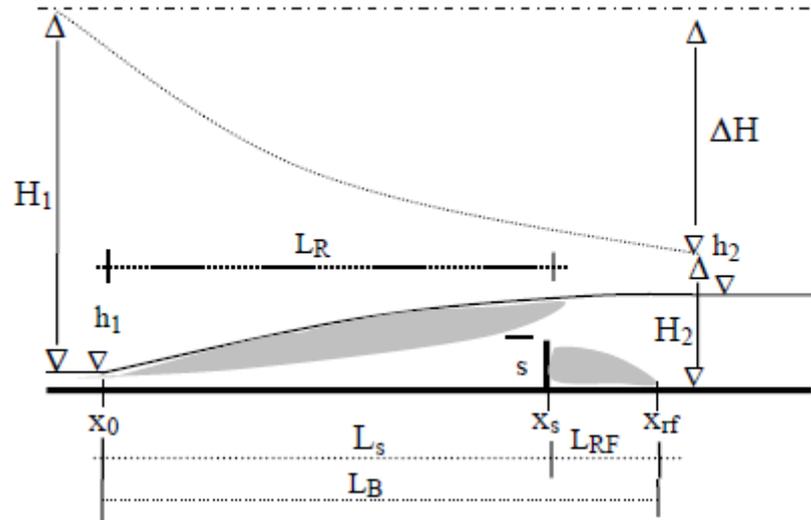


**Figure II.5 :** Ressaut forcé par seuil. Distribution des vitesses pour  $IF_1=5,23$  et  $S=1,42$ . a) ressaut type A ; b) ressaut type B ; c) ressaut type B minimum ; d) ressaut type C et e) onde. (Bretz, 1987).

En effet, trois types de ressaut forcé par seuil sont retenus et analysés dans quatre sections longitudinales. Trois paramètres sont étudiés, d'abord indépendamment les uns des autres, puis en combinaison : le nombre de Froude  $IF_1$ , le niveau aval  $h_2$  et la hauteur relative  $S$  du seuil. L'attention est portée particulièrement sur les hauteurs conjuguées caractérisant le ressaut forcé par seuil et les profils de surface.

#### II.2.4.2. Procédure expérimentale

Dans le but d'augmenter le nombre de Froude  $F_1$  et de pouvoir simultanément contrôler la hauteur d'eau amont  $h_1$ , une vanne plane est installée dans la partie horizontale du canal. La procédure des essais est la même que celle décrite pour le ressaut classique.



**Figure II.6:** Ressaut forcé par seuil : définition des termes.  $H_1$  charge amont,  $H_2$  charge aval,  $\Delta H$  perte de charge.  $h_1$  hauteur d'eau amont,  $h_2$  hauteur d'eau aval,  $s$  hauteur du seuil,  $x_0$  position du pied du ressaut,  $x_s$  position du seuil,  $x_{rf}$  position de la fin du rouleau de fond à l'aval,  $L_R$  longueur du rouleau de surface,  $L_s$  position du seuil par rapport au pied du ressaut,  $L_{RF}$  longueur du rouleau de fond aval,  $L_B$  distance entre le pied du ressaut et la fin du rouleau aval.

Les grandeurs suivantes sont relevées : charge à l'amont de la vanne  $H_0$ , hauteur d'eau aval  $h_2$ , position du pied du ressaut  $x_0$  et position de la fin du rouleau de fond  $x_{rf}$ . Les essais sont répétés pour les hauteurs relatives de seuil  $S = 1, 2, 3$  et  $4$  mm, dont l'emplacement est fixe.

Le pied du ressaut a été placé le plus près possible de la vanne, pour éviter l'effet du frottement dans cette frange de l'écoulement.

Un débit est amorcé pour provoquer un ressaut forcé (type A, B ou  $B_{\min}$ ). 45 essais pour chaque type de ressaut ont alors été effectués.

### II.2.4.3. Hauteurs conjuguées du ressaut

Pour le cas du ressaut forcé de type A, la figure II.7 montre que plus la hauteur relative  $S$  du seuil est grande, plus la courbe correspondante s'éloigne de la courbe  $S = 0$  correspondante au ressaut classique (sans seuil).

Pour les diverses hauteurs relatives  $S$ , les courbes ont été approchées à l'aide de l'équation suivante :

$$Y_A = 1,307 \cdot IF_1 - 0,4 \cdot S^{0,85} - 0,142 \quad (\text{II.2})$$

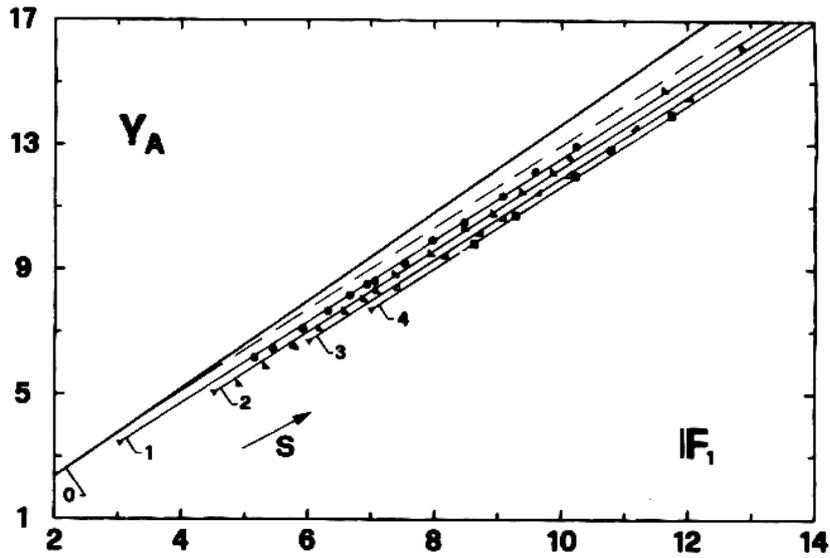


Figure II.7 : Ressaut forcé type A. Rapport des hauteurs conjuguées  $Y_A = f(IF_p, S)$  avec  $0,5 \leq S \leq 6$ .  $S = s/h_j$ . (—) courbe selon l'équation de Bélanger. (---) courbe du ressaut classique selon l'équation (1.48).

Pour le ressaut forcé type B des courbes analogues sont représentées sur la figure II.8, avec un décalage plus important vers le bas. Elles sont exprimées par l'équation :

$$Y_B = 1,307 \cdot F_1 - 0,142 - 0,6 \cdot S^{0,75} \tag{II.3}$$

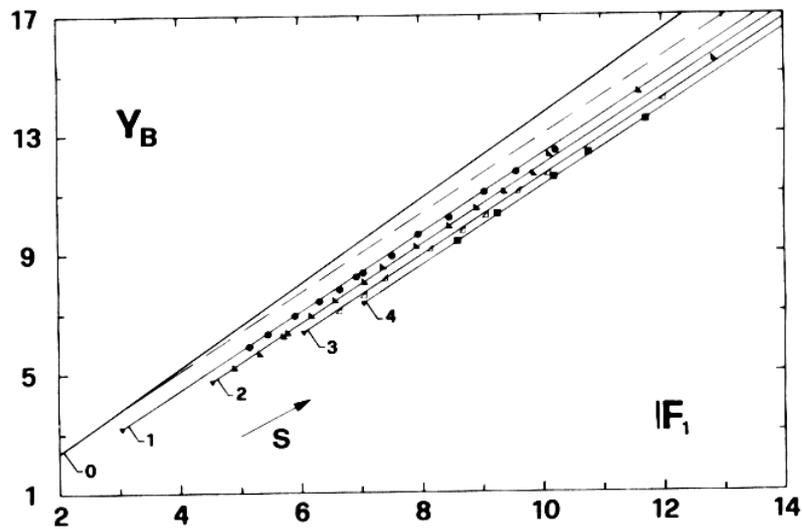
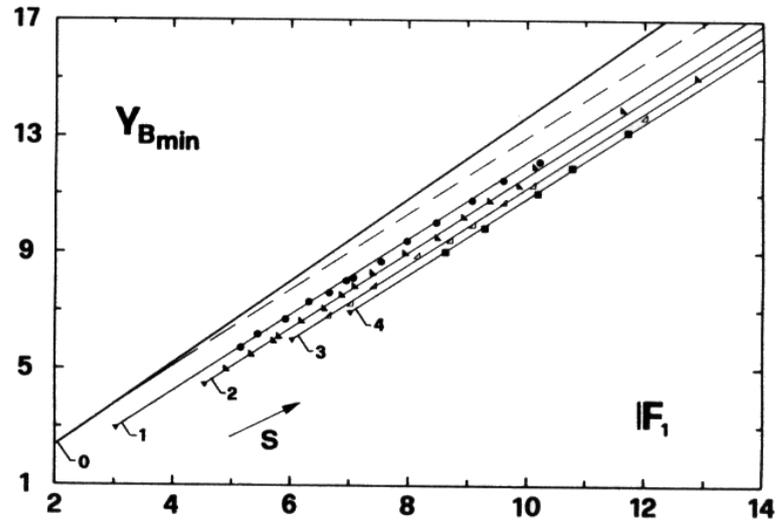


Figure II.8 : Ressaut forcé type B. Rapport des hauteurs conjuguées  $Y_B = f(IF_p, S)$ .  
Même notation que la figure II.7.

Finalement pour le cas du ressaut forcé type B-minimum (figure II.9), le décalage vers le bas devient encore plus grand. L'équation devient :

$$Y_{B-min} = 1,307 \cdot F_1 - 0,142 - 0,85 \cdot S^{0,65} \tag{II.4}$$



**Figure II.9 :** Ressaut forcé type B-min. Rapport des hauteurs conjuguées  $Y_{B-min} = f(IF_1, S)$ .  
Même notation que la figure II.7.

Autrement dit le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé par seuil est représenté en fonction du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique par l'équation :

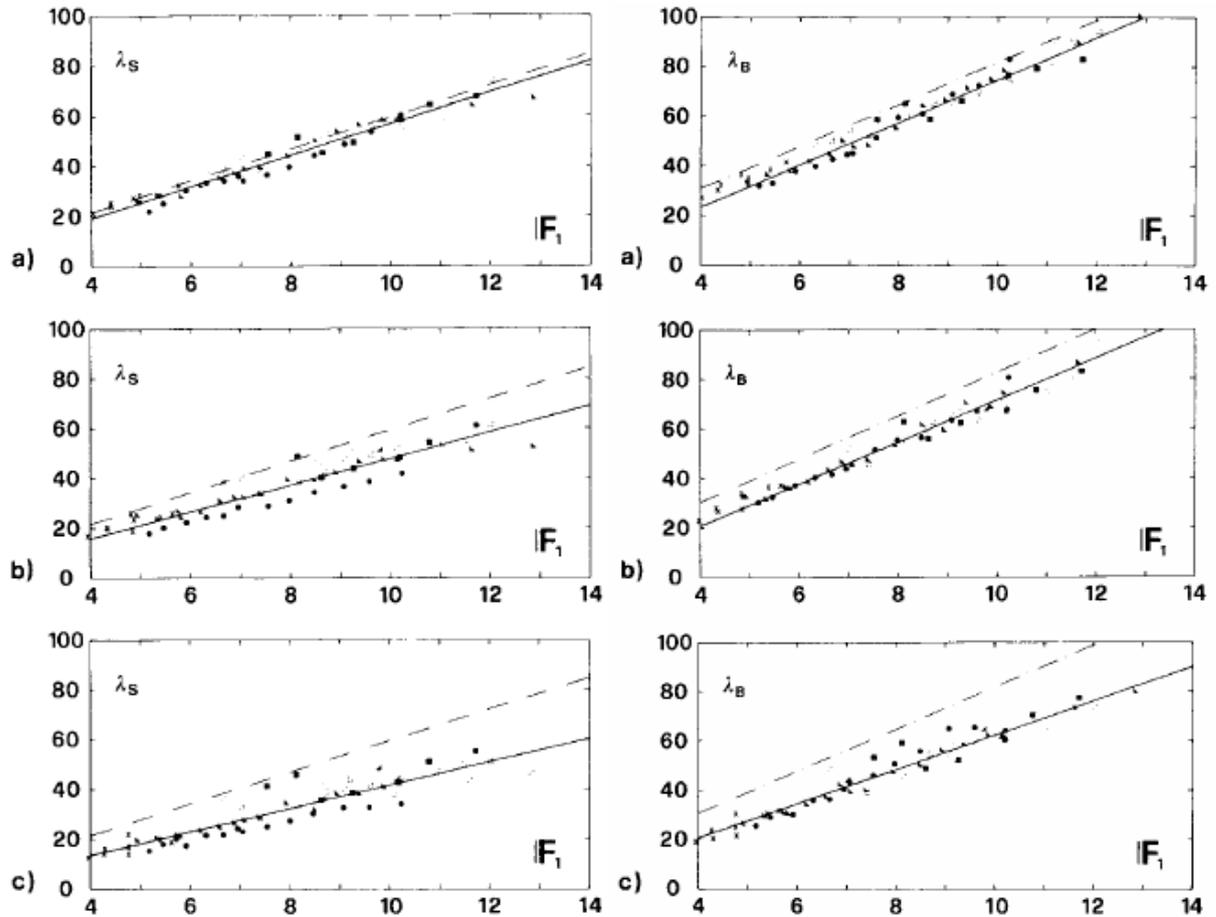
$$Y_F = Y_{RC} - \Delta Y_S \quad (\text{II.5})$$

$Y_F$  est donnée par les équations (II.3), (II.4) et (II.5),  $Y_{RC}$  par les mêmes équations pour  $S = 0$  et  $\Delta Y_S$  est l'effet du seuil défini par  $\Delta Y_S = \alpha \cdot Y_S^\beta$ . Les valeurs des coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  sont données ci-après :

	Type A	Type B	Type B-min
$\alpha$	0,4	0,6	0,85
$\beta$	0,85	0,75	0,65

#### II.2.4.4. Longueur relative du bassin

La variation de la position relative du seuil  $\lambda_s = L_s/h_1$  et de la longueur relative du bassin  $\lambda_B = L_B/h_1$ , en fonction du nombre de Froude  $IF_1$ , sont représentées respectivement dans les figures (II.10) et (II.11).



**Figure II.10 (a, b, c) :** longueur relative  $\lambda_s=f(F_1)$  pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B-min. (—) courbe selon l'equ : a) (II.6), b) (II.8) et c) (II.10) respectivement. (---) courbe limite.

**Figure II.11 (a, b, c) :** longueur relative  $\lambda_B=f(F_1)$  pour le ressaut forcé : a) type A, b) type B et c) type B-min. (—) courbe selon l'equ : a) (II.7), b) (II.9) et c) (II.11) respectivement. (---) courbe limite.

Pour les trois types de ressauts forcés,  $\lambda_s$  augmente presque linéairement avec le nombre de Froude  $IF_1$ . Ainsi, la pente de la courbe est plus forte pour le type A et la moindre pour le type B-min. Quant à  $\lambda_B$ , les courbes présentent une pente plus forte que celle pour  $\lambda_s$ . Les courbes pour les divers types de ressaut forcé sont situées au-dessous de celles du ressaut classique. Ce fait indique la réduction nette de la longueur du ressaut forcé par rapport au ressaut classique. Pour les trois types de ressaut forcé, les courbes sont données par les équations suivantes, avec le domaine de validité  $5 \leq IF_1 \leq 13$  :

1. Ressaut forcé type A  $\lambda_s = 6,27 \cdot IF_1 - 5,75$  (II.6),  $\lambda_B = 8,68 \cdot IF_1 - 11,23$  (II.7)
2. Ressaut forcé type B  $\lambda_s = 5,29 \cdot IF_1 - 5,37$  (II.8),  $\lambda_B = 8,44 \cdot IF_1 - 12,96$  (II.9)
3. Ressaut forcé type B-min  $\lambda_s = 4,64 \cdot IF_1 - 4,84$  (II.10),  $\lambda_B = 6,93 \cdot IF_1 - 6,83$  (II.11)

### II.2.4.5. APPROCHE DE HAGER ET LI (1992)

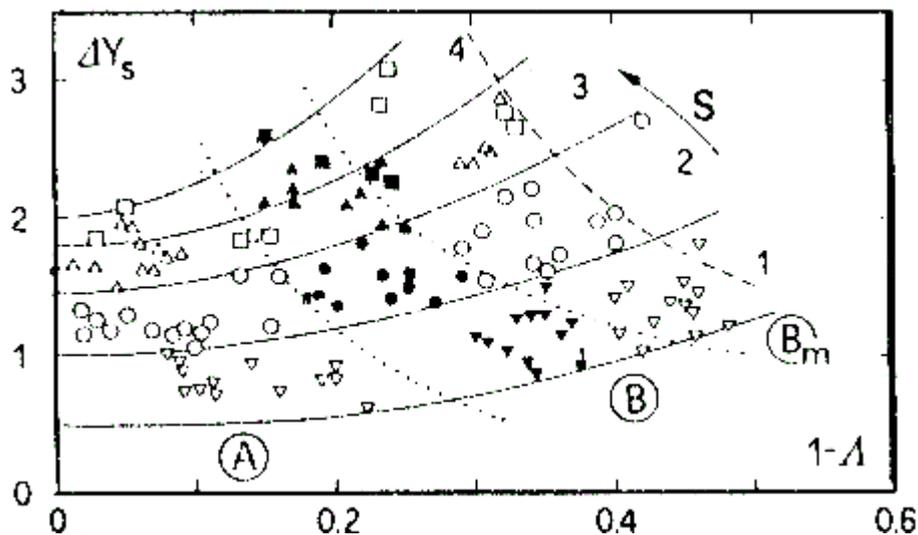
#### II.2.4.5.1. Rapport des hauteurs conjuguées

En 1992 Hager et Li analysent à nouveau les points de mesures de Bretz (1988) et montre que la réduction  $\Delta Y_s = Y^* - Y$  du niveau aval due à la présence du seuil peut s'exprimer en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  et de la position relative  $\Lambda = L_s/Lr^*$  du seuil. La figure II.12 montre bien que la variation de la hauteur relative  $S$  et de la position relative du seuil, permet le passage d'un type de ressaut forcé à un autre.

Les auteurs établissent alors la relation suivante :

$$\Delta Y_s = 0,7.S^{0,7} + 3S.(1-\Lambda)^2 \quad \text{pour } \Lambda > 0,5 \quad (\text{II.12})$$

Le rapport  $Y^*$  des hauteurs conjuguées est donné par l'équation (1.3).



**Figure II.12 :** Réduction de hauteur aval  $\Delta Y_s$  suite à la présence du seuil, fonction de la position relative  $(1-\Lambda)^2$  et de la hauteur relative  $S$  du seuil.  $S = (\nabla)$  1,  $(\circ)$  2,  $(\Delta)$  3 et  $(\square)$  4. (...) équation (II.13). (---) équation (II.14).

Selon Hager et Li (1992), les hauteurs relatives limites  $S_L$  de seuils peuvent être approchées à :

$$S_L = [C_L \cdot (1-\Lambda)]^{-2} \quad (\text{II.13})$$

où  $C_L = 4$  pour transiter du ressaut type A au ressaut type B

et  $C_L = 2,5$  entre B et B-min

La limite supérieure  $S_+$  de l'apparition du ressaut type B-min est :

$$S_+ = 1 / [9(1-\Lambda)^3] \quad (\text{II.14})$$

La figure II.13 représente la variation de  $\delta = (\Delta Y_s - 0,7^{0.7}) / (3.S)$  en fonction de  $1-\Lambda$ .

D'après les mesures de *Basco (1971)* relatives au ressaut contrôlé par chicanes, *Hager et Li (1992)* proposent une équation permettant la détermination de la hauteur optimale du seuil en fonction du nombre de Froude  $IF_1$  :

$$S_{opt} = 1 + (IF_1^{2.5} / 200), \quad 3 < IF_1 < 10 \quad (II.15)$$

Cette équation est valable pour le cas d'un seuil continu car la hauteur optimale du seuil est quelque peu inférieure à la hauteur optimale des chicanes.

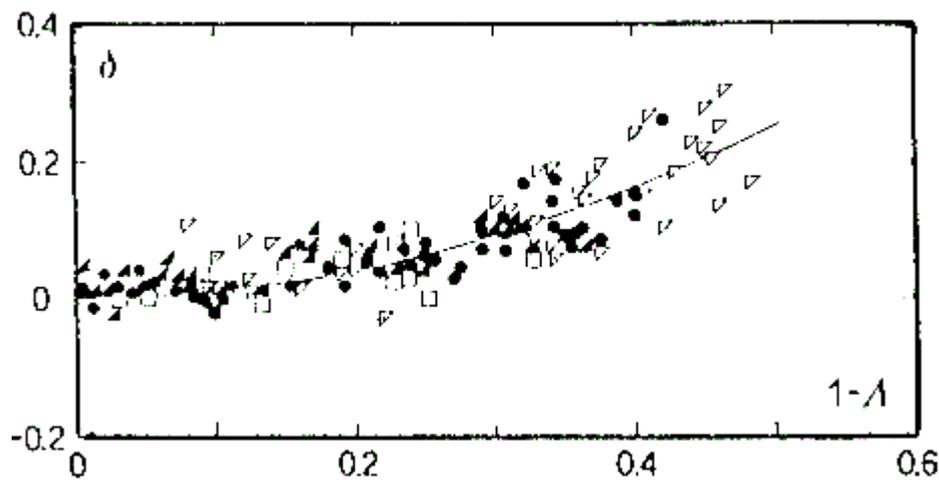


Figure II.13 : Variation de  $\delta$  en fonction de la position relative  $(1-\Lambda)$  pour  $S = (\nabla) 1, (\bullet) 2, (\Delta) 3$  et  $(\square) 4$ .

#### II.2.4.5.2. Longueur du bassin

D'après *Hager et LI (1992)*, la longueur  $L_B$  du bassin doit être au moins égale à la distance qui sépare le début du ressaut de la fin du rouleau de fond.

Les auteurs analysent les résultats de *Bretz (1988)* et trouvent que la longueur relative  $\Lambda_B = L_B/Lr^*$  est fonction de la position relative  $\Lambda_S = Ls/Lr^*$  et de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil.

L'ajustement des points de mesures a permis aux auteurs l'établissement de la relation suivante :

$$\Lambda_B = (4/3) [1 - 0,6.S^{1/3}(1-\Lambda)] \quad (II.16)$$

La figure II.14 montre le terme  $\Phi = [1 - (3/4) \Lambda_B] (0,6.S^{1/3})^{-1}$  fonction de la position relative du seuil.

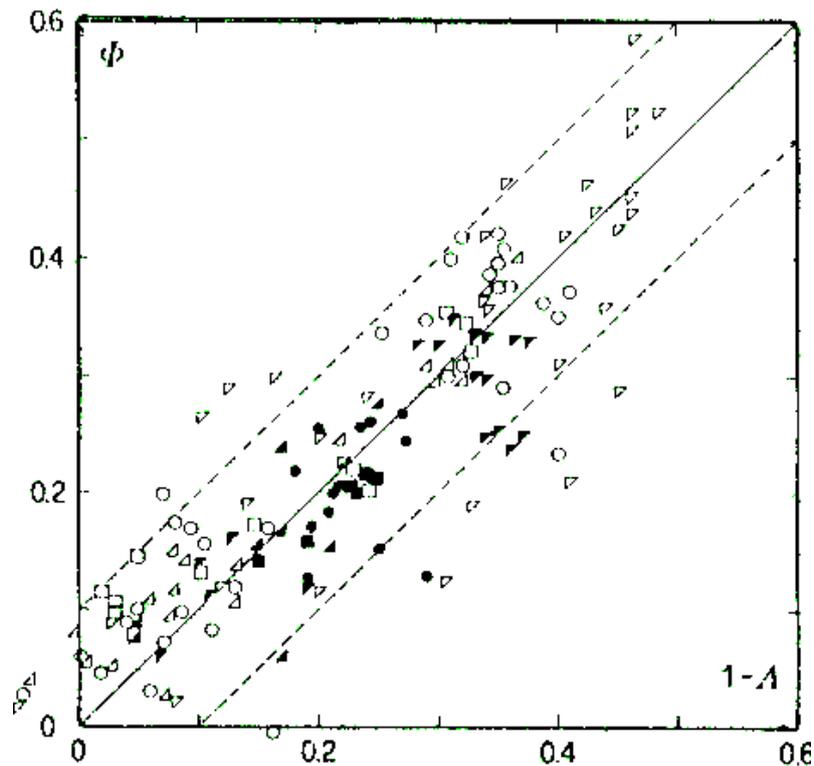


Figure II.14 : Longueur relative  $\Phi$  du bassin en fonction de la position relative du seuil  $(1-A)$ .  $S = (\blacksquare)$  1,  $(\bullet)$  2,  $(\blacktriangle)$  3 et  $(\blacksquare)$  4 pour un ressaut du type B. Les signes blancs correspondent aux ressauts des types A et B-minimum. (—) équation (II.16).

La bibliographie a montré que :

$$Lr^* \cong 4,5 h_2 \text{ et } Lj^* \cong 6 h_2$$

d'où

$$Lr^*/Lj^* = 3/4 \quad (\text{II.17})$$

En introduisant  $Lj^*$  dans l'équation (II.16) et en utilisant l'équation (II.17), l'équation (II.16) devient :

$$\Lambda_j = 1 - 0,6.S^{1/3}(1-\Lambda) \quad (\text{II.18})$$

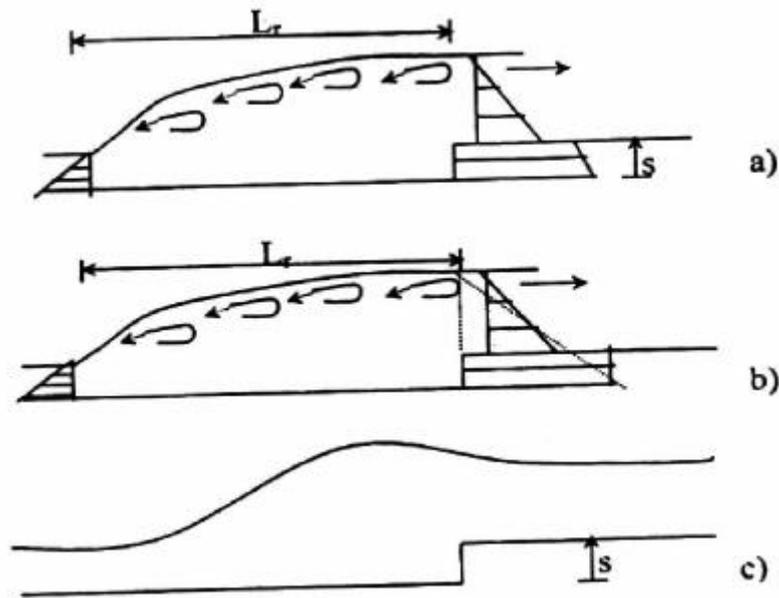
où

$$\Lambda_j = L_B/Lj^* \text{ et } \Lambda = L_S/Lr^*$$

### II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE FORCÉ PAR MARCHÉ POSITIVE

Très peu d'études ont été réalisées dans le domaine du ressaut hydraulique forcé par marche positive ; parmi ces études, on peut citer les travaux de *Forster et Skrinde* (1950), celles de *Hager et Sinniger* (1986) et celles de *Hager et Bretz* (1987).

La marche positive constitue l'un des moyens les plus simples pour réaliser la transition de l'écoulement torrentiel à l'écoulement fluvial, par un changement local du radier. La figure II.15 montre le développement d'un ressaut hydraulique forcé par marche positive dans un canal rectangulaire de pente nul.



**Figure II.15 :** types de ressaut hydraulique évaluant dans un canal doté d'une marche positive.  
(a) ressaut type A (b) ressaut type B.(c) ressaut type B-min

### II.3.1. TRAVAUX DE HAGER ET SINNIGER (1986)

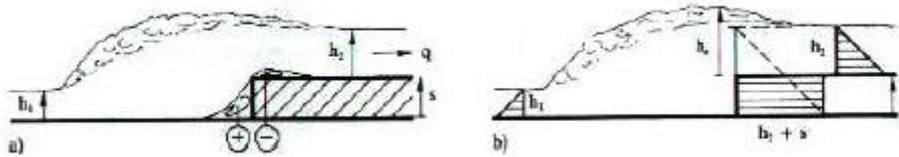
Dans cette étude *Hager et Sinniger (1986)* ont indiqué que des fluctuations importantes se produisaient à la surface de l'eau, ce qui a empêché de déterminer la longueur du ressaut  $L_j$  avec précision suffisante. C'est pour cette raison que seule la longueur du rouleau  $L_r$  est prise en considération.

Par comparaison avec le ressaut hydraulique dans un canal sans marche, on distingue divers types de ressauts. La transition d'un type à l'autre est normalement continue ; du point de vue du dimensionnement. Concernant la position limite amont, le ressaut hydraulique apparaît de manière similaire avec ou sans marche. Cette limite est donc caractérisée par un ressaut pour lequel l'extrémité aval du rouleau se trouve au droit de la marche. La répartition des pressions est évidemment hydrostatique et les vitesses sont réparties presque uniformément dans les deux sections limitant le volume de contrôle. Ce type de ressaut est appelé ressaut type A (figure II.16.a).

Les paramètres  $F_1$ ,  $Y$  et  $S$  peuvent être liés entre eux par l'application du théorème de la quantité de mouvement en négligeant les effets de frottement (*Hager et Bretz (1987)*).

$$F_1^2 = \frac{Y \left| (Y + S)^2 - 1 \right|}{2(Y - 1)} \quad (\text{II.19})$$

Le ressaut hydraulique de type A peut être transformé en un ressaut type B. Il correspond à la position stable du ressaut situé le plus loin possible à l'aval (figure II.16.b).



**Figure II.16** ; a) zones de séparation d'écoulement pour une marche positive, (+) et (-) indiquent respectivement les suppressions et les dépressions par rapport à la pression hydrostatique.  
b) répartition de la pression autour du volume de contrôle

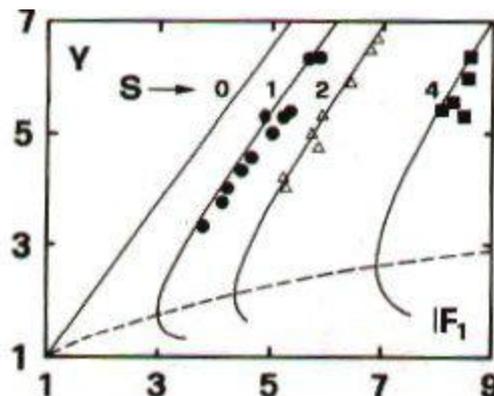
Comme il est montré à la (figure II.16.a), il existe deux zones de séparation autour de la marche positive, celle située à l'amont et caractérisée par une surpression et celle située à l'aval par une dépression par rapport à la pression hydrostatique.

Comme hypothèse de la dépression sur la marche positive, une distribution uniforme est admise égale la valeur \$(h\_2+s)\$ où \$h\_2\$ est la hauteur d'eau aval sur la marche (figure II.16.b).

La relation liant les paramètres \$F\_1\$, \$Y\$ et \$S\$ régissant le ressaut hydraulique forcé par marche positive type B s'écrit donc

$$F_1^2 = \frac{Y|(Y+S)^2 - 1|}{2(Y-1)}, \quad S \geq 0 \quad (\text{II.20})$$

Les courbes correspondant montrent une bonne concordance avec les essais de *Forster Skrinde (1950)* (figure II.17).



**Figure II.17** : variation du rapport \$Y\$ des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude \$F\_1\$ pour différentes hauteurs relatives \$S\$ de marche positive. (-) courbes théorique pour divers \$S\$ selon Hager et Simmiger (1986) ; points expérimentaux de Forster et Skrinde (1950) (---) la limite théorique

Pour des valeurs de \$Y\$ et \$S\$ données, le nombre de Froude \$F\_1\$ obtenu à partir de l'équation (II.20) est supérieur à celui obtenu à partir de l'équation (II.19). Autrement dit, la valeur de \$Y\$ tirée de l'équation (II.20) est inférieure à celle tirée de l'équation (II.19). Pour une même

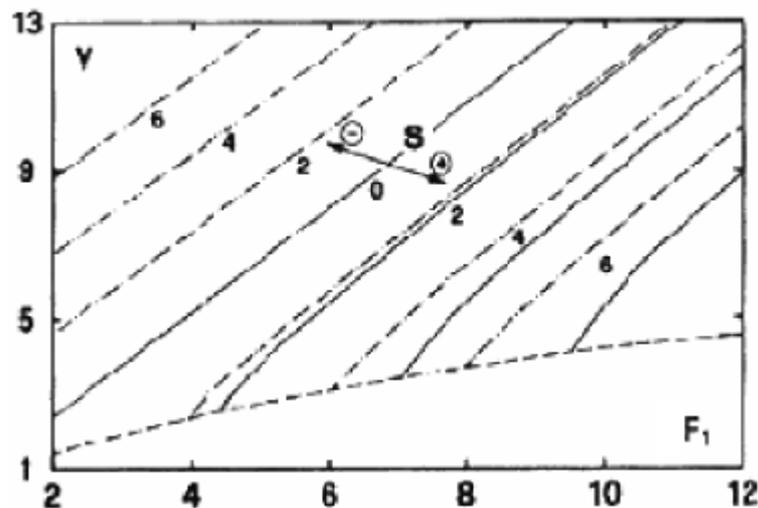
valeur de  $F_1$ , les deux relations ne deviennent identiques que pour  $S = 0$ , correspondant au ressaut hydraulique dans un canal sans marche (classique).

Une formule simplifiée est développée pour la dissipation d'énergie relative à la charge amont pour le ressaut type B sur marche positive :

$$\eta = \left(1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}\right)^2 \text{ pour } F_1 > 2,5 \quad (\text{II.21})$$

Il faut dire que  $\eta$  est indépendant de  $S$  et correspond donc au cas  $S = 0$ .

La figure II.18 montre la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées pour les marches positives et négatives en fonction du nombre de Froude amont  $F_1$  et la hauteur relative  $S$  de la marche. Les courbes pointillées correspondent à la position extrême amont et les courbes pleines se réfèrent à la position extrême aval de la marche. La courbe en trait discontinu correspond à la limite inférieure de l'apparition du ressaut sur une marche positive de la fonction  $Y(F_1)$  pour  $S$  fixe *Hager et Sinniger (1986)*.



**Figure II.18 :** variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les marches positives et négatives dans un canal rectangulaire prismatique (.....) ressaut type A, (-) ressaut type B et  $B_{min}$ , (---) la limite inférieure de l'apparition du ressaut sur marche positive

### II.3.2. TRAVAUX DE HAGER ET BRETZ (1987)

Comparé à un ressaut hydraulique dans un canal prismatique et à fond horizontale, le bassin amortisseur doit forcer l'apparition du ressaut quelques soient les conditions hydrauliques.

En particulier, le ressaut hydraulique ne doit pas sortir du bassin amortisseur. La stabilité d'un bassin amortisseur est la capacité de l'ouvrage de maintenir la position du ressaut sous des

hauteurs d'eau aval  $h_2$  variables, en fixant la hauteur amont  $h_1$  et le nombre de Froude  $F_1$  incident correspondant.

Soit  $\Delta Y = Y_A - Y_B$  le changement maximal admissible de la hauteur d'eau aval, où  $Y_A$  caractérise le ressaut type A et  $Y_B$  le ressaut type B. Une estimation de  $\Delta Y$  est selon *Hager et Bretz (1987)*.

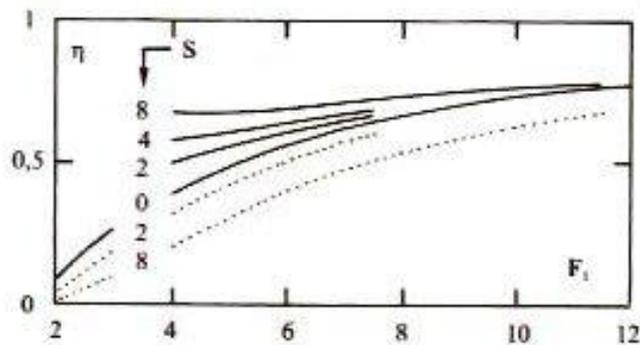
$$\Delta Y = S / 6 \quad \text{marche positive} \quad (\text{II.22})$$

$$\Delta Y = 13.S / 12 \quad \text{marche négative} \quad (\text{II.23})$$

*Hager et Bretz (1987)* montrent que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude  $F_1$ .

La dissipation relative d'énergie  $\eta = \Delta H / H_1$  est définie par la perte de charge  $\Delta H$  à travers le ressaut hydraulique comparée à l'énergie amont, soit  $H_1 = h_1 + q^2 / (2gh_1^2)$ .

La figure II.19 représente  $\eta = \eta(F_1, S)$  pour les deux types de marche. On constate que  $\eta$  dépend fortement de  $S$  et  $F_1$ . Pour  $F_1$  et  $S$  fixes. L'efficacité minimale est donnée par le ressaut hydraulique type A et celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type Bmin sur la marche négative.



**Figure II.19 :** efficacité  $\eta = \Delta H / H_1$  en fonction de  $F_1$  et de  $S$  (.....) ressaut type A marche négative, ( $s=0$ ) ressaut type B sur marche positive (---) ressaut type B-min sur marche négative

L'étude montre que l'efficacité relative minimale est donnée par le ressaut hydraulique type A et celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type B.

La capacité de bassin amortisseur correspondant à son extension longitudinale à condition que le ressaut se trouve entièrement dans le dissipateur. Les indications suivantes se réfèrent à la longueur du rouleau. La répartition de la vitesse à l'extrémité aval du rouleau est loin d'être uniforme. En ajoutant encore 20 à 40% de la longueur du rouleau  $L_r$ , cette répartition devient presque uniforme, la vitesse  $v_2$  auprès du fond étant sensiblement égale à  $q/h_2$ .

Les essais sur modèle réduit montre que la longueur relative  $\lambda = L_r / (h_2 + s)$  ne varie pas systématiquement avec  $F_1$ . Pour les positions extrêmes, *Hager et Bretz (1987)* on obtient les valeurs moyennes suivantes :

$$\begin{aligned}\lambda &= 4,75 \text{ pour ressaut type A} \\ \lambda &= 4,25 \text{ pour ressaut type B}\end{aligned}\quad (\text{II.24})$$

Pour le ressaut type A, la fin du rouleau se trouve par définition au niveau de la marche. Pour le ressaut de type B, le pied du ressaut se trouve à peu près à une distance  $L_r/2$  à l'amont de la marche. De plus, avec :  $U = \sqrt{2}F_1 - \frac{1}{2}$ , la longueur du fond protégée  $L_p$  se calcule par :

$$\lambda_p = 6 \left( U - \frac{6S}{5} \right) \quad (\text{II.25})$$

Avec :  $\lambda_p = L_r/h_1$

#### II.4. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons examiné les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique forcé dans un canal rectangulaire, où nous avons présenté en premier lieu les principaux travaux entrepris dans le domaine du ressaut forcé par seuil. Un aperçu sur les différents types de ressaut forcé. Une classification de ceux-ci est présentée en se basant sur celle de *Rand (1957)*. Trois types de ressaut forcé par seuil sont retenus, et traités en détail par *Bretz (1988)*. Il s'agit des ressauts type A, type B, et type B-min. Le premier correspond pratiquement au ressaut classique, les deux autres sont obtenus par diminution de la hauteur d'eau aval.

Des courbes, représentant le rapport des hauteurs conjuguées  $Y_F$  pour les trois types de ressaut, sont tracées et indiquent que le type A fournit les rapports  $Y_F$  les plus élevés, le type B-min les moins élevés et le type B des valeurs intermédiaires.

Le rapport  $Y_F$  des hauteurs conjuguées dépend du nombre de Froude  $IF_1$  et de la hauteur relative  $S$  du seuil.

Les longueurs relatives du bassin et de la position du seuil par rapport au pied du ressaut, sont peu dépendantes de la hauteur relative  $S$  du seuil. Elles se ramènent à des fonctions linéaires  $\lambda = f(IF_1)$  pour les trois types de ressaut forcé. Les longueurs sont maximales pour le type A, minimale pour le type B-min et intermédiaire pour le type B.

La répartition transversale des vitesses du ressaut forcé par seuil montre la présence d'un rouleau de surface à l'amont du ressaut et un rouleau de fond à l'aval immédiat du seuil.

Nous avons enfin présenté les travaux de *Hager et Li (1992)* qui analysent les points de mesures de *Bretz (1988)* et montrent que la réduction  $\Delta Y_S = Y^* - Y$  du niveau aval due à la présence du seuil peut s'exprimer en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  et de la position relative  $\Lambda = L_S/Lr^*$  du seuil. Ils définissent la longueur du bassin comme égale au moins à la distance qui sépare le début du ressaut de la fin du rouleau de fond. La longueur relative  $\Lambda_B = L_B/Lr^*$  peut également s'exprimer en fonction de  $S$  et de  $\Lambda$ .

Les auteurs présentent le ressaut forcé par seuil, comparé au ressaut classique, comme plus avantageux par une hauteur aval moindre, un bassin plus court et une efficacité plus grande.

En second lieu nous avons présenté les principaux travaux entrepris pour l'étude du ressaut hydraulique forcé par marche positive évaluant dans un canal rectangulaire. Nous avons abordé, en premier lieu les travaux de *Hager et Sinniger (1986)*, les auteurs montrent que le rapport des hauteurs conjuguées varie pour la marche positive en fonction du nombre de Froude amont  $F_1$  et de la hauteur adimensionnelle de la marche  $S = s/h_1$ . Par la suite *Hager et Bretz (1987)* montrent que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude  $F_1$ . La dissipation relative d'énergie  $\eta = \Delta H / H_1$  est définie par la perte de charge  $\Delta H$  à travers le ressaut hydraulique comparée à l'énergie amont, soit  $H_1 = h_1 + q^2/(2gh_1^2)$ . L'étude montre que l'efficacité relative minimale est donnée par le ressaut hydraulique type A et celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type B-min sur marche négative.

L'étude expérimentale, a permis aux auteurs de conclure enfin que la marche positive offre un bassin de dissipation plus courte.

## **Chapitre III**

Ressaut hydraulique dans un  
canal rectangulaire composé

## CHAPITRE III

### *Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé*

#### 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 et sont des sources de dissipation d'énergie supplémentaire de l'écoulement.

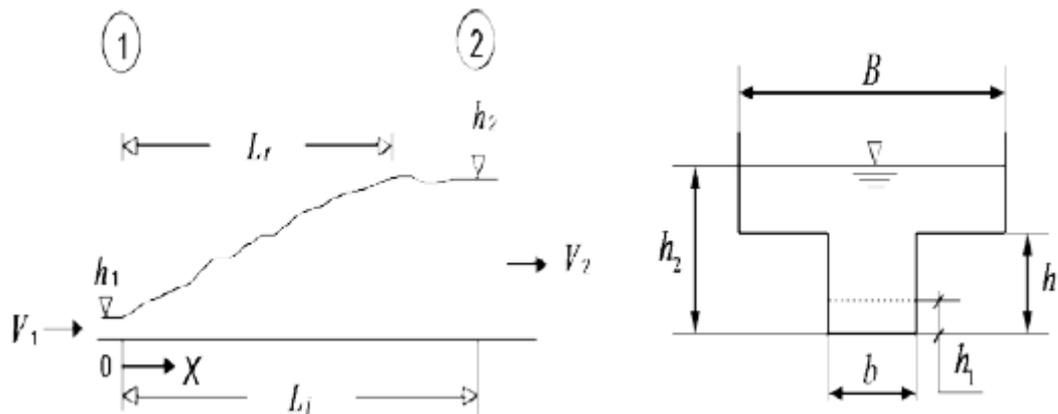
Dans ce chapitre, nous présenteront en premier lieu les travaux de *Khattaoui et Achour (2012)*. En s'inspirant du développement théorique mené par *Achour (2000)* sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, une approche théorique a été proposée par les auteurs pour déterminer le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en lit composé. Le rendement du ressaut est lui aussi quantifié.

En deuxième lieu nous examinerons en particulier les travaux de *benabdesselam et Al (2017 et 2020)*, consacrée à l'étude théorique et la validation expérimentale des relations obtenue avec trois valeurs différentes ; (1/4, 1/3 et 1/2), du rapport  $\tau_y$  de la largeur du lit mineur à la largeur du lit majeur.

#### III.2. ETUDE DE KHATTAOUI ET ACHOUR (2012)

##### III.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées

Sur la figure (III.1) est représenté les différentes caractéristiques géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit composé droit.



*Figure III.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 (III.1), s'écrit comme suit :

$$\rho Q(\beta_2 V_2 - \beta_1 V_1) = f_1 - f_2 \quad (\text{III.1})$$

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 (III.1), *Khattaoui et Achour (2012)* ont conclu qu'il paraît admissible de rajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement aurait comme expression:

$$f_x = -k\varpi(h_2 - h)^x h_1^y (B - b)^z \quad (\text{III.2})$$

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  $k = \varphi(L_j \text{ ou } L_r, h_2, h_1, h)$ .

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

$$\rho Q^2(1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 + f_x \quad (\text{III.3})$$

Analyse de l'équation pour la fonction  $f_x = (1/2)\varpi(h_2 - h)h_1(B - b)$ : 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  $A_2 = B(h_2 - h) + bh$ . En supposant également que la distribution des pressions est hydrostatique dans les sections 1 et 2 du ressaut, ce qui donne les expressions des forces :

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

En tenant compte de toutes ces hypothèses et informations ainsi que de l'équation de continuité,  $V_1 A_1 = V_2 A_2 = Q$ , les auteurs ont pu écrire l'équation finale (III.3), après l'avoir réarrangée, comme suit :

$$2F_1^2 \left( \frac{\beta}{Y - (1 - \beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} - \left( Y - \frac{1}{\tau} \right) \left( \frac{1}{\beta} - 1 \right) \quad (\text{III.4})$$

Où :

$$F_1 = Q / \sqrt{b^2 h_1^3 g} \quad (\text{III.5})$$

En négligeant la force de résistance  $f_x$ , l'équation résultante a été donnée sous la forme:

$$2F_1^2 \left( \frac{\beta}{Y - (1 - \beta)/\tau} - 1 \right) = 1 - \frac{(2Y - 1/\tau)}{\tau} - \frac{(Y - 1/\tau)^2}{\beta} \quad (\text{III.6})$$

Les relations (III.3) et (III.4) sont des équations fonctionnelles de forme  $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$ .

Notez que les équations (III.4) et (III.6) peuvent être écrites 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 se présente sous la forme  $Y^3 + pY + q = 0$ , qui peut être facilement résolue à l'aide de la méthode trigonométrique.

La figure (III.2) illustre la variation de  $Y$ , calculé par l'équation (III.6), en fonction de  $F_1$ . L'une des variables,  $\beta$  ou  $\tau$ , 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  $F_1$  à considérer doivent être strictement supérieures à la valeur minimale  $F_{1\min} = \left[ 1 / (2\sqrt{2}) \right] \sqrt{(2/\tau + 1)^2 - 1}$  correspondant à ( $h_2 = h$ ).

Compte tenu de ces figures et pour un  $\beta$  et  $\tau$  données,  $Y$  augmente continuellement avec l'accroissement de  $F_1$ . L'augmentation du rapport  $Y$  en fonction de  $F_1$  est plus rapide pour de grandes valeurs de  $\beta$ . Pour un  $F_1$  fixé,  $Y$  croît avec l'accroissement de  $\beta$  et diminue avec l'augmentation de  $\tau$ .

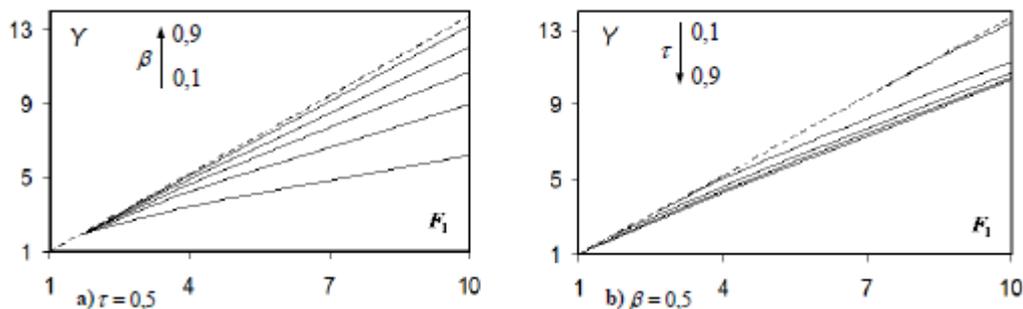


Figure III.2 : Variation de  $Y$ , calculé par (III.4), en fonction de  $F_1$ . (---) :  $\beta = 1$ .

Sur la figure (III.2) est représentée la variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  pour  $\beta = \tau = 0,5$ . Les valeurs de  $Y$  calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont inférieures à celles calculées en la négligeant. La différence est plus claire au fur et à mesure que le nombre

de Froude  $F_1$  augmente. La force  $fx$  traduit les pertes de charge dues à l'expansion de l'écoulement vers le haut.

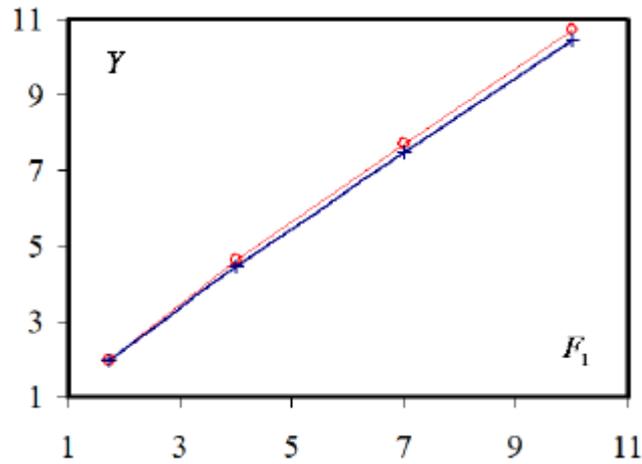


Figure III.3 : Variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$ . (o) : équation (III.6), (+) : équation (III.4).

### III.2.2. Rendement du ressaut

En tenant compte des mêmes hypothèses précédentes, le rendement,  $\eta = \Delta H/H_1$ , peut être exprimé par :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (\text{III.7})$$

Le rendement du ressaut hydraulique en lit composé peut être calculé explicitement à partir de l'équation (III.7), connaissant le nombre de Froude  $F_1$ , le rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  ainsi que le rapport de l'élargissement  $\beta$  et le rapport des hauteurs  $\tau$ . En considérant les valeurs de  $Y$  calculées avec la relation (III.6), la variation de  $\eta$  en fonction de  $F_1$  est représentée sur la figure (III.4). Pour un  $\tau$  et un  $\beta$  fixés, il est clairement illustré sur cette figure que le rendement  $\eta$  d'un ressaut hydraulique dans un lit composé, croît proportionnellement et continuellement avec l'accroissement de  $F_1$ .

Pour un  $\tau$  connu, et un  $F_1$  fixé,  $\eta$  diminue avec l'augmentation de  $\beta$ . Pour un  $\beta$  et un  $F_1$  fixés, le  $\eta$  augmente avec l'accroissement de  $\tau$ .

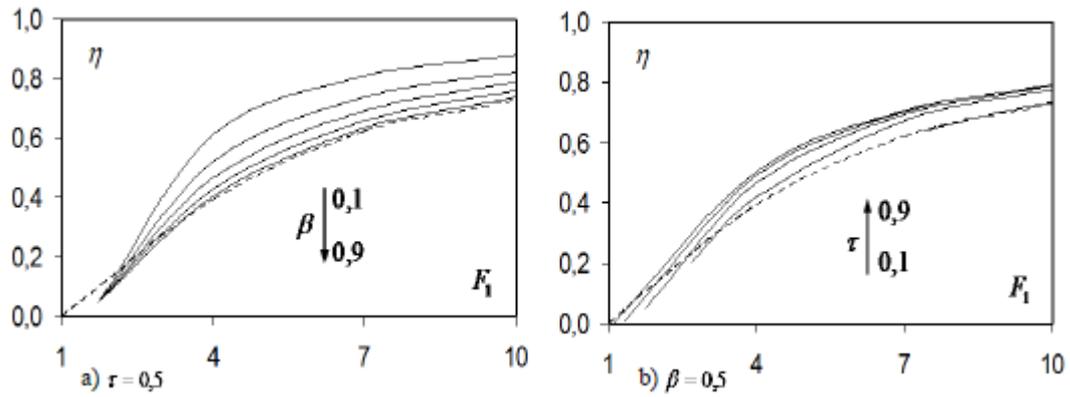


Figure III.4 : Variation de  $\varepsilon$  en fonction de  $F_1$ . (- - -) :  $\beta = 1$ .  $\eta$  est calculé par l'équation (III.3).

La figure (III.5) représente la variation du rendement  $\eta$  en fonction de  $F_1$  pour  $\beta = \tau = 0,5$ . Il est bien illustré que les  $\eta$  calculées en tenant compte de la force de résistance rajoutée sont supérieures à celles calculées en la négligeant.

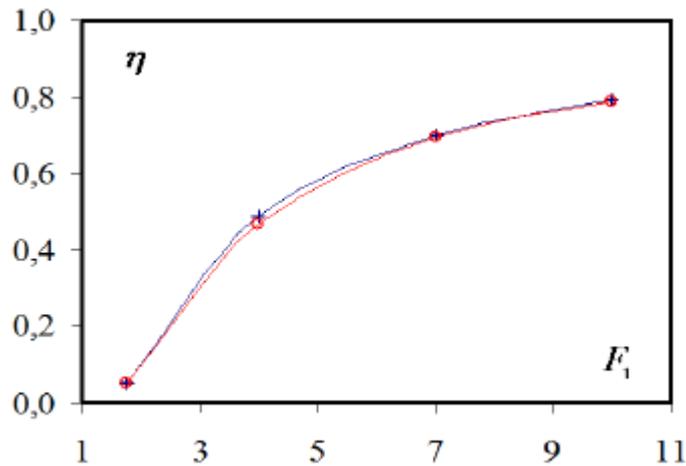


Figure III.5 : Variation de  $\eta$  en fonction de  $F_1$ . (0) : équation (III.2), (+) : équation (III.1)

### III.3. ETUDE DE BENABDESSELAM ET AL (2017et 2020)

#### III.3.1. Installation expérimental

La figure III.6 montre un schéma du ressaut hydraulique évoluant dans un canal composé rectangulaire droit.

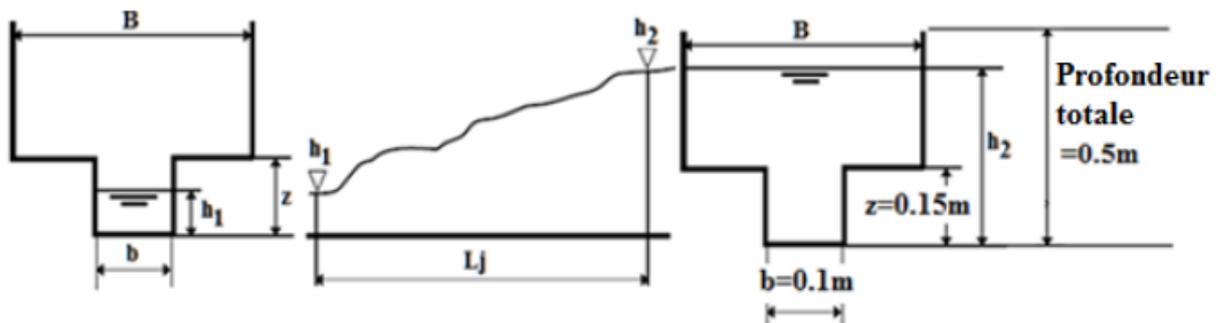


Figure III.6: Schéma de définition du ressaut hydraulique dans un canal composé rectangulaire droit

Les expériences de Benabdesselam et al (2017 et 2020) ont été réalisées dans un canal rectangulaire composé droit de 4 m de long, la largeur et la profondeur du canal principal (lit mineur) sont respectivement de 0,1 m et 0,15 m. Le lit majeur à une profondeur totale de 0,5 m et une largeur réglable. Les débits  $Q$ , sont compris entre 9,9 l/s et 19 l/s. L'expérimentation porte sur trois cas ; (1/4, 1/3 et 1/2) du rapport entre la largeur du lit mineur et celle du lit majeur, où chaque rapport correspond à cinq profondeurs initiales ;  $h_1 = 2,5$  cm ; 3,0 cm ; 3,8 cm ; 4,3 cm et 5 cm. Tous les paramètres utiles sont décrits dans le tableau III.1.

**Tableau III.1.** Gammes expérimentales des paramètres

Paramètres	Gammes
Première hauteur conjuguée ( $h_1$ )	2,5 - 5,0 cm
Deuxième hauteur conjuguée ( $h_2$ )	24,5 - 32,5 cm
Longueur du ressaut ( $L_j$ )	120 - 220 cm
Débit ( $Q$ )	9,9 - 19,0 l/s
Nombre de Froude Incident ( $F_1$ )	4,28 - 10,02
Rapport des largeurs ( $\tau_y$ )	0,25 - 0,5
Rapport des profondeurs ( $\tau_z$ )	0,167 - 0,333

### III.3.2. Approche théorique pour les hauteurs conjuguées

Après avoir analysé l'écoulement en utilisant l'équation de la quantité de mouvement, pour trouver la relation des profondeurs  $h_1$  et  $h_2$  du ressaut hydraulique, l'équation de l'énergie peut être utilisée pour trouver une fonction qui définit la perte d'énergie (Houichi et al., 2013).

Une équation théorique a été proposée par les auteurs, d'abord sans tenir compte de l'influence de  $F_x$ , et puis cette dernière est prise en considération en tenant compte d'une relation proposée supposée exprimée les valeurs de  $F_x$ .

Le premier cas permet d'écrire

$$F_1^2 = \frac{1 - \frac{(Y - 1/\tau_z)^2}{\tau_y} - \frac{(2Y - 1/\tau_z)}{\tau_z}}{2 \left( \frac{\tau_y}{Y - (1 - \tau_y)/\tau_z} - 1 \right)} \quad (\text{III.8})$$

Pour le deuxième cas,  $F_x$  est proportionnelle à  $(B-b)$  et à  $h_1$ .

Selon Achour (2000), un cas analogue à l'expression de Borda-Carnot, est raisonnablement donné par :

$$F_x = \rho g \frac{h_1}{2} (h_2 - z)(B - b) \quad (\text{III.9})$$

En rajoutant la force de résistance  $f_x$ , l'équation résultante devient :

$$F_1^2 = \frac{1 - \frac{(Y - 1/\tau_z)^2}{\tau_y} - \frac{(2Y - 1/\tau_z)}{\tau_z} - \left(\frac{1}{\tau_y} - 1\right) \left(Y - \frac{1}{\tau_z}\right)}{2 \left( \frac{\tau_y}{Y - (1 - \tau_y)/\tau_z} - 1 \right)} \quad (\text{III.10})$$

Si  $h_2 = z$  donc  $Y = 1/\tau_z$

Les équations. (III.8) et (III.10) deviennent :

$$F_1^2 = \frac{(\tau_z + 1)^{0,5}}{\sqrt{2\tau_z}} \quad (\text{III.11})$$

L'équation. (III.11) donne la valeur limite du nombre de Froude incident comme si le ressaut est dans un canal rectangulaire. Cette équation permet également de dessiner les courbes  $Y = f(F_1)$ , pour diverses valeurs de  $F_1$  conformément aux valeurs limites indiquées dans le tableau (III.2).

**Tableau III.2.** Valeurs limites du nombre de Froude incident selon  $\tau_z$  (Eq. (III.11))

$\tau_z$	0,167	0,200	0,253	0,287	0,333
$F_1$	4,583	3,873	3,125	2,798	2,449

#### III.4. La perte d'énergie relative

Après développement mathématique, dans les cas où  $F_x$  est négligeable et non négligeable, la perte d'énergie relative est donnée par l'équation. (III.12)

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2(Y/\tau_y - 1/\tau_z(1/\tau_y - 1))}}{1 + F_1^2/2} \quad (\text{III.12})$$

### III.5. Résultats et discussions

#### III.5.1. Validation de la relation des hauteurs conjuguées

La performance de chaque modèle (avec  $F_x$  et sans  $F_x$ ) est évaluée en utilisant les critères d'erreur quadratique moyenne (RMSE) et l'absolu de l'erreur relative maximale (ERMaxAb). Le RMSE est le critère de performance le plus couramment utilisé dans les processus de modélisation et la valeur idéale est zéro. Le RMSE est calculé sur la base du nombre des couples ( $n$ ) des valeurs théoriques ( $V_{th}$ ) et des valeurs expérimentales ( $V_{exp}$ ) comme suit :

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (V_{th} - V_{exp})^2}{n}} \quad (III.13)$$

Aussi,  $ERMaxAb$  donnée en (%) :

$$ERMaxAb = Max \left[ 100 \left| \frac{(V_{th} - V_{exp})}{V_{th}} \right| \right] \quad (III.14)$$

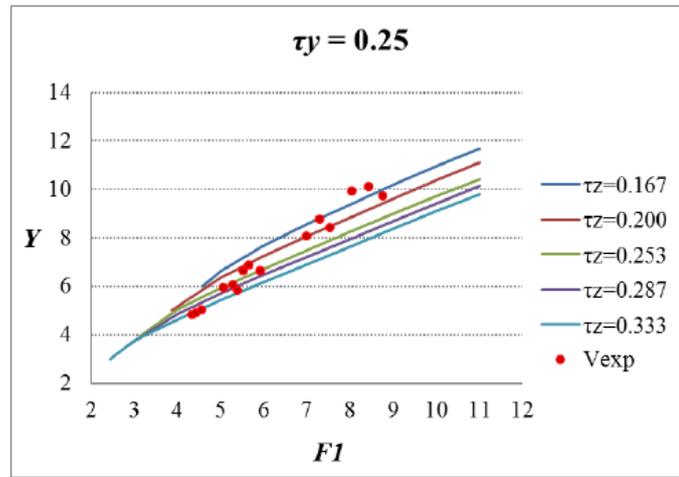
La validation expérimentale des équations. (III.8) et (III.10), est donnée par les résultats de l'application des critères de performance adoptés définis par les équations. (III.13) et (III.15). Ces résultats sont présentés dans le Tableau III.3.

**Tableau III.3.** Performances de chaque modèle selon les valeurs de  $\tau_y$  (Eqs. (III.13) et (III.15))

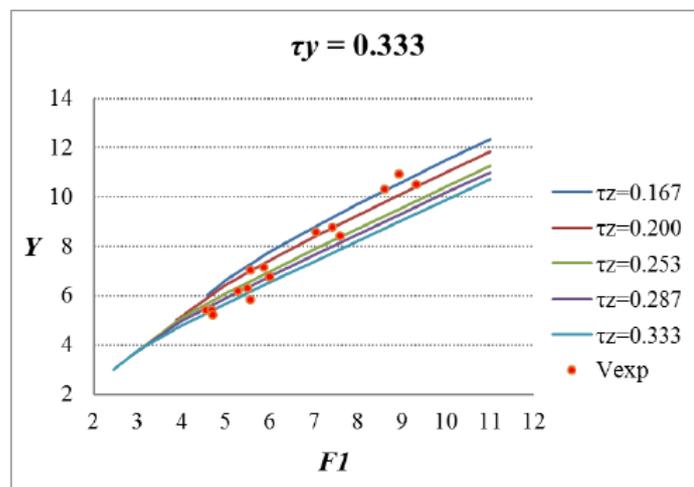
$\tau_z$	RMSE sans $F_x$	RMSE avec $F_x$	ERMaxAb sans $F_x$	ERMaxAb avec $F_x$
0,25	0,3041	0,5250	6,9	11,11
0,333	0,2794	0,4159	6,6	9,56
0,5	0,3814	0,3054	8,7	6,47

Le Tableau III.3, montre que les performances du modèle sont minimales lorsque le rapport  $\tau_y$  est égal à 0,5, en considérant la force  $F_x$ , donnée par l'approche de Borda-Carnot selon l'équation (III.9). Ce résultat est justifié par les valeurs minimales de RMSE et ERMaxAb qui sont respectivement de 0,3054 et 6,47. Compte tenu de cette déduction, les figures suivantes montrent l'ajustement des valeurs théoriques et expérimentales de  $Y$  en fonction de  $F_1$ .

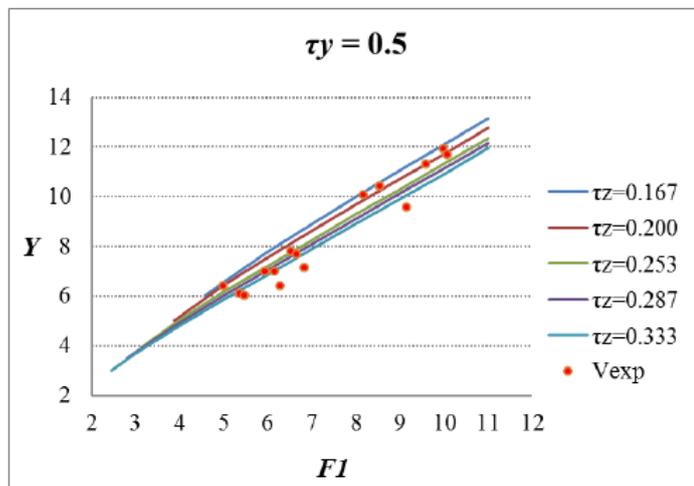
La figure (III.6) montre la variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  pour  $\tau_y = 0,25$  (sans  $F_x$ ), la figure (III.7) montre la variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  pour  $\tau_y = 0,333$  (sans  $F_x$ ) et la figure (III.8) montre la variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  pour  $\tau_y = 0,5$  (avec  $F_x$ ).



**Figure III.7 :** Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident pour  $\tau_y = 0,25$  (sans  $F_x$ )



**Figure III.8 :** Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident pour  $\tau_y = 0,333$  (sans  $F_x$ )



**Figure. III.9 :** Rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude incident pour  $\tau_y = 0,5$  (avec  $F_x$ )

### III.5.2. Validation de la relation de la perte d'énergie relative

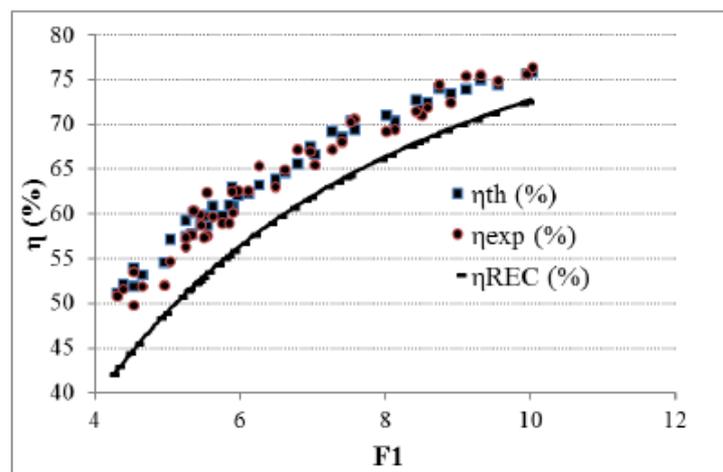
L'équation (III.12) permet de calculer explicitement la perte d'énergie relative du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire composé droit ; connaissant  $F_1$  et  $Y$  pour les différentes valeurs des taux  $\tau_y$  et  $\tau_z$ . Il est à noter que les valeurs de  $Y$  sont calculées dans un premier temps avec l'équation (III.8) pour  $\tau_y = 0,25$  et  $0,333$  ; deuxièmement avec l'équation (III.10) pour  $\tau_y = 0,5$ . Cette considération est requise par les conditions de validation des relations (III.8) et (III.10).

La perte d'énergie relative du ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire composé droit est tracée en fonction du nombre de Froude incident. Dans la gamme expérimentale du nombre de Froude entre 4 et 10, la perte d'énergie relative est comprise entre 51,4 % et 76,01 %.

Sur la même figure et dans les mêmes conditions d'écoulement hydraulique, la perte d'énergie relative équivalente dans un canal rectangulaire ( $\eta_{REC}$ ), selon l'équation. III.15 (Chow, 1981), est également donné à titre de comparaison.

$$\eta_{REC} = 1 - \frac{(8F_1^2 + 1)^{1,5} - 4F_1^2 + 1}{8F_1^2(2 + F_1^2)} \quad (III.15)$$

De plus, la figure III.9 montre que la dissipation d'énergie dans le canal composé dépasse de loin le canal rectangulaire, en effet, pour la des nombres de Froude  $F_1$  comprises entre 4 et 10, la perte d'énergie relative dans le canal rectangulaire est comprise entre 42,3% et 72,7%, ce qui reflète une dissipation améliorée de 6% en moyenne.



**Figure. III.10 :** Perte d'énergie relative en fonction du nombre de Froude incident ; Valeurs théoriques et expérimentales dans le canal composé rectangulaire droit et dans le canal rectangulaire

La figure III.10 montre l'évolution de la perte d'énergie relative théorique et expérimentale. Cette évolution est entourée de deux enveloppes (limites supérieure et inférieure) qui illustrent que la relation théorique ainsi établie est validée expérimentalement avec une erreur maximale ne dépassant pas 5%, soit exactement 4,83%.

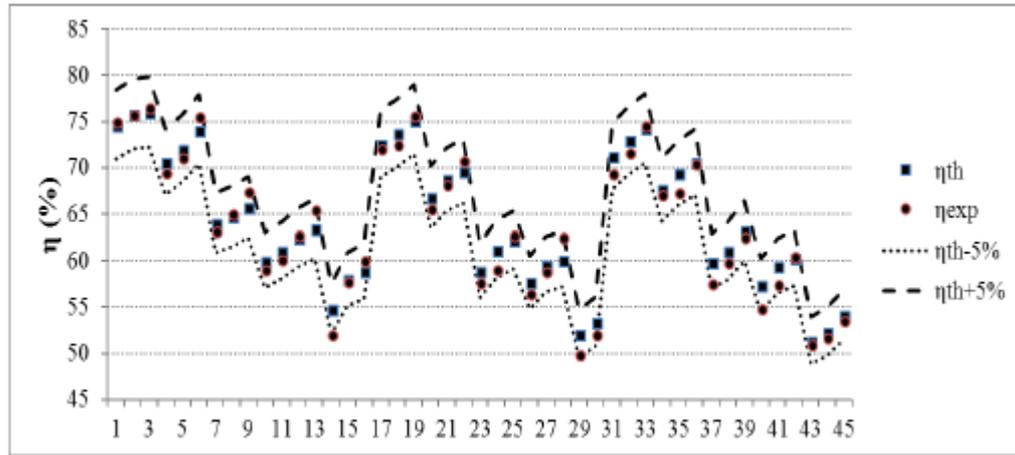


Figure. III.11 : Evolution de la perte d'énergie relative (valeurs théoriques et expérimentales), entre les deux limites de  $\pm 5\%$

### III.3. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons abordé, au premier lieu, les travaux de Khattaoui et Achour (2012). 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 la forme  $\phi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$ .

Une nouvelle approche a été proposée par Khattaoui et Achour (2012) 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 leurs développements, les valeurs de  $Y$  et  $\eta$  se sont révélées interdépendantes en augmentant ou en diminuant et se sont certainement rapprochées de la réalité.

Nous avons présenté par la suite l'approche de benabdesselam et Al (2017 et 2020), qui a été consacré à l'étude théorique et expérimentale du ressaut contrôlé par un seuil à paroi mince dans un canal rectangulaire composé droit. Les relations des hauteurs conjuguées ont été données avec et sans considération de la force volumique  $F_x$ , qui est assimilée par analogie à l'expression de Borda-Carnot. Des expériences ont été menées avec trois valeurs différentes du rapport  $\tau_y$  : rapport entre la largeur du lit mineur et celle du lit majeur. L'investigation expérimentale a prouvé la validité des relations théoriques élaborées sans la force  $F_x$  lorsque le rapport  $\tau_y$  est égal à 0,25 et 0,333 et avec la force  $F_x$  lorsque le rapport  $\tau_y$  est égal à 0,5.

Cette classification est basée sur les valeurs minimales de l'erreur quadratique moyenne et de l'erreur relative maximale erreur relative absolue, qui sont respectivement égales à 0,3054 et 6,47. La validation expérimentale de la perte d'énergie relative est élaborée et ne dépasse pas 4,83% comme erreur maximale. L'étude révèle également l'utilité du canal composé en termes de capacité de dissipation d'énergie lorsqu'il est comparé au canal rectangulaire de référence.

## CONCLUSION DE LA PREMIERE PARTIE

Cette partie bibliographique est dédiée à la présentation des travaux les plus importants, liés à notre thèse, relatifs au ressaut hydraulique évoluant dans les canaux prismatiques rectangulaire, à fond lisse horizontal.

A travers trois chapitres, on a essayé de présenter une synthèse bibliographique sur le ressaut hydraulique contrôlé et forcé par les trois types d'obstacle connue dans les canaux rectangulaire.

Le premier chapitre a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique et contrôler dans un canal de section droite rectangulaire de pente nulle.

Trois volets, ont été abordés :

Le premier volet concernant le ressaut hydraulique classique, nous avons examiné les travaux de *Bradley et Peterka (1957)* relatif à la forme du ressaut et ceux de *Hager et al. (1990)* liés aux caractéristiques du ressaut classique. Ces caractéristiques sont : sa hauteur conjuguée, sa longueur ainsi que la longueur de son rouleau. Il a été montré par la suite que le ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections initiale et finale. En négligeant les pertes de charges autres que celle dues au ressaut, cette équation mène à la relation de *Bélanger* qui exprime le rapport  $Y^*$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  à l'amont du ressaut. Ainsi, nous avons abordé l'étude de *Hager (1992)* concernant le profil de surface.

Le deuxième volet est consacré au ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince, nous avons cité l'étude de *Forster et Skrinde (1950)*, vise à définir la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $IF_1$  de l'écoulement incident, trois courbes expérimentales ont été obtenues correspondant chacune à une valeur de la position relative  $x/h_2$  du seuil ( $x/h_2 = 3, 5$  et  $10$ ), par la suite, on a examiné l'étude de *Achour et al (2002)*, qui ont arrivé de proposer des relations empiriques permettant le calcul de la hauteur relative  $S$  du seuil connaissant sa position relative  $x/h_2$  et le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.

Dans le troisième volet, on a présenté l'approche de *Forster et Skrinde (1950)*, les auteurs proposent une relation analytique implicite qui lie la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil au nombre de Froude  $IF_1$  ; Contrairement au cas du seuil mince, une seule courbe est alors obtenue. Ainsi que celle de *Achour et al (2002)*, Deux configurations ont été examinées, d'abord l'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est crée par la mise en place d'une vanne

de fond, le développement théorique a mené à l'établissement d'une relation explicite permettant d'évaluer la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $IF_1$ , et enfin par un déversoir standard, l'étude théorique a montré que le nombre de Froude  $IF_1$  est lié implicitement au paramètre adimensionnel  $S=1- s_2/s_1$  dans lequel  $s_2$  représente la hauteur géométrique du seuil épais et  $s_1$  celle du déversoir standard.

Le quatrième et dernier volet de ce chapitre a examiné l'étude de *Forster et Skrinde (1950)*, concernant le contrôle du ressaut par marche positive, une analyse a permis aux auteurs de mettre en place les conditions d'écoulement associées aux niveaux aval variable.

Le deuxième chapitre de la partie bibliographique a traité le ressaut hydraulique forcé dans un canal rectangulaire, Deux types de ressaut forcé ont été alors abordés.

Le ressaut hydraulique forcé par seuil mince, Nous avons présenté en premier lieu les travaux de *Rand (1957)*, lié à la classification de ceux-ci, Trois types de ressaut forcé par seuil sont retenus, et traités en détail par *Bretz (1988)*. Il s'agit des ressauts type A, type B, et type B-min. Des courbes, représentant le rapport des hauteurs conjuguées  $Y_F$  pour les trois types de ressaut, sont tracées et indiquent que le type A fournit les rapports  $Y_F$  les plus élevés, le type B-min les moins élevés et le type B des valeurs intermédiaires. Le rapport  $Y_F$  des hauteurs conjuguées dépend du nombre de Froude  $IF_1$  et de la hauteur relative  $S$  du seuil.

Les longueurs relatives du bassin et de la position du seuil par rapport au pied du ressaut, sont peu dépendantes de la hauteur relative  $S$  du seuil. Elles se ramènent à des fonctions linéaires  $\lambda = f(F_1)$  pour les trois types de ressaut forcé. Les longueurs sont maximales pour le type A, minimales pour le type B-min et intermédiaire pour le type B. Nous avons enfin présenté les travaux de *Hager et LI (1992)* qui analysent les points de mesures de *Bretz (1988)* et montre que la réduction  $\Delta Y_s = Y^* - Y$  du niveau aval due à la présence du seuil peut s'exprimer en fonction de la hauteur relative  $S=s/h_1$  et de la position relative  $\Lambda = L_s/Lr^*$  du seuil. Ils définissent la longueur du bassin comme égale au moins à la distance qui sépare le début du ressaut de la fin du rouleau de fond. La longueur relative  $\Lambda_B = L_B/Lr^*$  peut également s'exprimer en fonction de  $S$  et de  $\Lambda$ .

Les auteurs présentent le ressaut forcé par seuil, comparé au ressaut classique, comme plus avantageux par une hauteur aval moindre, un bassin plus court et une efficacité plus grande.

Le ressaut hydraulique forcé par marche positive, Nous avons abordé, en premier lieu les travaux de *Hager et Sinniger (1986)*, les auteurs montrent que le rapport des hauteurs conjuguées varie en fonction du nombre de Froude amont  $F_1$  et de la hauteur adimensionnelle

de la marche  $S=s/h_1$  ; par la suite *Hager et Bretz (1987)* montre que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude  $F_1$ . La dissipation relative d'énergie  $\eta = \Delta H / H_1$  est définie par la perte de charge  $\Delta H$  à travers le ressaut hydraulique comparée à l'énergie amont, soit  $H_1=h_1+q^2/(2gh_1^2)$ . Les auteurs montrent que l'efficacité relative minimale est donnée par le ressaut hydraulique type A est celle la plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique type B-min sur marche négative.

L'étude expérimentale, a permis aux auteurs de conclure enfin que la marche positive offre un bassin d'amortissement plus court.

Le troisième et dernier chapitre de la partie bibliographique a traité le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composé. La première étude est celle de *Khattaoui et Achour (2012)*, qui ont montré que l'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire droit composé à aboutit à une équation fonctionnelle de la forme  $\phi (F_1, Y, \beta, \tau) = 0$ .

En se basons sur du développement théorique supervisé par *Achour (2000)* sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, et en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal, les auteurs ont pu développer une nouvelle approche.

Après l'injection de cette force dans leurs développements, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  et du rendement  $\eta$  se sont révélées interdépendantes en augmentant ou en diminuant et se sont certainement rapprochées de la réalité.

La deuxième étude intéressante dans ce contexte est celle de *benabdesselam et Al (2017 et 2020)*. Les auteurs proposent une relation théorique des hauteurs conjuguées avec et sans considération de la force volumique  $F_x$ , qui est assimilée par analogie à l'expression de Borda-Carnot. Des expériences ont été menées avec trois valeurs différentes du rapport  $\tau_y$  : rapport entre la largeur du lit mineur et celle du lit majeur. L'investigation expérimentale a prouvé la validité des relations théoriques élaborées sans la force  $F_x$  lorsque le rapport  $\tau_y$  est égal à 0,25 et 0,333 et avec la force  $F_x$  lorsque le rapport  $\tau_y$  est égal à 0,5. Cette classification est basée sur les valeurs minimales de l'erreur quadratique moyenne et de l'erreur relative maximale erreur relative absolue, qui sont respectivement égales à 0,3054 et 6,47. La validation expérimentale de la perte d'énergie relative est élaborée et ne dépasse pas 4,83% comme erreur maximale. L'étude révèle également l'utilité du canal composé en termes de capacité de dissipation d'énergie lorsqu'il est comparé au canal rectangulaire de référence.

## *Deuxième Partie*

Etude expérimentale du ressaut  
hydraulique évoluant dans un  
canal rectangulaire de section  
composée

## INTRODUCTION A LA DEUXIEME PARTIE

La deuxième partie de notre étude, concernera notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée, par voie expérimentale.. L'objectif de notre étude est de déterminer les caractéristiques essentielles intervenant dans le ressaut hydraulique contrôlé et forcé dans le canal rectangulaire composé. Ces caractéristiques sont formulées sous forme de rapport adimensionnel, afin de déterminer les dimensions des ouvrages annexes des barrages tel que les bassins d'amortissement dans le domaine pratique.

Deux chapitres seront alors nécessaires. Le premier chapitre abordera l'étude expérimentale de ressaut hydraulique contrôlé, tandis que le dernier chapitre s'intéressera au ressaut hydraulique forcé de type A.

✓ Le premier chapitre de cette partie de notre étude sera consacré à l'étude des caractéristiques de ressaut hydraulique contrôlé. Cette étude aura pour objectif de déterminer l'effet du lit majeur sur le ressaut hydraulique dans le canal rectangulaire composé et de trouver les relations expérimentales exprimant la variation des paramètres adimensionnels intervenant dans ce type de ressaut.

Quatre volets seront alors étudiés :

- Le premier volet correspondra à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par seuil mince.
- Le deuxième volet s'intéressera à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par seuil à paroi épaisse.
- Le troisième volet sera consacré à l'étude expérimentale du ressaut contrôlé par marche positive.
- Le quatrième et dernier volet de ce chapitre sera consacré à l'étude comparative des trois types de ressaut hydraulique expérimenté.

✓ Le deuxième et dernier chapitre de cette partie s'intéressera à l'étude expérimentale de ressaut hydraulique forcé type A. De même que pour le ressaut contrôlé, des relations fonctionnelles, en termes adimensionnels, liant les différentes caractéristiques du ressaut seront également proposées. Une étude comparative entre les deux types de ressaut hydraulique précités sera effectuée.

Egalement quatre volets seront alors nécessaires :

- Le premier volet examinera le ressaut forcé type A par seuil mince.
- Le deuxième volet s'intéressera à l'étude du ressaut forcé type A par seuil a paroi épaisse.
- Le troisième volet sera consacré à l'étude du ressaut forcé type A par marche positive.
- Le quatrième et dernier volet de ce chapitre sera consacré à l'étude comparative entre les caracteristiques de ressaut controlé et forcé type A.

# *Chapitre I*

Ressaut hydraulique contrôlé  
dans un canal rectangulaire de  
section composée

## **CHAPITRE I**

### ***Ressaut hydraulique contrôlé dans un canal Rectangulaire de section composée***

#### **I.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*). La mise en place d'un seuil n'a pas d'effet réducteur significatif sur le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut (*Achour et Al, 2002*).

A travers cette étude, nous voulons examiner par voie expérimentale le contrôle du ressaut hydraulique par un seuil à parois mince, à parois épaisse et par une marche positive dans un canal rectangulaire de section composée d'une pente nulle. L'étude a pour objectif de faire une étude comparative entre les caractéristiques des trois types de ressaut expérimentés.

Trois sous chapitres seront abordés dans ce chapitre, à savoir : le ressaut contrôlé par seuil mince, le ressaut contrôlé par seuil épais et le ressaut contrôlé par marche positive.

#### **I.2. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ PAR SEUIL MINCE EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE**

##### **I.2.1. Description du modèle**

###### **I.2.1.1. Description du canal**

Le modèle expérimental (figures I.1 et photo I.1 (a, b, c)) est constitué d'un grand canal métallique de section droite rectangulaire, relié à un bassin d'accumulation (photo I.6), par le moyen d'une conduite en PVC de 115 mm de diamètre, dans lequel est insérée une pompe axiale (photo I.5) débitant jusqu'à 44 l/s. La conduite de PVC est reliée à une boîte métallique fermée (photo I.3), sur laquelle est inséré un convergent en tôle de section rectangulaire (photo I.2) débouchant dans le canal de mesure. Le rôle de ce dernier est de générer un écoulement incident à grande vitesse. La section de sortie de celle-ci est variable et sa hauteur correspondra à la hauteur initiale  $h_1$  du ressaut.

Le canal de mesure (photo I.1) qui nous a servi de banc d'essai est de section droite rectangulaire. Il est constitué essentiellement par une structure métallique rigide de 12 m de longueur, ayant une hauteur de 0,6 m et une largeur de 0,6 m. Ces parois latérales sont en verre, sur lesquelles sont fixés latéralement, des deux côtés des panneaux transparents en plexiglas permettant les prises de vue et l'observation d'une forme rectangulaire, Ces panneaux constituent d'un côté les parois latérales du canal rectangulaire et de l'autre côté le

radier de la partie composée. Elle est caractérisée par une largeur de lit mineur  $b=20$  cm, de hauteur  $h=20$  cm et de lit majeur  $B=60$  cm, de longueur 5m, permettant la mesure directe du débit. Le réglage des débits volumes s'effectue par manipulation de la vanne (photo IV.4) et sont mesurés à l'aide d'un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (photo I.7) placé à l'aval du canal rectangulaire. Le tout fonctionne en circuit fermé.

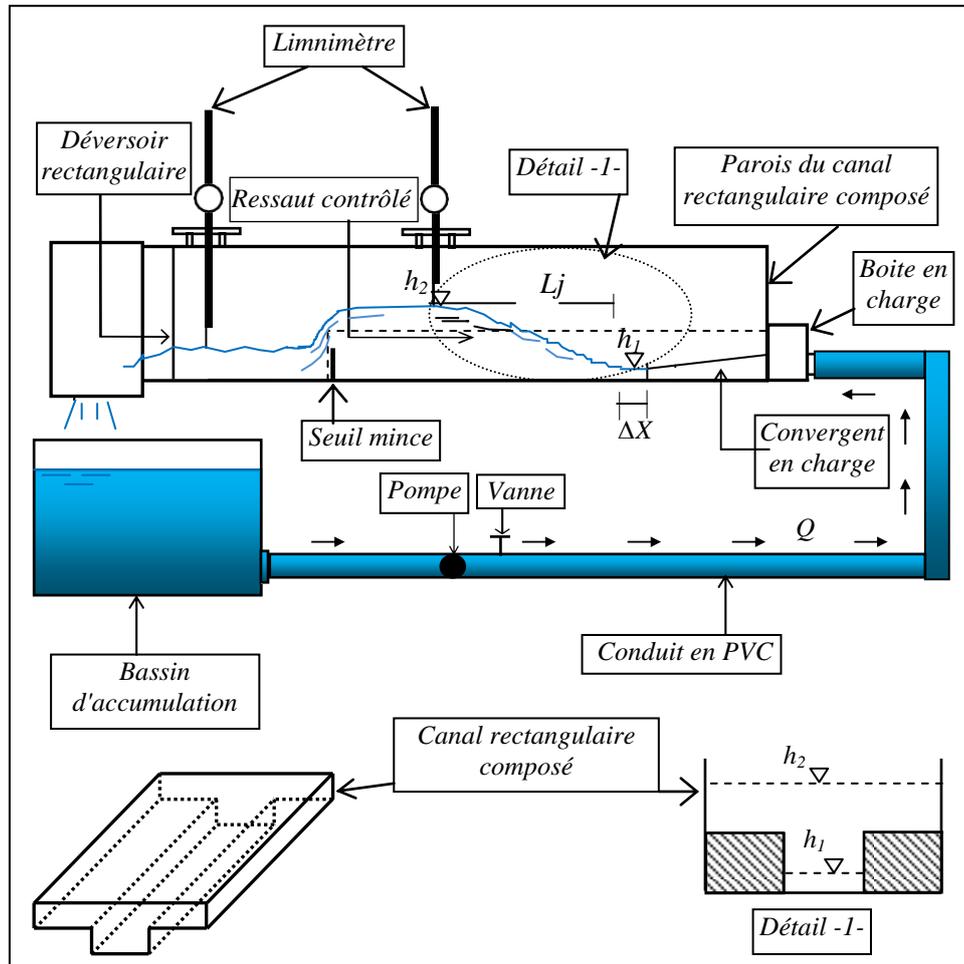


Figure I.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composée, ayant servi à l'expérimentation.



(a)

(b)

(c)

Photos I.1 (a, b, c): Photographie du canal de mesure utilisé.



*Photo I.2 : Photographie d'une série de convergents.*



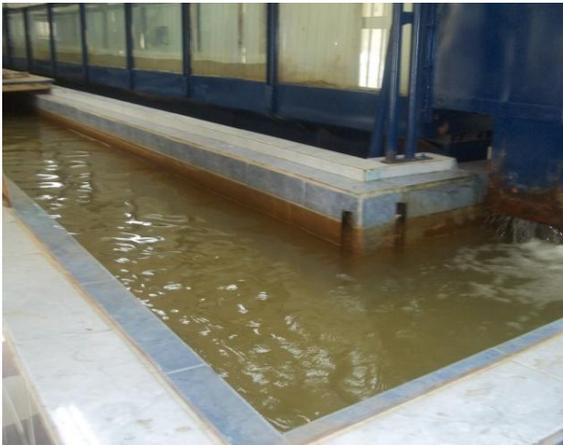
*Photo I.3 : Photographie de la boîte en charge.*



*Photo I.4 : Photographie d'une vanne de régulation du débit.*



*Photo I.5 : Photographie d'une Pompe centrifuge.*



*Photo I.6 : Photographie du bassin d'accumulation.*



*Photo I.7 : Photographie du déversoir rectangulaire.*

### I. 2.1.2. Mesure du débit

Comme il a été cité précédemment, un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle avec contraction latérale (photo I.7), réalisé et testé par *Hachemi Rachedi (2006)* est placé à l'aval du canal rectangulaire de largeur 0.6m et de hauteur 0.6 m, permettant la détermination du débit volume  $Q$  par l'injection des hauteurs déversantes ( $h$ ) dans la formule (I.1), en assurant la condition d'application de celle ci qui est :

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

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g\beta} \left(1 + 0,16496.B^{2,0716}\right)^{3/2} h_{dev}^{3/2} \quad (I.1)$$

Avec :

$Q$  : le débit en ( $m^3/s$ );

$B$ : la largeur du canal en (m) ;

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

$\beta$  : Rapport de forme ;

$b$  : largeur de l'échancrure ;

$h$  : la hauteur de la lame d'eau.

### I. 2.1.3. Limnimétrie

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

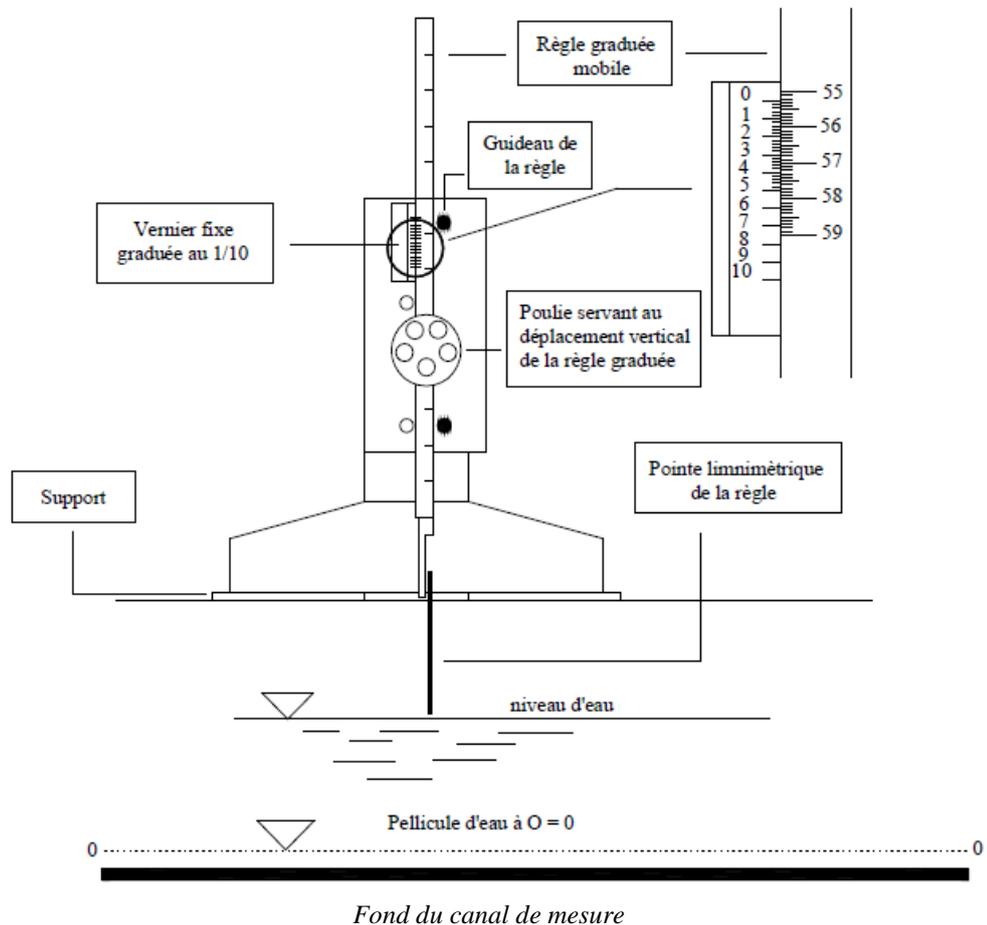
L'outil est constitué d'une règle métallique mobile qui se termine à sa partie inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) dont le rôle est d'affleurer la surface de l'eau (figure I.2 et photo I.8).

La lecture sur le limnimétrie s'effectue en deux étapes :

On procède d'abord à la lecture de la graduation sur la règle, située immédiatement en haut du zéro du vernier, puis on effectue la lecture du nombre de cinquantième en face de la division qui coïncide ou qui est la plus proche d'une division de la règle.



*Photo. I.8 : pointe limnimétrique.*



*Figure I.2 : Mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique.*

### I.2.1.4. les Seuils minces

Une série de 19 seuils métalliques de forme rectangulaire (photo I.9) utilisés dans notre dispositif expérimental, de différentes hauteurs:  $s = 2 \text{ cm} ; 3 \text{ cm} ; 4 \text{ cm} ; 5 \text{ cm} ; 6 \text{ cm} ; 7 \text{ cm} ; 8 \text{ cm} ; 9 \text{ cm} ; 10 \text{ cm} ; 11 \text{ cm} ; 12 \text{ cm} ; 13 \text{ cm} ; 14 \text{ cm} ; 15 \text{ cm} ; 16 \text{ cm} ; 17 \text{ cm} ; 18 \text{ cm} ; 19 \text{ cm} ; 20 \text{ cm}$ , fixé à l'aval du canal rectangulaire composé. Dont le but est d'obtenir un nombre important de points de mesures.



Photo I.9 : Photographie de la série de seuils.

## I.2.2. Résultats expérimentaux

### I.2.2.1. Position du problème

L'augmentation de débit engendre le déplacement du ressaut vers l'aval. Pour maintenir le ressaut à sa place en amont du canal on augmente la hauteur de seuil à l'aval du canal. Celle-ci engendre l'augmentation de la hauteur final  $h_2$ .

Dans notre canal l'écoulement s'effectue en deux catégories ; le premier cas où l'écoulement s'effectue au niveau de la partie rectangulaire où ( $h_0/h_2 \geq 1$ ), le deuxième cas quand le niveau d'eau dépasse la partie rectangulaire et l'écoulement se produit au niveau de la partie composée du canal où ( $h_0/h_2 < 1$ ). (Figure I.3).

L'objectif de cette distinction est de découvrir l'effet de la partie supérieure élargie du canal composé sur les caractéristiques de l'écoulement.

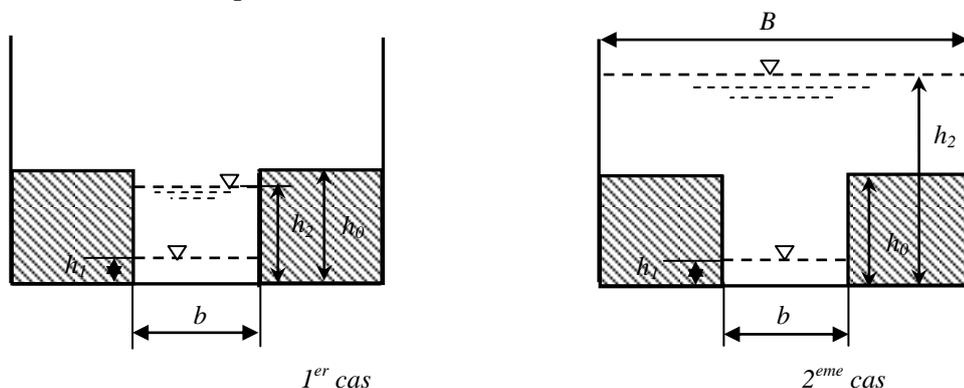


Figure I.3 : configuration du ressaut en canal rectangulaire composé.

### I.2.2.2. Procédure expérimentale

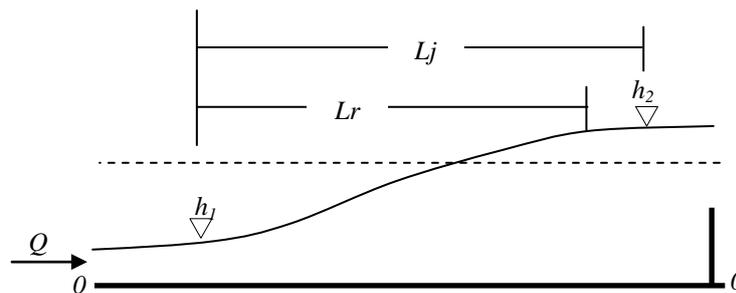
Les caractéristiques étudiées dans un ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince sont: le débit volume ( $Q$ ), la hauteur initiale  $h_1$ , mesurée au pied de ressaut, la hauteur finale  $h_2$ , mesurée au droit de la longueur du ressaut, la hauteur ( $s$ ) du seuil, la longueur ( $L_r$ ) du rouleau, mesurée à la fin de la formulation du ressaut et la longueur ( $L_j$ ) du ressaut, mesurée dans le même endroit de la hauteur finale ( $h_2$ ).

Celles-ci sont formulées sous forme adimensionnelle pour composer les rapports suivants : le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées du ressaut, la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil, la longueur relative du ressaut  $\lambda_j = L_j/h_1$  du ressaut et la longueur relative du rouleau  $\lambda_r = L_r/h_1$ .

L'étude expérimentale a été menée sous cinq hauteurs initiales :  $h_1$  (mm) = 20 ; 25 ; 30 ; 35 et 40mm. Une gamme assez pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue :  $2,64 < F_1 < 11,58$ .

L'accroissement du nombre de Froude  $F_1$  entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval ainsi que l'augmentation des longueurs  $L_r$  du rouleau et ( $L_j$ ) du ressaut. Pour ramener le pied du ressaut à sa position d'origine (à la sortie de l'écoulement), il est nécessaire d'augmenter la hauteur du seuil se trouvant à l'extrémité aval du canal.

Les photos I.10 et I.11 illustrent deux configurations typiques de ressaut contrôlé par seuil mince en canal rectangulaire de section composée, pour la même hauteur initiale  $h_1 = 25$  mm et à débit volume croissant.



**Figure I.4 :** Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire composé.



**Photo I.10:** Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince  
 $F_1 = 5,58$ ;  $s = 6$  cm;  $L_j = 103$  cm;  $h_2 = 15,8$  cm ;  $h_1 = 2,5$  cm



**Photo I.11 :** Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince  
 $F_1 = 8,24$ ;  $s = 15$  cm;  $L_j = 186$  cm;  $h_2 = 24,9$  cm ;  $h_1 = 2,5$  cm

Pour obtenir les résultats expérimentaux, nous avons suivi les étapes suivantes :

Mesure de la hauteur géométrique  $s$  du seuil ;

Mesure de la longueur  $L_r$  du rouleau ;

Mesure de la longueur  $L_j$  du ressaut ;

Mesure de la hauteur conjuguée aval  $h_2$  du ressaut ;

Mesure de la lame d'eau au-niveau du déversoir rectangulaire à paroi latérale;

Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation (I.1) ;

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

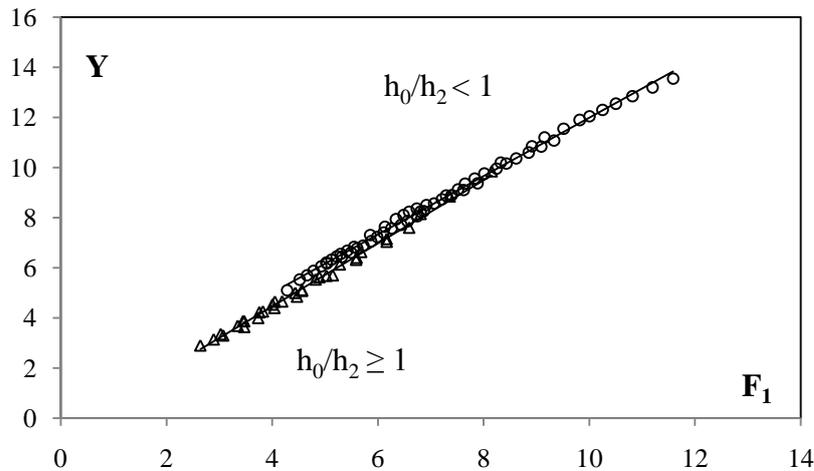
$$F_1 = \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2h_1^3}};$$

### I.2.3. Analyse des résultats expérimentaux

L'objectif principal de cette étude est d'examiner l'influence de la section composée, sur les caractéristiques hydrauliques du ressaut hydraulique.

#### I.2.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$

La représentation graphique des résultats expérimentaux, des paramètres de la fonction  $Y = f(F_1)$ , est donnée par la Figure (I.5). Ces paramètres adimensionnels sont le rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  et le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure. I.5.** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal, (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

Cette figure montre que le rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées augmente progressivement avec l'augmentation du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal.

L'ajustement des valeurs expérimentales, a montré que la loi de variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  est de type linéaire, telle que :  $Y = f(F)$ .

Les mesures expérimentales que nous avons réalisées montrent clairement un décalage entre les valeurs de  $Y$  du ressaut contrôlé par seuil mince, pour les mêmes nombres de Froude  $F_1$ , pour les deux lits du canal.

En effet, pour des nombres de Froude  $F_1$  inférieure à 8,15, le rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  du ressaut contrôlé par seuil dans le lit mineur est nettement inférieur à celui du ressaut contrôlé par seuil dans le lit majeur du canal.

Tel que :

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad Y = 1,258 F_1 - 0,573 \quad ; \quad R^2=0,995 \quad (I.2)$$

$$2,64 < F_1 < 8,14$$

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad Y = 1,165 F_1 + 0,328 ; \quad R^2=0,995 \quad (I.3)$$

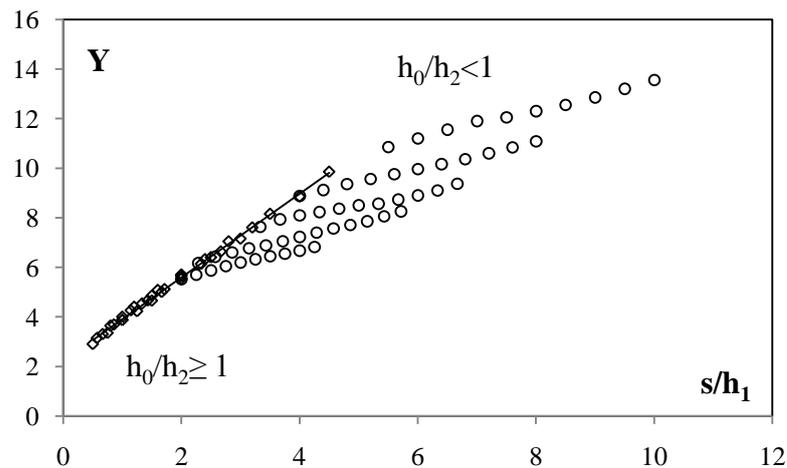
$$4,27 < F_1 < 11,58$$

Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y = f(F_1)$  pour les deux cas, sont regroupées dans le tableau (Tableau I.1) :

**Tableau I.1.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Y$	$F_1$	$Y$	$F_1$	$Y$	$F_1$
2,9	2,6400014	5,1	4,2797932	8,7333333	7,2072352
3,1428571	2,8927873	5,525	4,514485	8,88	7,2885611
3,35	3,0249997	5,7	4,6572917	8,9	7,3925056
3,3	3,073473	5,875	4,7774245	9,12	7,5118986
3,6857143	3,3471708	6,05	4,9229237	9,1	7,6168893
3,875	3,4487047	6,1714286	5,0312454	9,36	7,6469757
3,64	3,4703719	6,2	5,0207284	9,3666667	7,8814813
3,8666667	3,4703719	6,325	5,1191723	9,56	7,8283222
4	3,7338767	6,45	5,2182513	9,76	8,0110801
4,225	3,7561242	6,55	5,292975	9,96	8,2414955
4,2571429	3,8231304	6,4285714	5,3143896	10,2	8,3226541
4,4	4,0401851	6,675	5,4182987	10,16	8,4273896
4,5333333	4,0037325	6,6	5,4867399	10,36	8,6146607
4,65	4,0493155	6,825	5,5445963	10,6	8,8506707
4,6571429	4,1870921	6,7714286	5,6026546	10,85	8,9100047
4,85	4,4672131	6,8857143	5,7193742	10,84	9,0887975
5	4,4357908	7,0571429	5,8663974	11,2	9,1486577
5,08	4,5619224	7,3	5,8516392	11,08	9,3290223
5,1142857	4,5619224	7,2285714	5,9849082	11,55	9,5105569
5,6285714	4,8916229	7,4	6,1042066	11,9	9,8156941
5,5333333	4,8176949	7,6333333	6,129159	12,05	10,000312
5,68	5,0256354	7,5714286	6,254429	12,3	10,248247
5,7	5,1438827	7,9333333	6,3400938	12,55	10,498197
6,1333333	5,2763391	7,7142857	6,4362955	12,85	10,813446
6,32	5,5852159	8,1	6,482033	13,2	11,195825
6,4	5,5953862	7,8571429	6,5585016	13,55	11,582608
6,6333333	5,6803786	8,2333333	6,5891727		
7,15	6,1641494	8,0571429	6,7432415		
7,04	6,1641494	8,24	6,8052006		
7,6	6,5891727	8,3666667	6,7329333		
8,15	6,8052006	8,2571429	6,8673483		
8,85	7,3553262	8,5	6,9140825		
9,85	8,1490681	8,5666667	7,0601517		

La figure I.6. Montre la variation de Y en fonction de la hauteur relative du seuil  $S=s/h_1$ .



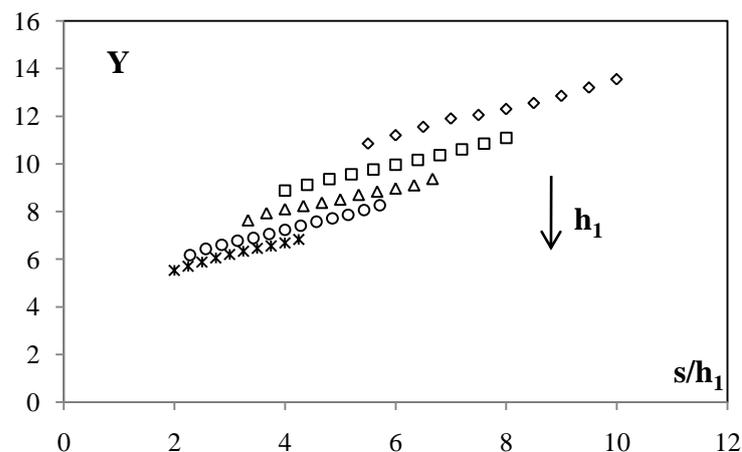
**Figure. I.6.** Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil. (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (◇) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustements.

Cette figure montre la variation du rapport Y en fonction du seuil relatif S. On remarque en premier lieu que tous les points de mesure dans le lit mineur ( $h_0/h_2 \geq 1$ ) sont alignés par une seule allure, sans effet de l'ouverture. Ainsi l'ajustement par la méthode des moindres carrés de ces mesures est de type linéaire tel que :  $Y = a (s/h_1) + b$

$$Y = 1,684 s / h_1 + 2,226 ; R^2=0,997 \quad (I.4)$$

En deuxième lieu la figure montre cinq allures distinctes chacune correspond à une ouverture bien déterminée, qui reflète l'écoulement qui se manifeste dans le lit majeur ( $h_0/h_2 < 1$ ).

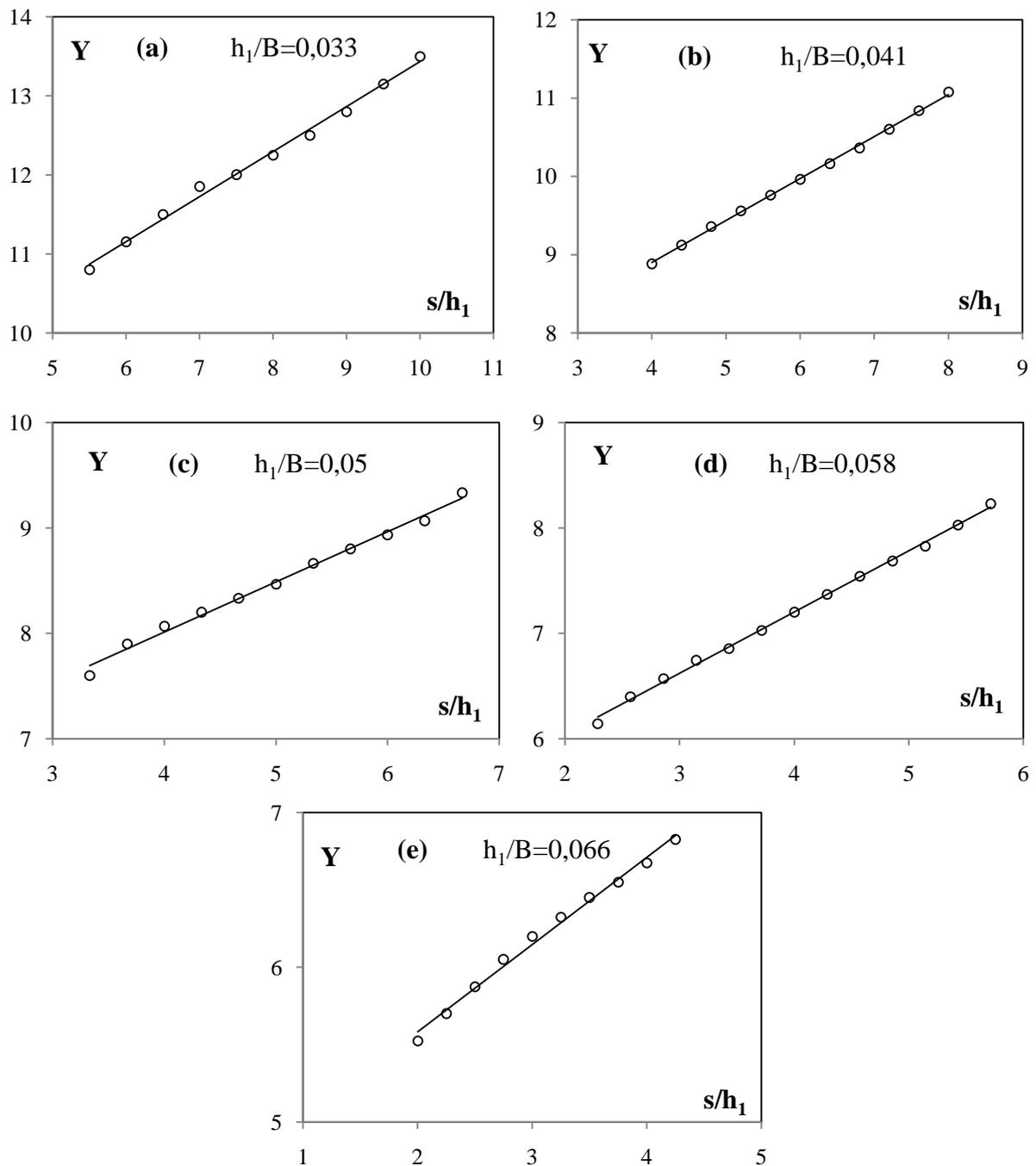
La figure I.7 montre la variation de Y en fonction de la hauteur relative  $S=s/h_1$  du seuil.



**Figure. I.7.** Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil Pour  $h/h_2 < 1$ . (◇)  $h_1=2\text{cm}$  ; (□)  $h_1=2,5\text{cm}$  ; (Δ)  $h_1=3\text{cm}$  ; (○)  $h_1=3,5\text{cm}$  ; (\*)  $h_1=4\text{cm}$ .

La figure montre une série de cinq allures superposées chaque allure correspond à une hauteur  $h_1$  d'une ouverture bien déterminée. On remarque que le rapport  $Y$  augmente avec l'augmentation du rapport  $S$ . Ainsi, pour la même valeur de seuil relative  $S$ , le rapport  $Y$  diminue avec l'augmentation des ouvertures.

Les figures I.8. (a, b, c, d, e) montrent la variation de  $Y$  en fonction de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil, pour les cinq ouvertures, tels que :  $h_1/B = 0,033, 0,041, 0,05, 0,058, 0,066$ .



**Figure. I.8. (a, b, c, d, e).** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil respectivement pour  $h_1/B = (0,03 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066)$ .

(o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.

Selon les figures I.8. (a, b, c, d, e), l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport  $Y$  en fonction de la hauteur relative du seuil suit une loi de type linéaire de la forme  $Y = a (s/h_1) + b$ .

Les données ayant servi au traçage des figures I.8 (a, b, c, d, e) sont groupées au tableau I.2.

**Tableau I.2.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y = f(s/h_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Y$	$s/h_1$	$Y$	$s/h_1$	$Y$	$s/h_1$
2,9	0,5	5,525	2	9,12	4,4
3,14285714	0,57142857	5,7	2,25	9,1	6,33333333
3,35	0,75	5,875	2,5	9,36	4,8
3,3	0,66666667	6,05	2,75	9,36666667	6,66666667
3,68571429	0,85714286	6,17142857	2,28571429	9,56	5,2
3,875	1	6,2	3	9,76	5,6
3,64	0,8	6,325	3,25	9,96	6
3,86666667	1	6,45	3,5	10,16	6,4
4	1	6,55	3,75	10,36	6,8
4,225	1,25	6,42857143	2,57142857	10,6	7,2
4,25714286	1,14285714	6,675	4	10,85	5,5
4,4	1,2	6,6	2,85714286	10,84	7,6
4,53333333	1,33333333	6,825	4,25	11,2	6
4,65	1,5	6,77142857	3,14285714	11,08	8
4,65714286	1,42857143	6,88571429	3,42857143	11,55	6,5
4,85	1,5	7,05714286	3,71428571	11,9	7
5	1,66666667	7,22857143	4	12,05	7,5
5,08	1,6	7,4	4,28571429	12,3	8
5,11428571	1,71428571	7,63333333	3,33333333	12,55	8,5
5,62857143	2	7,57142857	4,57142857	12,85	9
5,53333333	2	7,93333333	3,66666667	13,2	9,5
5,68	2	7,71428571	4,85714286	13,55	10
5,7	2	8,1	4		
6,13333333	2,33333333	7,85714286	5,14285714		
6,32	2,4	8,23333333	4,33333333		
6,4	2,5	8,05714286	5,42857143		
6,63333333	2,66666667	8,36666667	4,66666667		
7,15	3	8,25714286	5,71428571		
7,04	2,8	8,5	5		
7,6	3,2	8,56666667	5,33333333		
8,15	3,5	8,73333333	5,66666667		
8,85	4	8,88	4		
9,85	4,5	8,9	6		

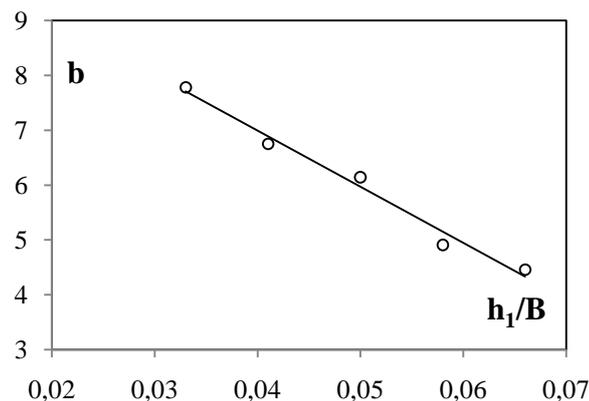
Le tableau I.3 regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées à la hauteur relative du seuil  $s/h_1$ , pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

**Tableau I.3.** Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant  $Y$  à la hauteur relative du seuil pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures

$h_1/B$	$a$	$b$	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	0,569	7,784	$Y = 0,569 s/h_1 + 7,784$	0,993
0,041	0,536	6,752	$Y = 0,536 s/h_1 + 6,752$	0,998
0,05	0,476	6,139	$Y = 0,476 s/h_1 + 6,139$	0,991
0,058	0,581	4,905	$Y = 0,581 s/h_1 + 4,905$	0,998
0,066	0,563	4,458	$Y = 0,563 s/h_1 + 4,458$	0,992

Selon le tableau I.3, l'ajustement des relations expérimentales liant le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées à la hauteur relative du seuil  $s/h_1$ , pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures, sont de type linéaire, telle que :  $Y = a X + b$ .

Les valeurs des paramètres 'a' sont presque égales, et leur moyenne arithmétique est  $a = 0,545$ . tandis que la figure I.9 montre l'ajustement statistique des couples de valeurs ( $b, h_1/B$ ) par la méthode des moindres carrés.



**Figure I.9 :** Variation du paramètre 'b' en fonction de  $h_1/B$ .

Les figures I.9 montrent clairement que la variation de  $b$  en fonction du coefficient d'élargissement  $Y_1 (h_1/B)$  suit une loi linéaire, selon la relation suivante:

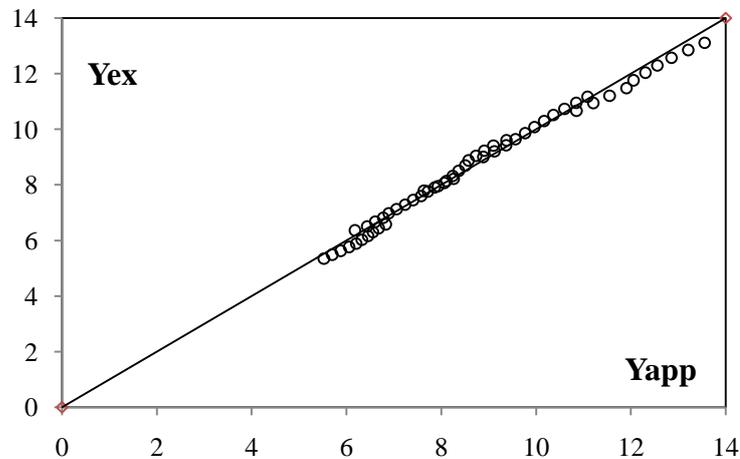
$$b = -102,3 h_1 / B + 11,08; R^2 = 0,982 \quad (\text{I.5})$$

En remplaçant les paramètres (a) et (b) par leurs expressions respectives dans la relation  $Y = a (s/h_1) + b$ , on obtient la relation générale suivante :

$$Y = 0,545 s / h_1 - 102,3 h_1 / B + 11,08 \quad (\text{I.6})$$

$$4,27 \leq F_1 \leq 11,58 \text{ et } 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066$$

La figure I.10 confirme que la relation (I.6) représente un bon ajustement pour la détermination de la hauteur relative  $Y$  du ressaut, connaissant la hauteur du seuil et le coefficient d'élargissement  $h_1/B$ .



**Figure I.10.** Variation de  $Y_{exp}$  en fonction de  $Y_{app}$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $Y_{exp} = Y_{app}$ .

La figure I.10 montre que les points issus de l'équation (I.6) se répartissent de manière quasi uniforme autour de la première bissectrice.

Les écarts relatifs entre les mesures expérimentales du rapport des hauteurs conjuguées et celles issues de l'équation globale d'ajustement (I.6) sont mentionnés au tableau I.4, en vue de justifier la fiabilité de cette dernière. Le tableau I.4, montre clairement que les erreurs relatives sont en majorité inférieures à 5%.

**Tableau I.4.** Ecart relatif entre  $Y$  expérimental et  $Y$  de la relation (I.6).

$Y_{exp}$	$Y_{relation}$	$\Delta Y/Y$ en %	$Y_{exp}$	$Y_{relation}$	$\Delta Y/Y$ en %
5,525	5,35	3,16742081	8,5	8,69	-2,23529412
5,7	5,48625	3,75	8,56666667	8,87166667	-3,56031128
5,875	5,6225	4,29787234	8,73333333	9,05333333	-3,66412214
6,05	5,75875	4,81404959	8,88	8,9975	-1,3231982
6,17142857	6,35821429	-3,02662037	8,9	9,235	-3,76404494
6,2	5,895	4,91935484	9,12	9,2155	-1,04714912
6,325	6,03125	4,64426877	9,1	9,41666667	-3,47985348
6,45	6,1675	4,37984496	9,36	9,4335	-0,78525641
6,55	6,30375	3,75954198	9,36666667	9,59833333	-2,47330961
6,42857143	6,51392857	-1,32777778	9,56	9,6515	-0,95711297
6,675	6,44	3,52059925	9,76	9,8695	-1,12192623
6,6	6,66964286	-1,05519481	9,96	10,0875	-1,28012048
6,825	6,57625	3,64468864	10,16	10,3055	-1,43208661
6,77142857	6,82535714	-0,7964135	10,36	10,5235	-1,57818533
6,88571429	6,98107143	-1,38485477	10,6	10,7415	-1,33490566
7,05714286	7,13678571	-1,12854251	10,85	10,6675	1,68202765

**Tableau I.4. (suite et fin)** Ecart relatifs entre  $Y$  expérimental et  $Y$  de la relation (I.6).

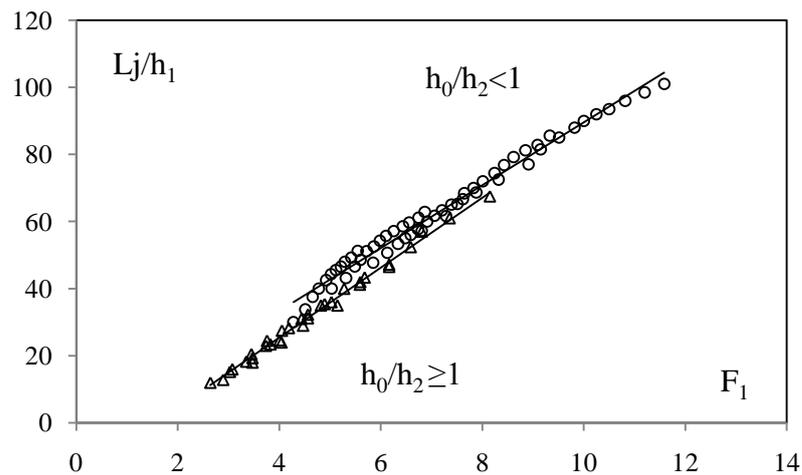
$Y_{exp}$	$Y_{relation}$	$\Delta Y/Y$ en %	$Y_{exp}$	$Y_{relation}$	$\Delta Y/Y$ en %
7,22857143	7,2925	-0,88438735	10,84	10,9595	-1,10239852
7,4	7,44821429	-0,6515444	11,2	10,94	2,32142857
7,63333333	7,78166667	-1,94323144	11,08	11,1775	-0,8799639
7,57142857	7,60392857	-0,42924528	11,55	11,2125	2,92207792
7,93333333	7,96333333	-0,37815126	11,9	11,485	3,48739496
7,71428571	7,75964286	-0,58796296	12,05	11,7575	2,42738589
8,1	8,145	-0,55555556	12,3	12,03	2,19512195
7,85714286	7,91535714	-0,74090909	12,55	12,3025	1,97211155
8,23333333	8,32666667	-1,13360324	12,85	12,575	2,14007782
8,05714286	8,07107143	-0,17287234	13,2	12,8475	2,67045455
8,36666667	8,50833333	-1,69322709	13,55	13,12	3,17343173
8,25714286	8,22678571	0,36764706			

### I.2.3.2. Longueurs caractéristiques du ressaut

#### I.2.3.2.1. Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$

La longueur  $L_j$  a été considérée comme étant la distance séparant la section initiale du ressaut et la section finale (où s'effectue la mesure de  $h_2$ ). L'objectif principal de cette partie de l'étude est de quantifier la longueur relative  $L_j/h_1$  dans la gamme de valeurs testées.

La figure (I.11) montre la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure I.11.** Variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

Deux nuages de points pour les deux lit du canal composé, tel que :

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad Lj/h_1 = 10,41F_1 - 16,23 ; R^2 = 0,993 \quad (I.7)$$

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad Lj/h_1 = 9,378F_1 - 4,211 ; R^2 = 0,985 \quad (I.8)$$

Le tableau I.5, regroupe les valeurs ayant servi au traçage des courbes  $Lj/h_1 = f(F_1)$ , pour les deux sections du canal.

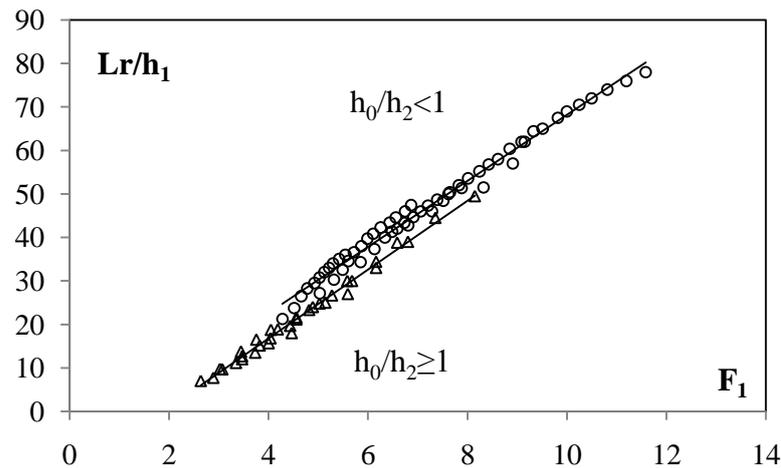
**Tableau I.5.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Lj/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h/h_2 \geq 1$		$h/h_2 < 1$			
$F_1$	$Lj/h_1$	$F_1$	$Lj/h_1$	$F_1$	$Lj/h_1$
2,64000139	12	4,2797932	30	7,20723523	63,3333333
2,89278727	12,8571429	4,51448497	33,75	7,28856105	61,6
3,02499968	15,25	4,65729169	37,5	7,3925056	65
3,07347297	16	4,77742453	40	7,51189861	65,2
3,34717079	18,2857143	4,92292369	42,5	7,61688926	66,6666667
3,44870473	20,5	5,03124541	40	7,6469757	68,4
3,47037195	18	5,02072835	44,25	7,88148131	68,6666667
3,47037195	19,3333333	5,11917227	45,5	7,82832224	70
3,7338767	23	5,21825133	46,5	8,01108007	72
3,75612419	24,5	5,29297498	48	8,24149553	74,4
3,82313038	23,4285714	5,31438957	43,1428571	8,32265409	72,5
4,04018514	24	5,41829872	49,25	8,4273896	76,8
4,00373248	24,6666667	5,48673989	46,5714286	8,61466069	79,2
4,0493155	27,5	5,54459625	51,25	8,8506707	81,2
4,18709214	28,2857143	5,60265456	48,5714286	8,91000468	77
4,46721311	29	5,71937421	51,1428571	9,08879746	82,8
4,43579082	31	5,86639738	52,5714286	9,1486577	81,5
4,5619224	31,2	5,85163915	47,6666667	9,32902232	85,6
4,5619224	32,2857143	5,98490824	54,2857143	9,5105569	85
4,89162293	35,4285714	6,10420656	55,7142857	9,81569415	88
4,81769491	35	6,12915902	50,6666667	10,0003124	90
5,0256354	36	6,25442898	57,1428571	10,248247	92
5,14388265	35	6,34009385	53,3333333	10,4981975	93,5
5,27633913	40	6,4362955	58,5714286	10,8134457	96
5,5852159	41,2	6,48203299	55	11,1958248	98,5
5,59538625	42	6,55850162	59,7142857	11,5826077	101
5,68037856	43,3333333	6,58917268	56		
6,16414941	46,5	6,74324146	61,1428571		
6,16414941	47,2	6,80520056	57,2		
6,58917268	52,4	6,73293332	57,6666667		
6,80520056	57	6,86734827	62,8571429		
7,35532624	61	6,91408248	60		
8,14906808	67,5	7,06015166	61,6666667		

### I.2.3.2.2. Variation de la longueur relative $Lr/h_1$ du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude $F_1$

La longueur  $Lr$  est considérée comme étant la distance séparant la section initiale et la section finale du rouleau de surface.

La figure (I.12) montre la variation de la longueur relative  $Lr/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure I.12.** Variation de la longueur relative  $Lr/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

La figure (I.12) montre que l'augmentation du nombre de Froude de l'écoulement incident, engendre celle de la longueur relative du rouleau pour le lit mineur et le lit majeur. Par ailleurs, l'ajustement des points expérimentaux a permis d'aboutir également à une relation linéaire d'équation :

$$\text{- Pour } h_0/h_2 \geq 1 \quad Lr/h_1 = 7,907F_1 - 14,85 ; R^2 = 0,991 \quad (\text{I.9})$$

$$\text{- Pour } h_0/h_2 < 1 \quad Lr/h_1 = 7,599F_1 - 7,788 ; R^2 = 0,987 \quad (\text{I.10})$$

**Tableau I.6.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Lr/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

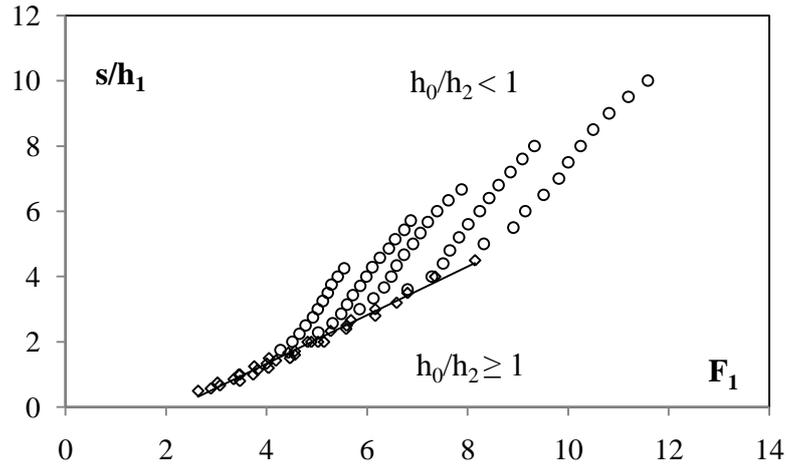
$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$Lr/h_1$	$F_1$	$Lr/h_1$	$F_1$	$Lr/h_1$
2,64000139	7	4,2797932	21,25	7,20723523	47,3333333
2,89278727	7,71428571	4,51448497	23,75	7,28856105	46
3,02499968	9,75	4,65729169	26,5	7,3925056	48,6666667
3,07347297	9,66666667	4,77742453	28,25	7,51189861	48,4
3,34717079	11,1428571	4,92292369	29,5	7,61688926	50
3,44870473	13,75	5,03124541	27,1428571	7,6469757	50,4
3,47037195	12	5,02072835	30,75	7,88148131	51,3333333
3,47037195	12,6666667	5,11917227	32	7,82832224	52

**Tableau I.6. (suite et fin)** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Lr/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$Lr/h_1$	$F_1$	$Lr/h_1$	$F_1$	$Lr/h_1$
3,7338767	13,5	5,21825133	33	8,01108007	53,6
3,75612419	16,5	5,29297498	34	8,24149553	55,2
3,82313038	15,1428571	5,31438957	30,2857143	8,32265409	51,5
4,04018514	16,8	5,41829872	35	8,4273896	56,8
4,00373248	15,6666667	5,48673989	32,5714286	8,61466069	58
4,18709214	18,8571429	5,60265456	34,5714286	8,91000468	57
4,46721311	18	5,71937421	36,5714286	9,08879746	62
4,43579082	19,6666667	5,86639738	38	9,1486577	62
4,5619224	21,6	5,85163915	34,3333333	9,32902232	64,4
4,5619224	21,1428571	5,98490824	39,7142857	9,5105569	65
4,89162293	24	6,10420656	40,8571429	9,81569415	67,5
4,81769491	23,3333333	6,12915902	37,3333333	10,0003124	69
5,0256354	24,8	6,25442898	42,2857143	10,248247	70,5
5,14388265	25	6,34009385	40	10,4981975	72
5,27633913	26,6666667	6,4362955	43,4285714	10,8134457	74
5,5852159	30	6,48203299	41,3333333	11,1958248	76
5,59538625	27	6,55850162	44,5714286	11,5826077	78
5,68037856	30	6,58917268	42		
6,16414941	33	6,74324146	46		
6,16414941	34,4	6,80520056	42,8		
6,58917268	38,8	6,73293332	43,3333333		
6,80520056	39	6,86734827	47,4285714		
7,35532624	44,5	6,91408248	44,6666667		
8,14906808	49,5	7,06015166	46		

**I.2.3.3. Variation de la hauteur relative  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$** 

La figure (I.13) montre la variation de la hauteur relative du seuil  $S=s/h_1$  en fonction de nombre de Froude de l'écoulement incident.



**Figure. I.13.** Variation de la hauteur relative  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ ,  
 (o) Points de mesures expérimentales en lit majeur; (◇) points de mesures expérimentales en lit mineur.  
 (—) Courbes d'ajustement.

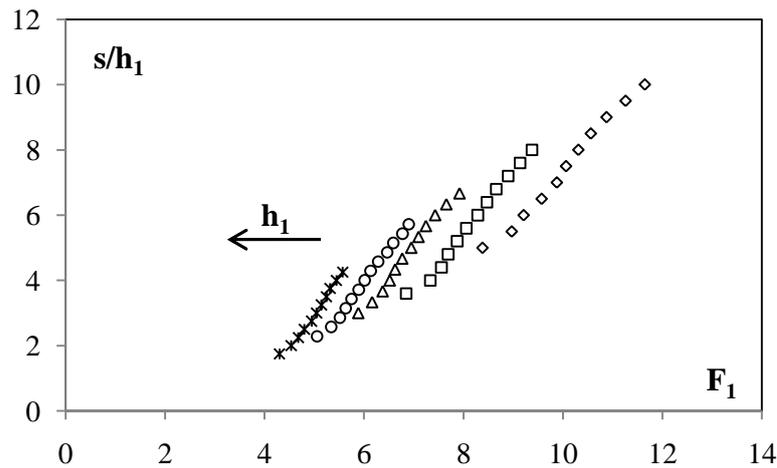
Cette figure montre que :

pour le lit mineur ( $h_0/h_2 \geq 1$ ) l'ajustement des points expérimentaux a abouti à une courbe unique de type linéaire telle que :

$$s/h_1 = 0,743 F_1 - 1,645 ; R^2 = 0,989 \quad (\text{I.11})$$

tandis que pour le lit majeur ( $h_0/h_2 < 1$ ) l'ajustement des points expérimentaux montrent une série de cinq allures chacune correspond à une ouverture bien déterminée.

La figure I.14 montre la variation de  $S=s/h_1$  en fonction de nombre de Froude  $F_1$  pour  $h_0/h_2 < 1$ .



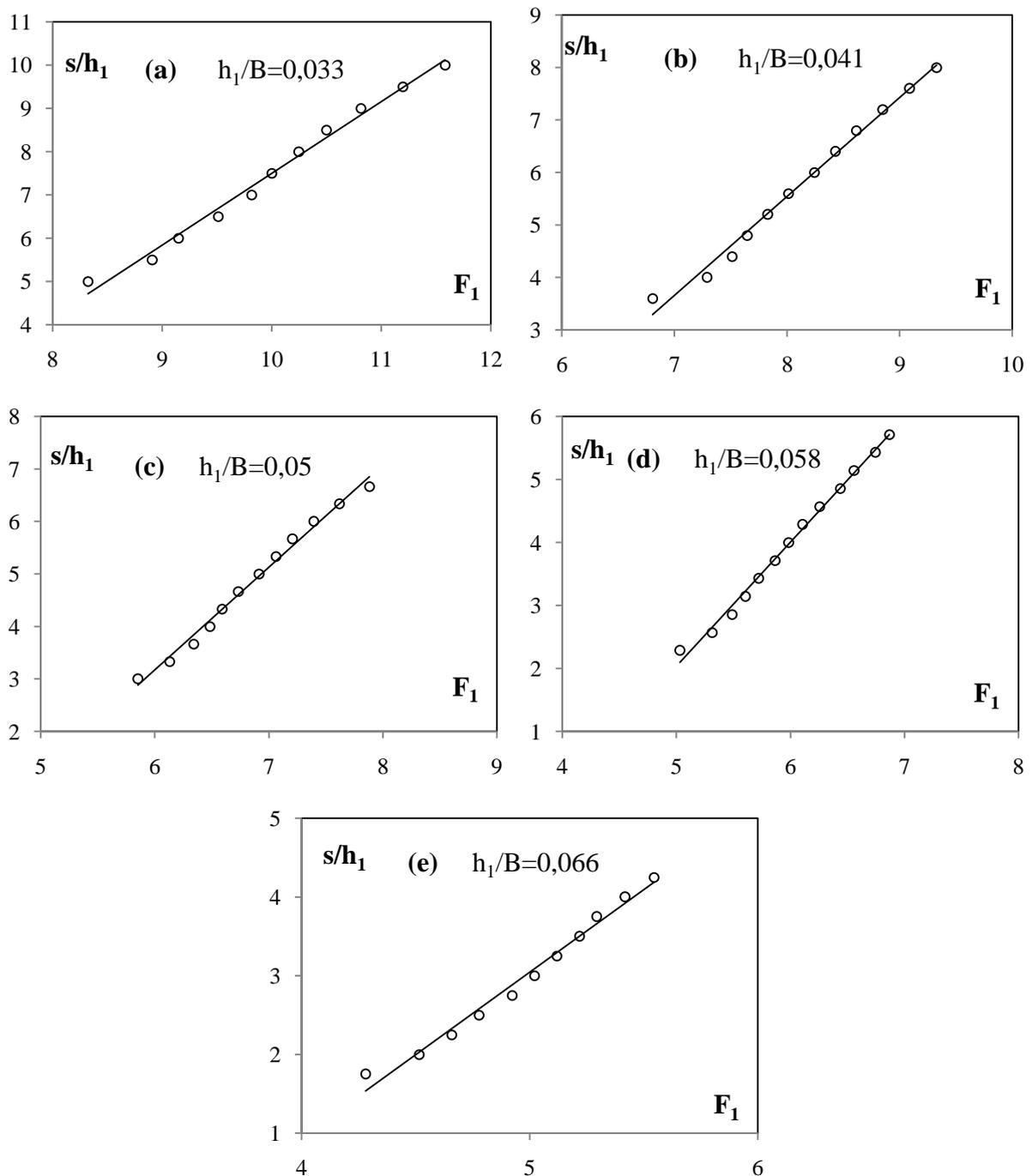
**Figure. I.14.** Variation du rapport  $S=s/h_1$  de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$   
 Pour  $h_0/h_2 \geq 1$ . (◇)  $h_1=2$  cm ; (□)  $h_1=2,5$  cm ; (Δ)  $h_1=3$  cm ; (○)  $h_1=3,5$  cm ; (\*)  $h_1=4$  cm.

Cette figure montre une série de cinq allures adjacentes. Chaque allure correspond à une hauteur  $h_1$  d'une ouverture bien déterminée. On remarque que la hauteur relative du seuil

augmente linéairement avec l'augmentation du nombre de Froude. D'ailleurs, pour la même valeur de seuil relative, le nombre de Froude augmente avec la diminution de la hauteur des ouvertures.

Les figures (I.15. a, b, c, d, e) montrent la variation de la hauteur relative du seuil  $S = s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les cinq ouvertures, tels que :

$h_1/B = 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066$ .



**Figure. I.15. (a, b, c, d, e).** Variation du rapport de la hauteur relative du seuil  $S = s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  du ressaut respectivement pour  $h_1/B = (0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,06)$ .

(o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.

Selon les figures I.15. (a, b, c, d, e), l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme  $s/h_1 = a F_1 + b$ .

Les données ayant servi au traçage des figures I.19 (a, b, c, d, e), sont groupées au tableau I.7.

**Tableau I.7.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $s/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$
0,5	2,6400014	1,75	4,2797932	5,6666667	7,2072352
0,5714286	2,8927873	2	4,514485	4	7,2885611
0,75	3,0249997	2,25	4,6572917	6	7,3925056
0,6666667	3,073473	2,5	4,7774245	4,4	7,5118986
0,8571429	3,3471708	2,75	4,9229237	6,3333333	7,6168893
1	3,4487047	2,2857143	5,0312454	4,8	7,6469757
0,8	3,4703719	3	5,0207284	6,6666667	7,8814813
1	3,4703719	3,25	5,1191723	5,2	7,8283222
1	3,7338767	3,5	5,2182513	5,6	8,0110801
1,25	3,7561242	3,75	5,292975	6	8,2414955
1,1428571	3,8231304	2,5714286	5,3143896	5	8,3226541
1,2	4,0401851	4	5,4182987	6,4	8,4273896
1,3333333	4,0037325	2,8571429	5,4867399	6,8	8,6146607
1,5	4,0493155	4,25	5,5445963	7,2	8,8506707
1,4285714	4,1870921	3,1428571	5,6026546	5,5	8,9100047
1,5	4,4672131	3,4285714	5,7193742	7,6	9,0887975
1,6666667	4,4357908	3,7142857	5,8663974	6	9,1486577
1,6	4,5619224	3	5,8516392	8	9,3290223
1,7142857	4,5619224	4	5,9849082	6,5	9,5105569
2	4,8916229	4,2857143	6,1042066	7	9,8156941
2	4,8176949	3,3333333	6,129159	7,5	10,000312
2	5,0256354	4,5714286	6,254429	8	10,248247
2	5,1438827	3,6666667	6,3400938	8,5	10,498197
2,3333333	5,2763391	4,8571429	6,4362955	9	10,813446
2,4	5,5852159	4	6,482033	9,5	11,195825
2,5	5,5953862	5,1428571	6,5585016	10	11,582608
2,6666667	5,6803786	4,3333333	6,5891727		
3	6,1641494	5,4285714	6,7432415		
2,8	6,1641494	3,6	6,8052006		
3,2	6,5891727	4,6666667	6,7329333		
3,5	6,8052006	5,7142857	6,8673483		
4	7,3553262	5	6,9140825		
4,5	8,1490681	5,3333333	7,0601517		

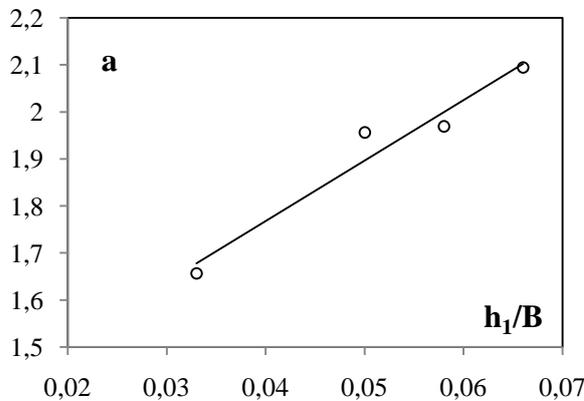
Le tableau I.8 regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport  $S = s/h_1$  des hauteurs relative du seuil au nombre de Froude de l'écoulement incident, pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

**Tableau I.8.** Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant  $S = s/h_1$  au nombre de Froude, pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures

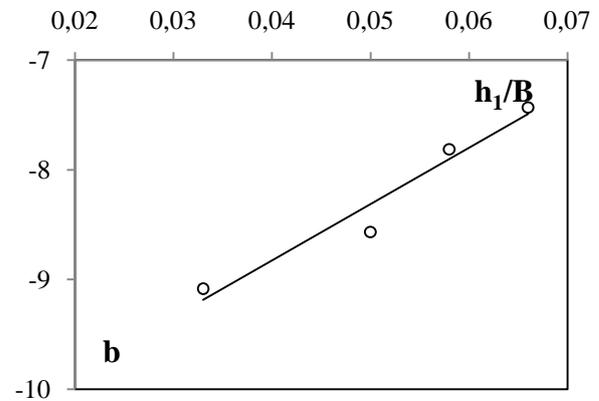
$h_1/B$	$a$	$b$	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	1,657	-9,085	$s/h_1 = 1,657 F_1 - 9,085$	0,990
0,041	1,882	-9,519	$s/h_1 = 1,882 F_1 - 9,519$	0,990
0,05	1,956	-8,565	$s/h_1 = 1,956 F_1 - 8,565$	0,991
0,058	1,969	-7,812	$s/h_1 = 1,969 F_1 - 7,812$	0,994
0,066	2,095	-7,432	$s/h_1 = 2,095 F_1 - 7,432$	0,984

Le tableau I.8 montre clairement que les paramètres  $a$  et  $b$  sont en fonction de la hauteur des ouvertures et augmentent progressivement avec l'augmentation de  $h_1/B$ .

Les figures I.16 et I.17 montrent l'ajustement statistique des couples de valeurs ( $a, h_1/B$ ) et ( $b, h_1/B$ ) par la méthode des moindres carrés.



**Figure. I.16.** Variation du paramètre 'a' en fonction de  $h_1/B$ .



**Figure. I.17.** Variation du paramètre 'b' en fonction de  $h_1/B$ .

Les figures I.16 et I.17 montrent clairement que la variation du paramètre 'a' et 'b' en fonction de  $h_1/B$ , suit parfaitement une loi linéaire pour les deux paramètres, que l'on peut écrire comme suit :

$$a = 12,85 h_1 / B + 1,254 \quad ; \quad R^2 = 0,952 \quad (\text{I.12})$$

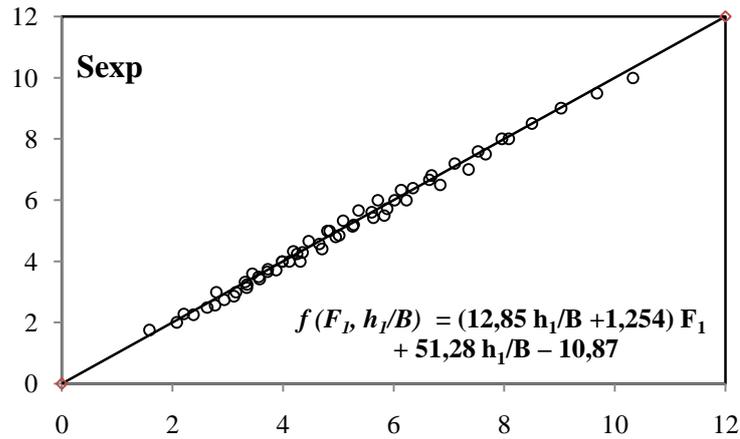
$$b = 51,28 h_1 / B - 10,87 \quad ; \quad R^2 = 0,948 \quad (\text{I.13})$$

En remplaçant les paramètres (a) et (b) par leurs expressions respectives, on obtient la relation générale suivante :

$$s/h_1 = (12,85 h_1/B + 1,254) F_1 + 51,28 h_1/B - 10,87 \quad (\text{I.14})$$

$$4,27 \leq F_1 \leq 11,58 \text{ et } 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066$$

La figure I.18 confirme que la relation (I.14) représente un assez bon ajustement pour la détermination de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil, connaissant le nombre de Froude incident  $F_1$ , et la hauteur relative ( $h_1/B$ ) de l'ouverture.



**Figure I.18** : Variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction de la relation  $f(F_1, h_1/B)$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$ .

La figure I.18 montre que les points issus de l'équation (I.14) se répartissent de manière quasi uniforme autour de la première bissectrice.

Les écarts relatifs entre les mesures expérimentales de la hauteur relative du seuil et celles issues de l'équation globale d'ajustement (I.14) sont mentionnés au tableau I.9, qui montre clairement que les erreurs relatives ne dépassent guère les 5%.

**Tableau I.9** : Ecart relatif entre  $S$  expérimental et  $S$  de la relation (I.14).

$s/h_1$ th	$s/h_1$	$\Delta S/S$ en %	$s/h_1$ th	$s/h_1$	$\Delta S/S$ en %
4,84081173	5	-3,28846223	5,08357763	5,33333333	-4,91299088
5,8289312	5,5	5,64307919	5,36252161	5,66666667	-5,67167974
6,23042513	6	3,69838534	5,71388688	6	-5,00732912
6,83926023	6,5	4,96048135	6,13943049	6,33333333	-3,15831975
7,35260279	7	4,79561858	6,6412293	6,66666667	-0,38302198
7,66319216	7,5	2,12955845	2,20185279	2,28571429	-3,80867853
8,0803009	8	0,99378598	2,76915569	2,57142857	7,1403397
8,50080086	8,5	0,00942099	3,11447393	2,85714286	8,2624249
9,03115345	9	0,34495533	3,34671863	3,14285714	6,09138402
9,67444251	9,5	1,80312725	3,58057617	3,42857143	4,24525925

Tableau I.9. (suite et fin) Ecart relatifs entre  $S$  expérimental et  $S$  de la relation (I.14)

$h_1$ th	$s/h_1$	$\Delta S/S$ en %	$s/h_1$ th	$s/h_1$	$\Delta S/S$ en %
10,3251403	10	3,1490158	3,87514935	3,71428571	4,15115962
3,44400596	3,6	-4,5294358	4,11259574	4	2,73782651
4,30893929	4	7,1697295	4,35161987	4,28571429	1,51450691
4,70858324	4,4	6,55363248	4,652603	4,57142857	1,74470992
4,95029244	4,8	3,03603154	5,01698773	4,85714286	3,18607266
5,27479695	5,2	1,41800631	5,26183788	5,14285714	2,26120113
5,60182686	5,6	0,03261182	5,63197953	5,42857143	3,61166265
6,01413613	6	0,23504834	5,88063787	5,71428571	2,82881134
6,34677807	6,4	-0,83856617	1,58188352	1,75	-10,6276146
6,68188408	6,8	-1,76770389	2,0772396	2	3,7183771
7,10420432	7,2	-1,34843642	2,37865698	2,25	5,40880778
7,53031232	7,6	-0,92542883	2,63221738	2,5	5,02304184
7,96017469	8	-0,50030694	2,93931761	2,75	6,44086942
2,79163365	3	-7,46395751	3,14575065	3	4,63325495
3,31795008	3,33333333	-0,46363735	3,35353295	3,25	3,0872798
3,71798798	3,66666667	1,38035173	3,5626558	3,5	1,75868231
3,98717556	4	-0,32164219	3,72037253	3,75	-0,79635756
4,190366	4,33333333	-3,41181025	3,98488917	4	-0,3792033
4,46300804	4,66666667	-4,56325927	4,25146115	4,25	0,03436827
4,80655743	5	-4,02455544			

#### I.2.3.4. Rendement du ressaut hydraulique

Le rendement  $\eta$  du ressaut est défini par le rapport de la perte de charge  $\Delta H$  qu'il occasionne à la charge totale dans sa section initiale :

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad (\text{I.15})$$

avec :  $\Delta H = H_1 - H_2$

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

$$H_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (\text{I.16})$$

$$H_2 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{I.17})$$

En prenant appui sur l'équation de continuité ( $Q=V.A$ ), ces deux dernières relations s'écrivent :

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \quad (\text{I.18})$$

$$H_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (\text{I.19})$$

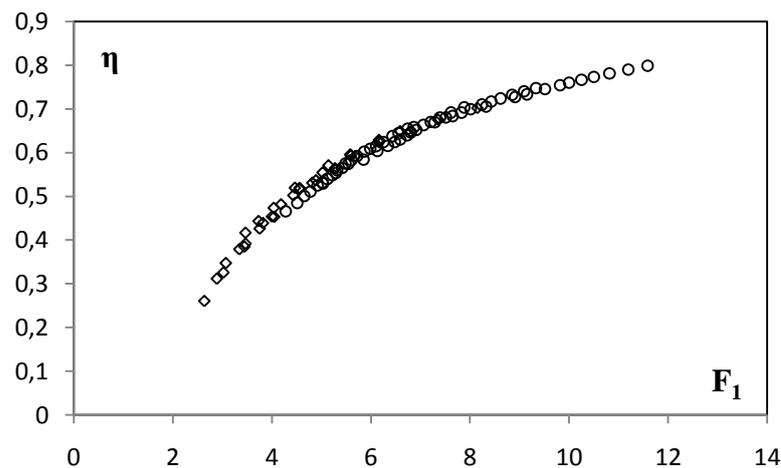
Où :  $A_1 = bh_1$  et  $A_2 = bh + B(h_2 - h_0)$

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2h_1^3} \quad (\text{I.20})$$

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

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (\text{I.21})$$



**Figure I.19:** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$   
 (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\emptyset$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur.

La figure I.19 montre la variation du rendement «  $\eta$  » en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les deux parties du canal. On remarque que le rendement augmente avec l'accroissement du nombre de Froude.

En effet, pour des nombres de Froude  $F_1$  comprise entre 4 et 6, les points de mesure du canal composé se trouvent légèrement décalé au dessous du canal rectangulaire. Au delà de 6 tous les points de mesures se rejoignent pour former un seul nuage de points.

Le tableau I.10 regroupe les valeurs du rendement  $\eta$  pour les nombres de Froude correspondants.

Tableau I.10. Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure I.19

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$
0,260979	2,6400014	0,4658529	4,2797932	0,6703924	7,2072352
0,3120409	2,8927873	0,4852036	4,514485	0,6692995	7,2885611
0,3260124	3,0249997	0,5006291	4,6572917	0,6803858	7,3925056
0,3476089	3,073473	0,5108497	4,7774245	0,6803405	7,5118986
0,3792459	3,3471708	0,5248798	4,9229237	0,691797	7,6168893
0,3851773	3,4487047	0,529644	5,0312454	0,6838308	7,6469757
0,4168847	3,4703719	0,53172	5,0207284	0,7033862	7,8814813
0,39197	3,4703719	0,5399784	5,1191723	0,6918404	7,8283222
0,4435167	3,7338767	0,5480188	5,2182513	0,6995364	8,0110801
0,4263662	3,7561242	0,553537	5,292975	0,71007	8,2414955
0,4390589	3,8231304	0,5597413	5,3143896	0,7051006	8,3226541
0,4737169	4,0401851	0,5649552	5,4182987	0,7170847	8,4273896
0,4538693	4,0037325	0,57546	5,4867399	0,7238461	8,6146607
0,4532613	4,0493155	0,5745543	5,5445963	0,732197	8,8506707
0,4817354	4,1870921	0,582494	5,6026546	0,7271834	8,9100047
0,5195672	4,4672131	0,5921922	5,7193742	0,7401765	9,0887975
0,5023561	4,4357908	0,6024443	5,8663974	0,7333364	9,1486577
0,5192509	4,5619224	0,5842746	5,8516392	0,747808	9,3290223
0,5167173	4,5619224	0,6087271	5,9849082	0,7455785	9,5105569
0,5367002	4,8916229	0,6148589	6,1042066	0,7540274	9,8156941
0,5309543	4,8176949	0,6037784	6,129159	0,7599811	10,000312
0,554505	5,0256354	0,6242515	6,254429	0,7667147	10,248247
0,5708155	5,1438827	0,6152885	6,3400938	0,7731637	10,498197
0,5641139	5,2763391	0,6377633	6,4362955	0,7810504	10,813446
0,595688	5,5852159	0,6240213	6,482033	0,7901294	11,195825
0,5927638	5,5953862	0,6444211	6,5585016	0,7986541	11,582608
0,5914406	5,6803786	0,6300364	6,5891727		
0,6238881	6,1641494	0,6546479	6,7432415		
0,6288033	6,1641494	0,6462683	6,8052006		
0,6487744	6,5891727	0,6395544	6,7329333		
0,6481691	6,8052006	0,6586854	6,8673483		
0,675466	7,3553262	0,6521814	6,9140825		
0,7020135	8,1490681	0,663246	7,0601517		

### I.2.3.5. Profil de surface du ressaut

L'expérimentation nous a permis de définir le profil de la surface libre du ressaut depuis son origine jusqu'à sa section finale dans un canal rectangulaire de forme composée.

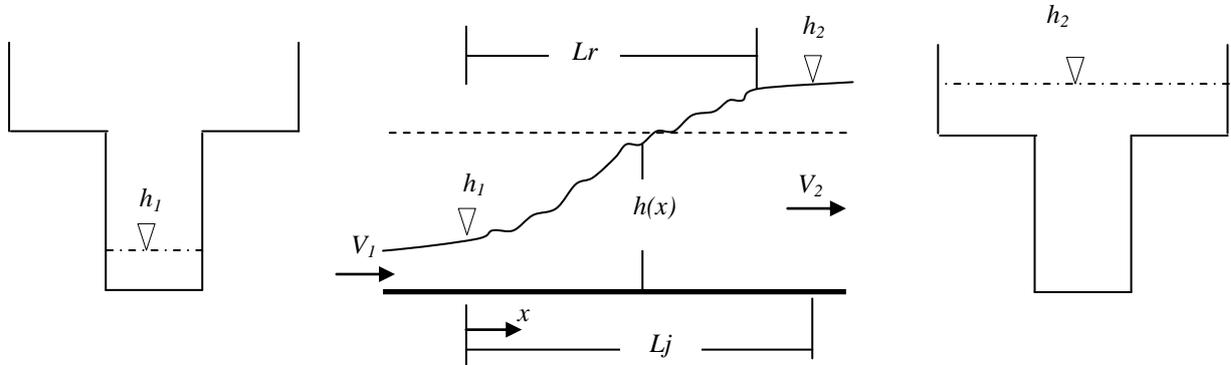


Figure I.20: Profil de surface du ressaut

Comme le montre le schéma simplifié de la Figure (I.20), la coordonnée longitudinale  $x$  est telle que  $0 \leq x \leq L_j$ , tandis que la profondeur  $h(x)$  est telle que  $h_1 \leq h(x) \leq h_2$ ;  $h_1$  et  $h_2$  sont les hauteurs conjuguées du ressaut.

Les paramètres  $x$  et  $h(x)$  peuvent servir à composer les variables adimensionnelles  $y$  et  $X$ , en écrivant que  $y = (h(x) - h_1) / (h_2 - h_1)$  et  $X = x / L_j$  variables adimensionnelles  $y$  et  $X$  sont limitées telles que :  $0 \leq X \leq 1$  et  $0 \leq y \leq 1$ .

La variation du rapport  $y$  en fonction du rapport  $X$  est représentée à la Figure (I.21), cette figure montre les points de mesures expérimentales pour le canal rectangulaire de forme composé.

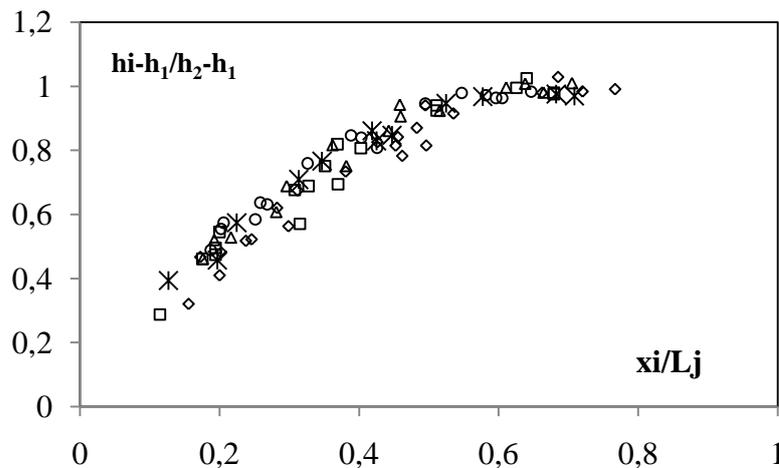


Figure I.21: Profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée,  $h_i$ : ( $\diamond$ ) 2 ; ( $\square$ ) 2,5 ; ( $\Delta$ ) 3 ; ( $\circ$ ) 3,5 ; ( $*$ ) 4.

La figure I.21 montre un nuage de points issu de l'expérimentation. Le rapport  $y$  se stabilise à la valeur 1.

Les mesures expérimentales de  $X = x_i/L_j$ , et de  $y = (h(x) - h_1) / (h_2 - h_1)$  sont regroupées dans le tableau I.11.

**Tableau I.11:** Mesures expérimentales du profil de surface ( $y = f(X)$ ) du ressaut contrôlé par seuil mince dans un canal rectangulaire de section composée.

$X_i/L_j$	$(h_i-h_1)/(h_2-h_1)$	$X_i/L_j$	$(h_i-h_1)/(h_2-h_1)$	$X_i/L_j$	$(h_i-h_1)/(h_2-h_1)$
0,17241379	0,46753247	0,35114504	0,75151515	0,546875	0,9787234
0,48275862	0,87012987	0,67938931	0,97575758	0,26829268	0,63157895
0,20238095	0,48148148	0,17532468	0,46192893	0,64634146	0,98245614
0,45238095	0,81481481	0,4025974	0,8071066	0,2020202	0,5546875
0,31182796	0,67479675	0,32748538	0,68899522	0,49494949	0,9453125
0,72043011	0,98373984	0,62573099	0,99521531	0,40322581	0,83950617
0,24590164	0,52258065	0,19444444	0,47488584	0,60483871	0,96296296
0,42622951	0,82580645	0,51111111	0,94063927	0,25827815	0,63684211
0,2	0,41040462	0,11458333	0,28820961	0,59602649	0,96315789
0,4962963	0,8150289	0,36979167	0,69432314	0,20588235	0,57425743
0,2987013	0,56345178	0,31527094	0,57083333	0,38823529	0,84653465
0,66233766	0,97969543	0,64039409	1,025	0,32608696	0,75943396
0,28235294	0,62085308	0,45833333	0,94202899	0,58152174	0,97169811
0,53529412	0,91469194	0,21621622	0,52830189	0,25128205	0,58482143
0,38068182	0,73394495	0,45945946	0,90566038	0,42564103	0,80803571
0,76704545	0,99082569	0,36190476	0,81617647	0,19672131	0,45744681
0,15555556	0,32126697	0,63809524	1,00735294	0,52459016	0,94680851
0,45555556	0,84162896	0,19230769	0,52071006	0,2244898	0,57364341
0,46192893	0,78278689	0,51538462	0,92307692	0,41836735	0,86046512
0,68527919	1,02868852	0,29605263	0,68844221	0,425	0,82926829
0,23762376	0,51792829	0,66447368	0,9798995	0,70833333	0,9695122
0,4950495	0,94023904	0,17575758	0,46153846	0,12666667	0,39361702
0,2	0,54545455	0,44242424	0,86057692	0,34666667	0,76595745
0,51111111	0,92424242	0,38150289	0,75115207	0,44705882	0,84653465
0,30769231	0,67647059	0,70520231	1,00921659	0,68235294	0,97524752
0,67948718	0,98039216	0,28108108	0,60792952	0,31318681	0,70892019
0,19417476	0,4962406	0,61081081	0,99559471	0,57692308	0,96713615
0,36893204	0,81954887	0,1875	0,4893617		

### I.3. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ PAR SEUIL ÉPAIS EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE

#### I.3.1. Description du modèle

##### I.3.1.1. Description du canal

Le même dispositif expérimental, sauf pour le contrôle du ressaut au lieu de mettre un seuil mince on place un seuil à paroi épaisse.

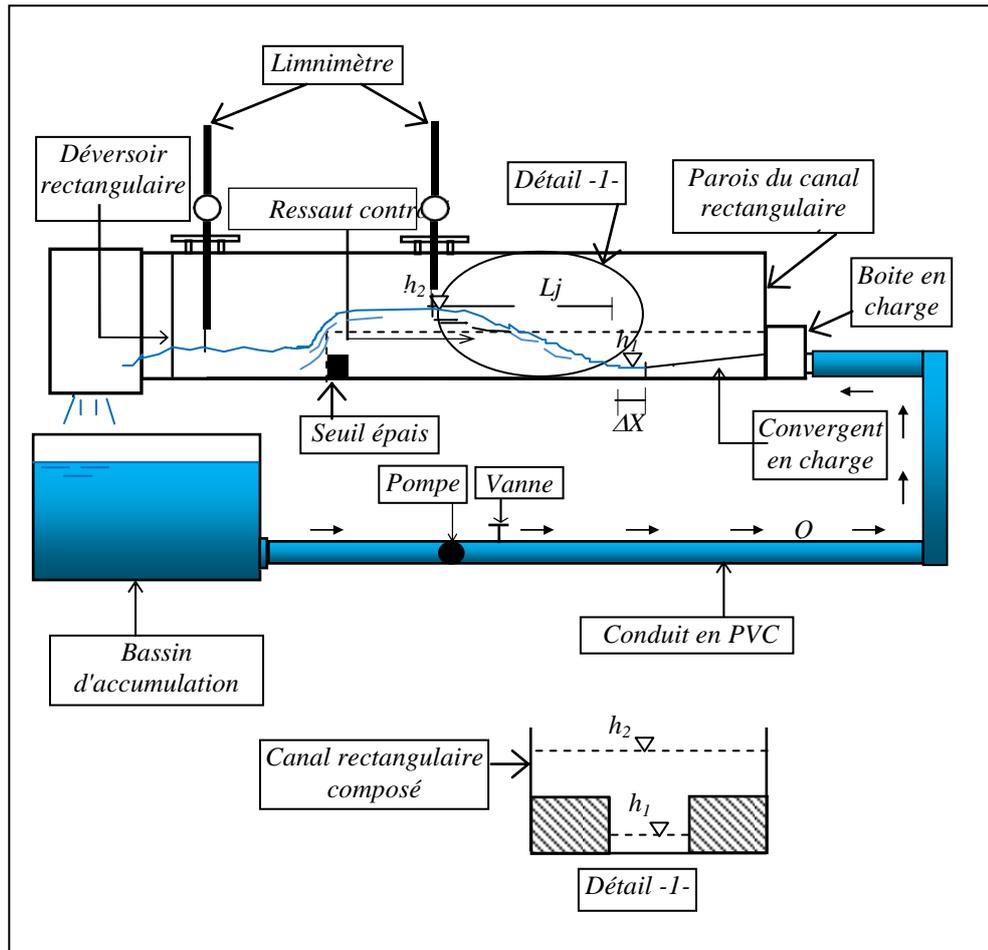


Figure I.22 : Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composée, ayant servi à l'expérimentation.

##### I.3.1.2. Les Seuils épais

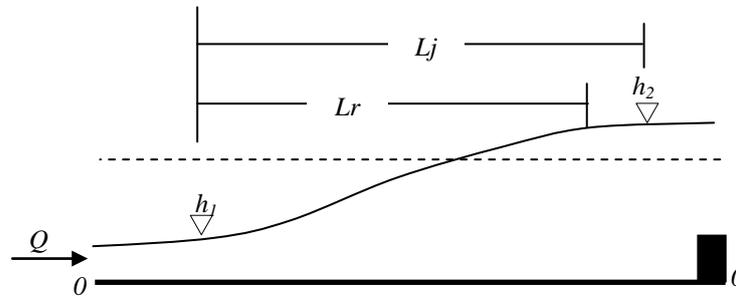
Une série de 16 seuils métalliques de forme rectangulaire de longueur 20 cm (photo I.12) utilisés dans notre dispositif expérimental, de différentes hauteurs:  $s = 3.4$  cm ; 4.5 cm ; 5.4 cm ; 6.5 cm ; 8 cm ; 9 cm ; 10,1 cm ; 10,9 cm ; 12,1 cm ; 13,9 cm ; 15 cm ; 16,2 cm ; 17 cm ; 17,9 cm ; 18,9 cm et 20,3 cm, fixés à l'aval du canal rectangulaire composé, dont le but est d'obtenir un nombre important de points de mesures.



*Photo I.12 : Photographie des seuils épais.*

### I.3.2. Résultats expérimentaux

Les photos I.13 et I.14 illustrent deux configurations typiques de ressaut contrôlé par seuil épais en canal rectangulaire de section composée, pour la même hauteur initiale  $h_1 = 25$  mm et à débit volume croissant.



*Figure I.23 : Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais évoluant dans un canal rectangulaire composé.*



*Photo I.13 : Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais  
 $F_1 = 5,34$ ;  $s = 5,4$  cm;  $L_j = 102$  cm;  $h_2 = 15,6$  cm ;  $h_1 = 2,5$  cm*

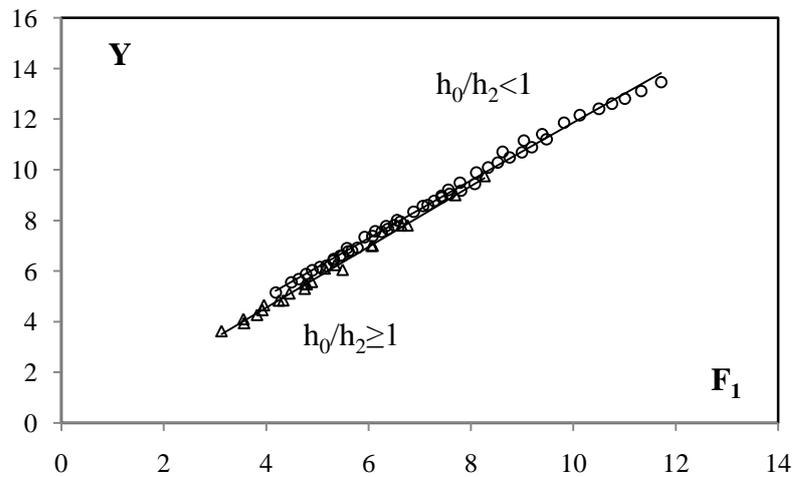


**Photo I.14:** Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil épais  
 $F_1 = 8,33$ ;  $s = 15$  cm;  $L_j = 183$  cm;  $h_2 = 25,2$  cm ;  $h_1 = 2,5$  cm

### I.3.3. Analyse des résultats expérimentaux

#### I.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction de Froude $F_1$

La Figure (I.24) montre la représentation graphique des résultats expérimentaux de la variation du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  et le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure. I.24.** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux cas du canal, (o) points de mesures en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures en lit mineur.  
 (—) Courbes d'ajustement.

L'ajustement des valeurs expérimentales par la méthode des moindres carrés, a montré que la loi de variation de  $Y$  en fonction de  $F_1$  est de type linéaire.

Cette figure montrent clairement deux allures superposées de  $Y$  du ressaut contrôlé par seuil épais, en fonction de nombre de Froude  $F_1$ , pour les deux lits du canal composé. En effet  $Y$  augment progressivement avec le nombre de Froude  $F_1$  selon les relations suivantes:

$$\begin{aligned}
 - \text{ Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad & Y = 1,200 F_1 - 0,255 \quad (I.22) \\
 & 3,12 < F_1 < 8,26
 \end{aligned}$$

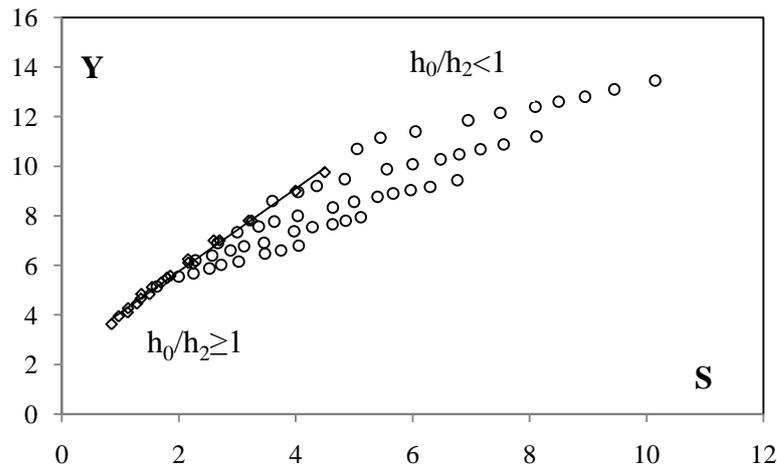
$$\begin{aligned}
 - \text{ Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad & Y = 1,143 F_1 + 0,429 \quad (I.23) \\
 & 4,18 < F_1 < 11,71
 \end{aligned}$$

Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y = f(F_1)$  pour les deux sections du canal, sont regroupées dans le tableau (I.12) :

**Tableau I.12.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Y$	$F_1$	$Y$	$F_1$	$Y$	$F_1$
3,625	3,1291846	5,15	4,1870921	8,6	7,155641
4,1	3,5574917	5,55	4,4908283	8,7666667	7,2811552
3,9428571	3,5699961	5,675	4,6333877	8,96	7,4222941
4,2666667	3,8231304	5,875	4,7774245	8,9	7,4297474
4,4571429	3,9259915	6,025	4,8985729	9,0333333	7,5793369
4,65	3,9583218	6,15	5,0452796	9,2	7,5568351
4,8333333	4,2488177	6,2	5,1721716	9,1666667	7,8055765
4,84	4,3357378	6,475	5,3179615	9,48	7,7828529
5,1142857	4,4537374	6,4	5,3143896	9,4333333	8,0723111
5,5	4,7533164	6,6	5,4434806	9,88	8,1029848
5,3	4,7533164	6,8	5,6718601	10,08	8,3342698
5,48	4,7919089	6,6	5,4867399	10,28	8,5208536
5,5714286	4,8916229	6,7714286	5,6026546	10,7	8,6146607
6,1	5,1438827	6,9	5,5784391	10,48	8,7560116
6,24	5,3429871	6,9142857	5,7780342	10,68	8,9932939
6,05	5,4939609	7,3333333	5,9206168	11,15	9,0290684
7	6,0802842	7,3714286	6,0743084	10,88	9,1846367
7	6,0593777	7,5666667	6,129159	11,2	9,4741568
7,8	6,6429617	7,5428571	6,254429	11,4	9,3894042
7,8	6,7618093	7,6571429	6,3754804	11,85	9,8156941
9	7,6921794	7,7666667	6,3400938	12,15	10,124027
9,75	8,2646566	7,8	6,4973028	12,4	10,498197
		8	6,5533944	12,6	10,750148
		7,9428571	6,6198914	12,8	11,004082
		8,3333333	6,8777245	13,1	11,324266
		8,5666667	7,0601517	13,45	11,712505

La figure (I.25) montre la variation de  $Y$  en fonction de la hauteur relative du seuil  $S=s/h_1$ .



**Figure. I.25.** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil. (o) Points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) courbe d'équation.

Cette figure montre la variation du rapport  $Y$  en fonction du seuil relatif  $S$ . On remarque que :

- pour  $h_0/h_2 \geq 1$  :

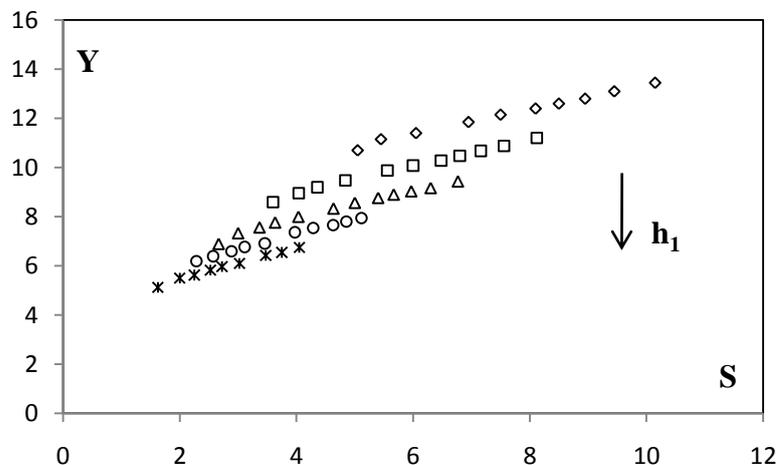
tout les mesures sont classées par une seule allure qui convient à l'écoulement réalisé dans le lit mineur, sans effet de l'ouverture. Ainsi l'ajustement par la méthode des moindres carrés de ces mesures est de type linéaire ;

$$Y = 1,672 (s/h_1) + 2,409 \quad (\text{I.24})$$

- pour  $h_0/h_2 < 1$  :

la figure montre cinq allures distinctes chacune correspond à une ouverture bien déterminée, qui reflète l'écoulement qui se manifeste dans le lit majeur ( $\beta < 1$ ).

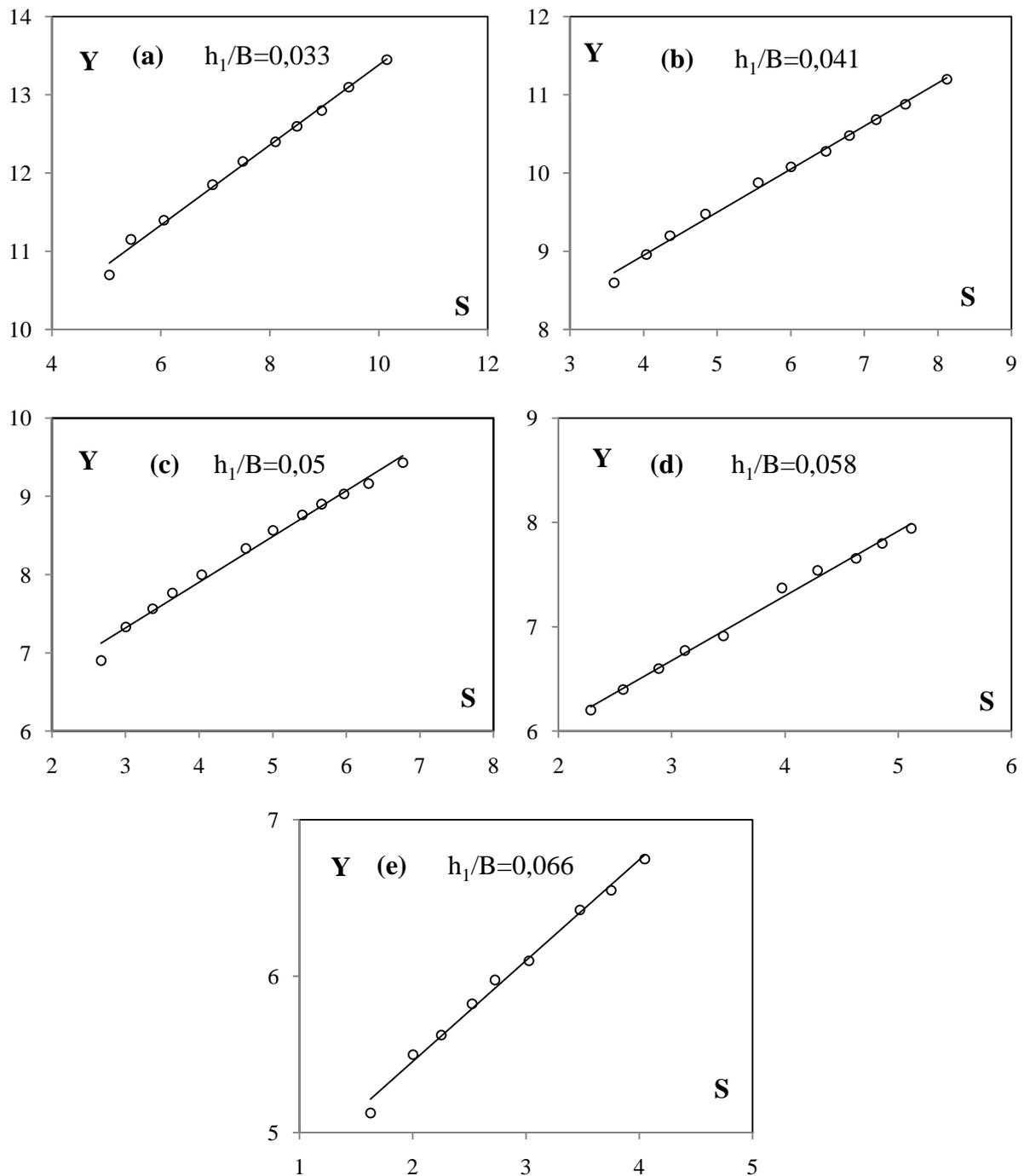
La figure (I.26) montre la variation de  $Y$  en fonction de la hauteur relative du  $S=s/h_1$  du seuil.



**Figure. I.26.** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil épais Pour  $h_0/h_2 < 1$ .  $h_1$ : ( $\diamond$ ) 2 ; ( $\square$ ) 2,5 ; ( $\Delta$ ) 3 ; (o) 3,5 ; ( $*$ ) 4.

Cette figure montre une série de cinq allures superposées qui reflètent l'effet des ouvertures  $h_1$ . On remarque que pour la même valeur de seuil relative, le rapport  $Y$  diminue avec l'augmentation de  $h_1$ .

Les figures (I.27. a, b, c, d, e) présentent la variation de  $Y$  en fonction la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil, pour les cinq ouvertures, tels que :  $h_1/B = 0,033$  ;  $0,041$  ;  $0,05$  ;  $0,058$  ;  $0,066$ .



**Figure. I.27. (a, b, c, d, e).** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par seuil épais en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil respectivement pour  $h_1/B = (0,03; 0,041; 0,05; 0,058; 0,066)$ . (o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.

Les figures I.27 (a, b, c, d, e) montrent que l'ajustement des mesures expérimentales du rapport  $Y$  en fonction de la hauteur relative du seuil suit une loi de type linéaire de la forme  $Y = a (s/h_1) + b$ .

Les données ayant servi au traçage des figures I.27 (a, b, c, d, e) sont assemblées au tableau I.13.

**Tableau I.13.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y = f(s/h_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Y$	$s/h_1$	$Y$	$s/h_1$	$Y$	$s/h_1$
3,625	0,85	5,15	1,625	8,6	3,6
4,1	1,125	5,55	2	8,7666667	5,4
3,9428571	0,9714286	5,675	2,25	8,96	4,04
4,2666667	1,1333333	5,875	2,525	8,9	5,6666667
4,4571429	1,2857143	6,025	2,725	9,0333333	5,9666667
4,65	1,35	6,15	3,025	9,2	4,36
4,8333333	1,5	6,2	2,2857143	9,1666667	6,3
4,84	1,36	6,475	3,475	9,48	4,84
5,1142857	1,5428571	6,4	2,5714286	9,4333333	6,7666667
5,5	1,8	6,6	3,75	9,88	5,56
5,3	1,7	6,8	4,05	10,08	6
5,48	1,8	6,6	2,8857143	10,28	6,48
5,5714286	1,8571429	6,7714286	3,1142857	10,7	5,05
6,1	2,1666667	6,9	2,6666667	10,48	6,8
6,24	2,16	6,9142857	3,4571429	10,68	7,16
6,05	2,25	7,3333333	3	11,15	5,45
7	2,6	7,3714286	3,9714286	10,88	7,56
7	2,7	7,5666667	3,3666667	11,2	8,12
7,8	3,25	7,5428571	4,2857143	11,4	6,05
7,8	3,2	7,6571429	4,6285714	11,85	6,95
9	4	7,7666667	3,6333333	12,15	7,5
9,75	4,5	7,8	4,8571429	12,4	8,1
		8	4,0333333	12,6	8,5
		7,9428571	5,1142857	12,8	8,95
		8,3333333	4,6333333	13,1	9,45
		8,5666667	5	13,45	10,15

Les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées à la hauteur relative du seuil  $s/h_1$ , pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures, sont rassemblés dans le tableau I.14.

**Tableau I.14.** Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant  $Y$  à la hauteur relative du seuil pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

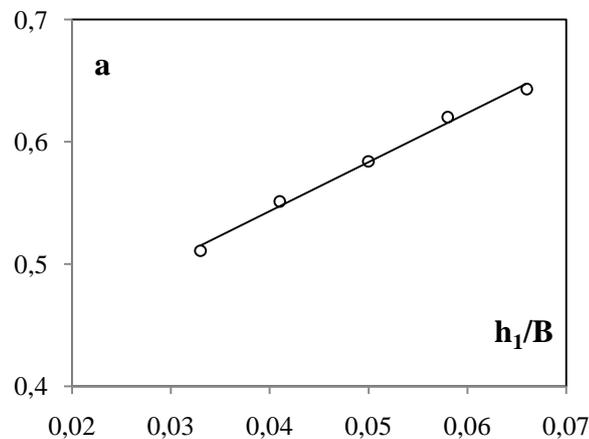
$h_1/B$	$a$	$b$	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	0,511	8,266	$Y = 0,511 s/h_1 + 8,266$	0,994
0,041	0,551	6,741	$Y = 0,551 s/h_1 + 6,741$	0,995
0,05	0,584	5,567	$Y = 0,584 s/h_1 + 5,567$	0,987
0,058	0,620	4,813	$Y = 0,620 s/h_1 + 4,813$	0,994
0,066	0,643	4,167	$Y = 0,643 s/h_1 + 4,167$	0,992

L'ajustement des relations expérimentales liant le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées à la hauteur relative du seuil  $s/h_1$ , pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures, sont de type linéaire, telle que :  $Y = a X + b$ .

Le tableau I.14 montre clairement l'augmentation progressive des paramètres 'a' avec la hauteur relative amont  $y_1$ . L'ajustement statistique des couples des valeurs  $(a, y_1)$  par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation :

$$a = 4,012 h_1 / B + 0,382 \quad (\text{I.25})$$

Celle-ci est représentée dans la figure I.28

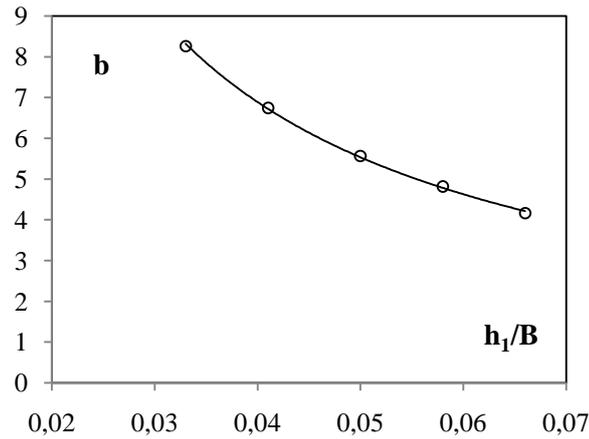


**Figure I.28:** Variation du coefficient "a" en fonction de la hauteur relative " $y_1$ ".

Inversement du coefficient 'a', le coefficient 'b' diminue progressivement avec la hauteur relative amont  $y_1$ . L'ajustement statistique des couples des valeurs  $(b, y_1)$  par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance d'équation :

$$b = 0,292.(h_1/B)^{-0,98} \quad (\text{I.26})$$

Celle-ci est représentée dans la figure I.29.



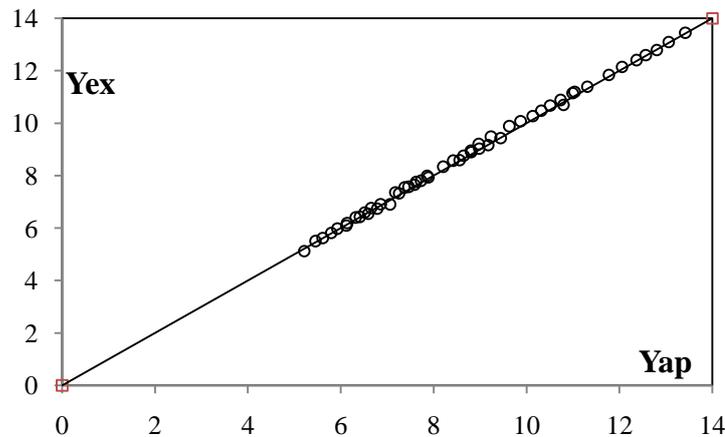
**Figure I.29:** Variation du coefficient "b" en fonction de la hauteur relative "y<sub>1</sub>".

En remplaçant les paramètres (a) et (b) par leurs expressions respectives, on obtient la relation générale suivante :

$$Y = (4,012(h_1/B) + 0,382) \cdot s/h_1 + 0,292(h_1/B)^{-0,98} \quad (\text{I.27})$$

$$4,18 \leq F_1 \leq 11,71 \quad \text{et} \quad 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066$$

La figure (I.29) montre aussi que la relation  $Y = f(S, y_1)$  ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales, qui suivent parfaitement la première bissectrice.



**Figure I.30 :** Variation de  $Y_{exp}$  en fonction de  $Y_{app}$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $Y_{exp} = Y_{app}$ .

Les écarts relatifs entre les mesures expérimentales du rapport des hauteurs conjuguées et celles issues de l'équation globale d'ajustement (I.27) sont mentionnés au tableau I.15. Le tableau I.15, montre clairement que les erreurs relatives sont en majorité inférieures à 5%.

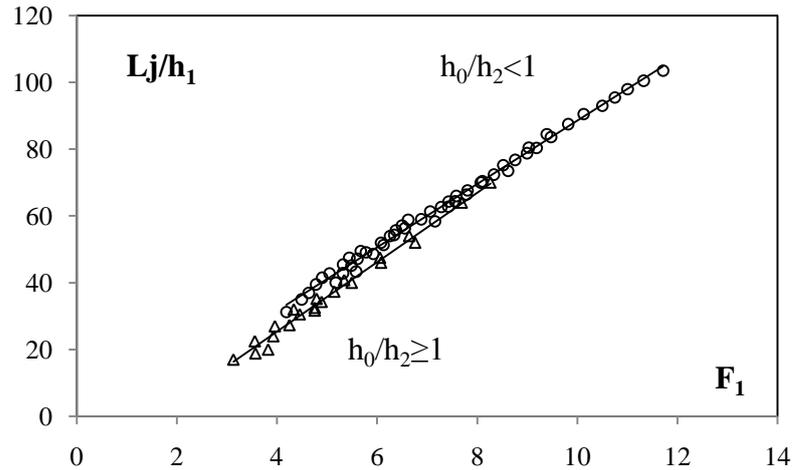
Tableau I.15 : Ecart relatifs entre  $Y$  expérimental et  $Y$  de la relation (I.27)

$Y_{exp}$	$Y_{relation}$	$\Delta Y/Y(en\%)$	$Y_{exp}$	$Y_{relation}$	$\Delta Y/Y(en\%)$
10,7	10,7883791	-0,82597284	8,33333333	8,19975434	1,60294794
11,15	10,9946724	1,3930724	8,56666667	8,41337434	1,78940462
11,4	11,3041124	0,84111906	8,76666667	8,64641434	1,37169957
11,85	11,7682724	0,68968416	8,9	8,80177434	1,10365912
12,15	12,0519258	0,80719539	9,03333333	8,97655434	0,62854976
12,4	12,3613658	0,31156645	9,16666667	9,17075434	-0,04459278
12,6	12,5676591	0,25667386	9,43333333	9,44263434	-0,09859722
12,8	12,7997391	0,00203833	6,2	6,13724039	1,01225176
13,1	13,0576058	0,32362015	6,4	6,31324991	1,35547008
13,45	13,4186191	0,23331529	6,6	6,50686039	1,41120619
8,6	8,55342495	0,54157035	6,77142857	6,64766801	1,82768761
8,96	8,79505828	1,84086737	6,91428571	6,85887944	0,80133043
9,2	8,97079162	2,49139547	7,37142857	7,17569658	2,65527893
9,48	9,23439162	2,59080573	7,54285714	7,36930706	2,3008534
9,88	9,62979162	2,53247351	7,65714286	7,58051849	1,00069141
10,08	9,87142495	2,06919692	7,8	7,72132611	1,00863967
10,28	10,135025	1,41026313	7,94285714	7,87973468	0,79470731
10,48	10,3107583	1,61490188	5,125	5,20446789	-1,55059291
10,68	10,5084583	1,60619585	5,5	5,44801789	0,94512933
10,88	10,728125	1,39591039	5,625	5,61038455	0,25983016
11,2	11,0356583	1,46733676	5,825	5,78898789	0,6182337
6,9	7,05397434	-2,23151214	5,975	5,91888122	0,93922644
7,33333333	7,24817434	1,16125903	6,1	6,11372122	-0,22493803
7,56666667	7,46179434	1,38597791	6,425	6,40598122	0,29601214
7,76666667	7,61715434	1,92505144	6,55	6,58458455	-0,52800845
8	7,85019434	1,87257078	6,75	6,77942455	-0,43591931

### I.3.3.2. Longueurs caractéristiques du ressaut

#### I.3.3.2.1. Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$

La figure (I.31) présente la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure I.31.** Variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , (o) points de mesures en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

Deux allures distinctes pour les deux lits du canal composé, telles que :

$$- \text{ pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad L_j / h_1 = 10,39F_1 - 16,17 ; \quad R^2 = 0,998 \quad (\text{I.28})$$

$$- \text{ pour } h_0/h_2 < 1 : \quad L_j / h_1 = 9,482F_1 - 6,313 ; \quad R^2 = 0,995 \quad (\text{I.29})$$

Le tableau I.16 récapitule les valeurs ayant servi au traçage des courbes  $L_j/h_1 = f(F_1)$ , pour les deux lits du canal.

**Tableau I.16.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $L_j/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

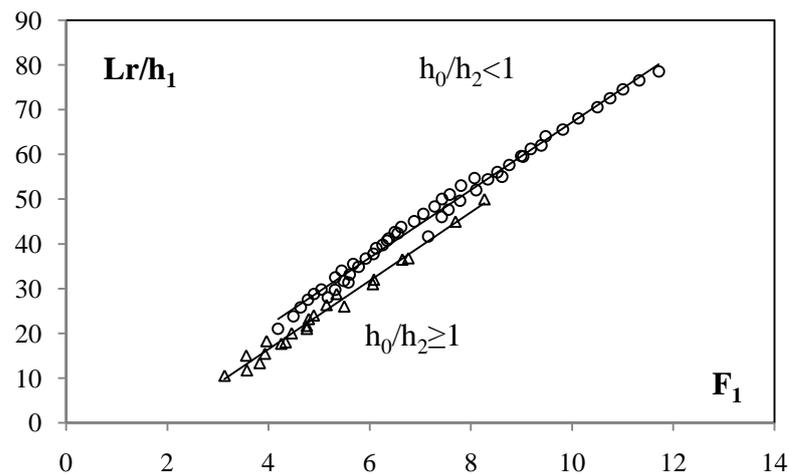
$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$L_j/h_1$	$F_1$	$L_j/h_1$	$F_1$	$L_j/h_1$
3,1291846	17	4,1870921	31,25	7,155641	58,4
3,5574917	22,5	4,4908283	35	7,2811552	62,666667
3,5699961	18,857143	4,6333877	37	7,4222941	62,8
3,8231304	20	4,7774245	39,5	7,4297474	64,333333
3,9259915	24	4,8985729	41,5	7,5793369	66
3,9583218	27	5,0452796	42,75	7,5568351	64,4
4,2488177	27,333333	5,1721716	40	7,8055765	67,666667
4,3357378	32	5,3179615	45,5	7,7828529	66,4
4,4537374	30,571429	5,3143896	42,857143	8,0723111	70
4,7533164	31,666667	5,4434806	47,5	8,1029848	70,4
4,7533164	32,5	5,6718601	49,5	8,3342698	72,4
4,7919089	35,2	5,4867399	45,142857	8,5208536	75,2
4,8916229	34,285714	5,6026546	47,142857	8,6146607	73,5
5,1438827	37,333333	5,5784391	43,333333	8,7560116	76,8
5,3429871	40,8	5,7780342	49,142857	8,9932939	78,8
5,4939609	40	5,9206168	48,666667	9,0290684	80,5
6,0802842	46	6,0743084	52,857143	9,1846367	80,4
6,0593777	47,5	6,129159	51,333333	9,4741568	83,6

**Tableau I.16. (suite et fin)** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Lj/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$Lj/h_1$	$F_1$	$Lj/h_1$	$F_1$	$Lj/h_1$
6,6429617	54	6,254429	54,857143	9,3894042	84,5
6,7618093	52	6,3754804	56,571429	9,8156941	87,5
7,6921794	64	6,3400938	54,333333	10,124027	90,5
8,2646566	70	6,4973028	58	10,498197	93
		6,5533944	56,333333	10,750148	95,5
		6,6198914	59,714286	11,004082	98
		6,8777245	59	11,324266	100,5
		7,0601517	61,333333	11,712505	103,5

### I.3.3.2.2. Variation de la longueur relative $Lr/h_1$ du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude $F_1$

La variation de la longueur relative  $Lr/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident est indiquée par la figure (I.32).



**Figure I.32.** Variation de la longueur relative  $Lr/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ ,  
 (o) Points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur.  
 (—) Courbes d'ajustement.

L'ajustement montre deux allures. Chacune correspond à une section du canal rectangulaire composée, telle que :

$$\text{- pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad Lr/h_1 = 7,655F_1 - 14,21 ; R^2 = 0,986 \quad (\text{I.30})$$

$$\text{- pour } h_0/h_2 < 1 : \quad Lr/h_1 = 7,574F_1 - 8,566 ; R^2 = 0,990 \quad (\text{I.31})$$

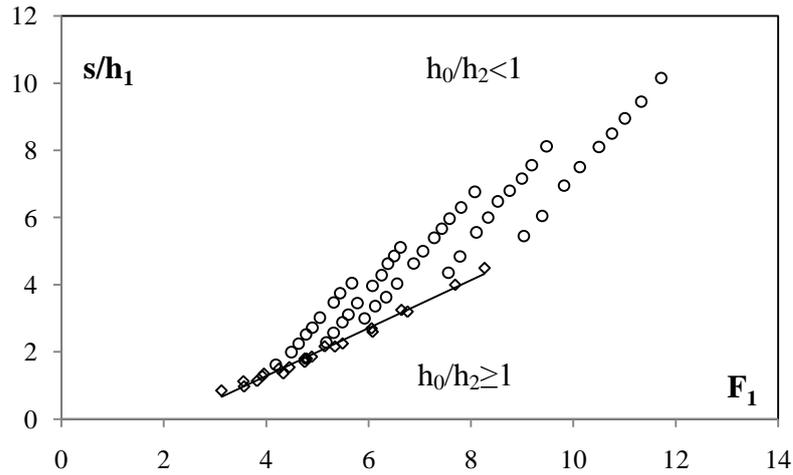
Le tableau I.17 regroupe les valeurs ayant servi au traçage des courbes  $Lr/h_1 = f(F_1)$ , pour les deux sections du canal.

**Tableau I.17.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Lr/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$Lr/h_1$	$F_1$	$Lr/h_1$	$F_1$	$Lr/h_1$
3,1291846	10,5	4,1870921	21	7,155641	41,6
3,5574917	15	4,4908283	23,75	7,2811552	48,333333
3,5699961	11,714286	4,6333877	25,75	7,4222941	46
3,8231304	13,333333	4,7774245	27,5	7,4297474	50
3,9259915	15,428571	4,8985729	28,75	7,5793369	51
3,9583218	18,25	5,0452796	29,75	7,5568351	47,6
4,2488177	17,666667	5,1721716	28	7,8055765	53
4,3357378	18	5,3179615	32,5	7,7828529	49,6
4,4537374	20	5,3143896	29,714286	8,0723111	54,666667
4,7533164	21,666667	5,4434806	34	8,1029848	52
4,7533164	21	5,6718601	35,5	8,3342698	54,4
4,7919089	23,2	5,4867399	31,714286	8,5208536	56
4,8916229	24	5,6026546	33,142857	8,6146607	55
5,1438827	26,333333	5,5784391	31,333333	8,7560116	57,6
5,3429871	28,8	5,7780342	34,857143	8,9932939	59,6
5,4939609	26	5,9206168	36,666667	9,0290684	59,5
6,0802842	32	6,0743084	37,714286	9,1846367	61,2
6,0593777	31	6,129159	39	9,4741568	64
6,6429617	36,5	6,254429	39,714286	9,3894042	62
6,7618093	36,8	6,3754804	41,142857	9,8156941	65,5
7,6921794	45	6,3400938	40,666667	10,124027	68
8,2646566	50	6,4973028	42,571429	10,498197	70,5
		6,5533944	42,333333	10,750148	72,5
		6,6198914	43,714286	11,004082	74,5
		6,8777245	45	11,324266	76,5
		7,0601517	46,666667	11,712505	78,5

**I.3.3.3. Variation de la hauteur relative  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$** 

La variation de la hauteur relative du seuil  $S=s/h_1$  en fonction de nombre de Froude de l'écoulement incident est indiquée par La figure (I.33).



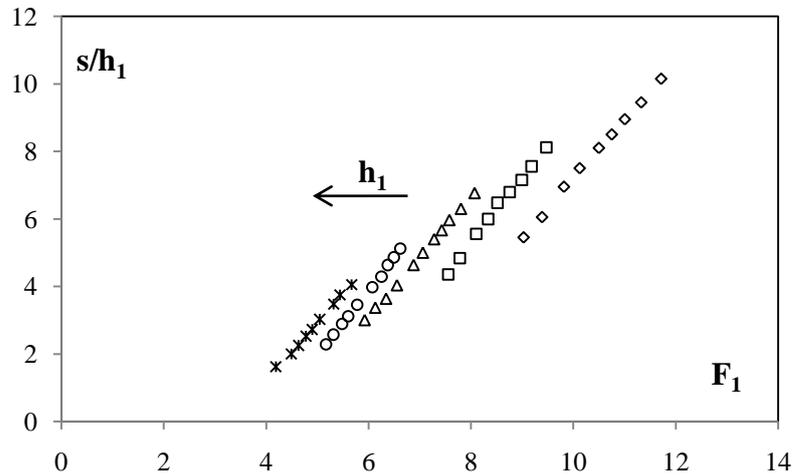
**Figure. I.33.** Variation de la hauteur relative  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ ,  
 (o) Points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur.  
 (—) Courbes d'ajustement.

Cette figure illustre deux configurations :

- Pour ( $h_0/h_2 \geq 1$ ) l'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés est de type linéaire tel que :

$$s/h_1 = 0,713 F_1 - 1,57 ; R^2 = 0,988 \quad (\text{I.32})$$

- pour ( $h_0/h_2 < 1$ ) l'ajustement des points expérimentaux montre une série de cinq allures qui reflètent l'effet de la hauteur des ouvertures.

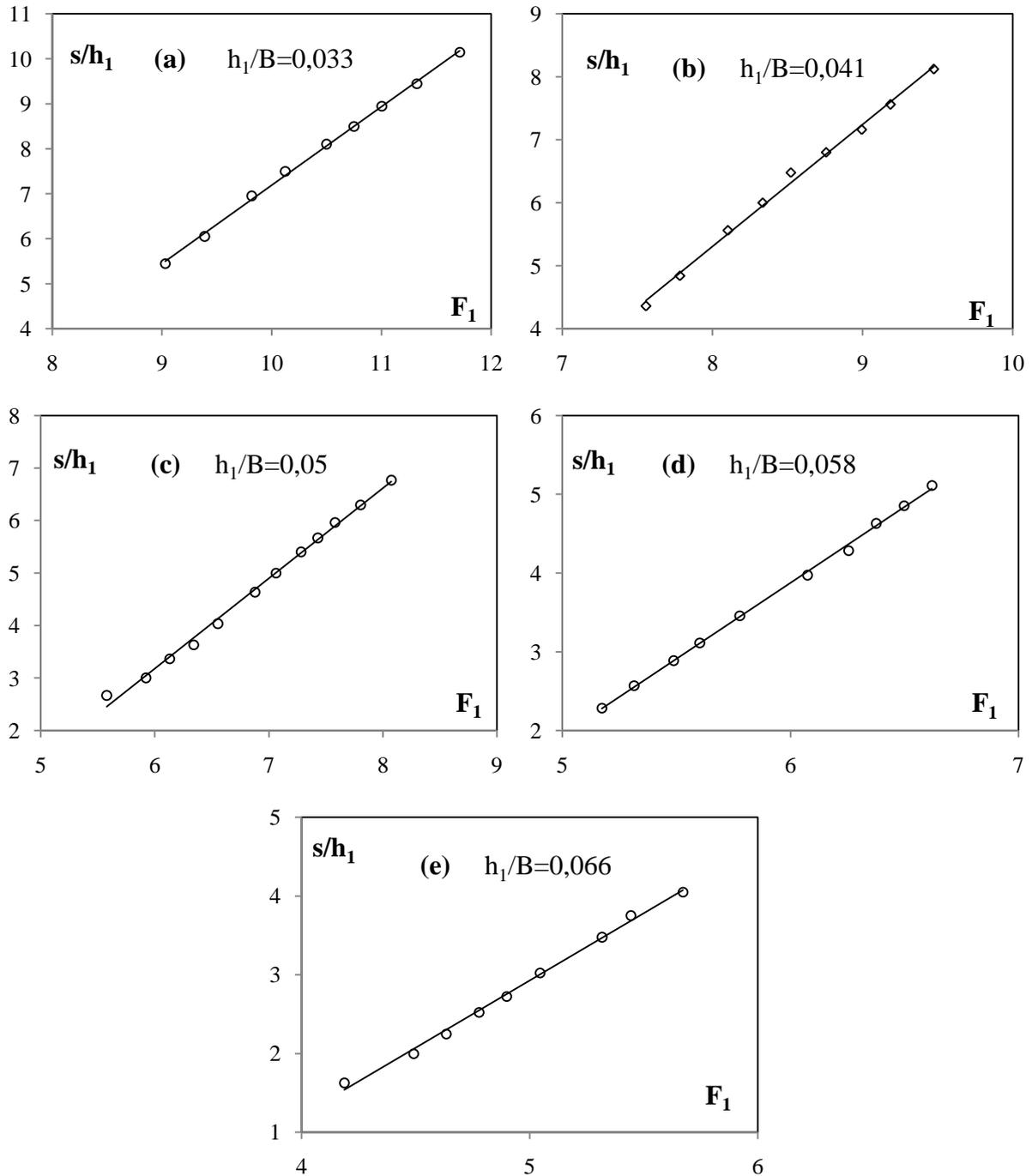


**Figure. I.34.** Variation du rapport  $S = s/h_1$  de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  Pour  $h_0/h_2 \geq 1$ .  $h_1$ : ( $\diamond$ ) 2 ; ( $\square$ ) 2,5 ; ( $\Delta$ ) 3 ; (o) 3,5 ; ( $*$ ) 4.

Cette figure montre que la hauteur relative du seuil augmente linéairement avec l'augmentation du nombre de Froude  $F_1$ . Ainsi pour la même valeur de seuil relative, le nombre de Froude augmente avec la diminution de la hauteur relative des ouvertures.

Les figures (I.35. a, b, c, d, e) expriment la variation de la hauteur relative du seuil  $S = s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les cinq ouvertures testés, tels que :

$h_1/B = 0,033; 0,041; 0,05; 0,058; 0,066$ .



**Figure. I.35. (a, b, c, d, e).** Variation du rapport de la hauteur relative du seuil  $S = s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  du ressaut respectivement pour  $h_1/B = (0,033; 0,041; 0,05; 0,058; 0,06)$ .

(o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.

Les figures (I.35. a, b, c, d, e), montrent que l'ajustement des mesures expérimentales de la variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme  $s/h_1 = a F_1 + b$ .

Le tableau I.18 regroupe Les données ayant servi au traçage des figures I.35 (a, b, c, d, e).

**Tableau I.18.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $s/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$
0,85	3,1291846	1,625	4,1870921	5,4	7,2811552
1,125	3,5574917	2	4,4908283	5,6666667	7,4297474
0,9714286	3,5699961	2,25	4,6333877	5,9666667	7,5793369
1,1333333	3,8231304	2,525	4,7774245	4,36	7,5568351
1,2857143	3,9259915	2,725	4,8985729	6,3	7,8055765
1,35	3,9583218	3,025	5,0452796	4,84	7,7828529
1,5	4,2488177	2,2857143	5,1721716	6,7666667	8,0723111
1,36	4,3357378	3,475	5,3179615	5,56	8,1029848
1,5428571	4,4537374	2,5714286	5,3143896	6	8,3342698
1,8	4,7533164	3,75	5,4434806	6,48	8,5208536
1,7	4,7533164	4,05	5,6718601	6,8	8,7560116
1,8	4,7919089	2,8857143	5,4867399	6,8	8,7560116
1,8571429	4,8916229	3,1142857	5,6026546	7,16	8,9932939
2,1666667	5,1438827	3,4571429	5,7780342	5,45	9,0290684
2,16	5,3429871	3	5,9206168	7,56	9,1846367
2,25	5,4939609	3,9714286	6,0743084	8,12	9,4741568
2,6	6,0802842	3,3666667	6,129159	6,05	9,3894042
2,7	6,0593777	4,2857143	6,254429	6,95	9,8156941
3,25	6,6429617	4,6285714	6,3754804	7,5	10,124027
3,2	6,7618093	3,6333333	6,3400938	8,1	10,498197
4	7,6921794	4,8571429	6,4973028	8,5	10,750148
4,5	8,2646566	4,0333333	6,5533944	8,95	11,004082
		5,1142857	6,6198914	9,45	11,324266
		4,6333333	6,8777245	10,15	11,712505
		5	7,0601517		

Le tableau I.19 regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport  $S = s/h_1$  des hauteurs relative du seuil au nombre de Froude de l'écoulement incident, pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

**Tableau I.19.** Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant  $S = s/h_1$  au nombre de Froude, pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures

$h_1/B$	$a$	$b$	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	1,743	- 10,24	$s/h_1 = 1,743 F_1 - 10,24$	0,998
0,041	1,935	- 10,24	$s/h_1 = 1,935 F_1 - 10,24$	0,995
0,05	1,782	- 7,594	$s/h_1 = 1,782 F_1 - 7,594$	0,999
0,058	1,929	- 7,703	$s/h_1 = 1,929 F_1 - 7,703$	0,998
0,066	1,708	- 5,613	$s/h_1 = 1,708 F_1 - 5,613$	0,996

Les valeurs des paramètres 'a' sont presque égales, et leur moyenne arithmétique est  $a = 1,819$ .

Cependant, les paramètres  $b$  sont en fonction de la hauteur des ouvertures et augmentent progressivement avec l'augmentation de  $h_1/B$ . La figure I.36 montre l'ajustement statistique des couples de valeurs  $(b, h_1/B)$  par la méthode des moindres carrés.

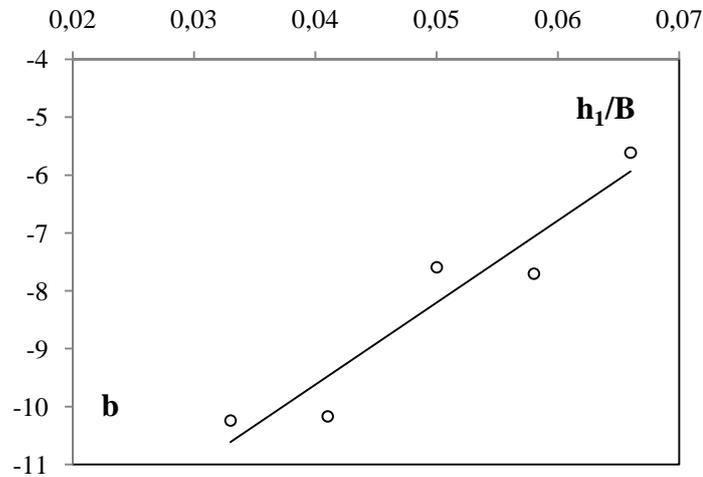


Figure I.36. Variation du paramètre 'b' en fonction de  $h_1/B$ .

Le figure I.36 montre que la variation du paramètre 'b' en fonction de  $h_1/B$ , suit parfaitement une loi linéaire que l'on peut écrire comme suit :

$$b = 141,6 h_1 / B - 15,29 ; \quad R^2 = 0,902 \quad (\text{I.33})$$

En remplaçant les paramètres (a) et (b) par leurs expressions respectives on aboutit à la relation générale suivante :

$$s / h_1 = 1,819 F_1 + 141,6 (h_1 / B) - 15,29 \quad (\text{I.34})$$

$$4,18 \leq F_1 \leq 11,71 \text{ et } 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066$$

La figure I.37 certifie que la relation (I.33) représente un assez bon ajustement pour la détermination de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil, connaissant le nombre de Froude incident  $F_1$ , et la hauteur relative  $(h_1/B)$  de l'ouverture.

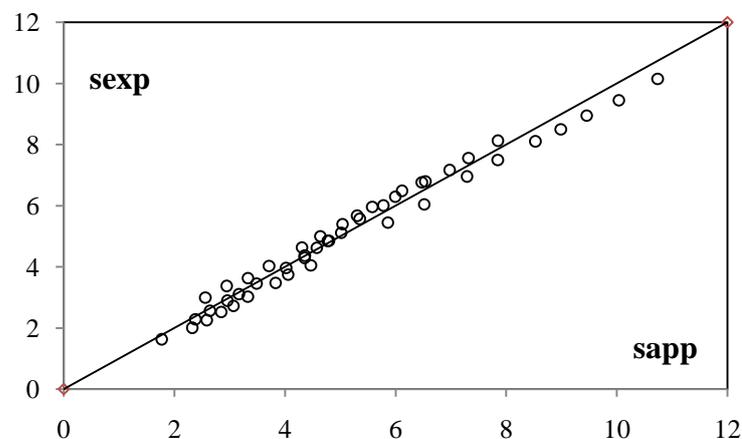


Figure I.37 : Variation de la de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction de la relation  $f(F_1, h_1/B)$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$ .

La figure I.37 montre que tous les points issus de l'équation (I.34) tournent autour de la première bissectrice.

Les écarts relatifs entre les mesures expérimentales de la hauteur relative du seuil et celles issues de l'équation globale d'ajustement (I.34) sont cités au tableau I.20, qui montre clairement que les erreurs relatives sont en majorité inférieures à 10%.

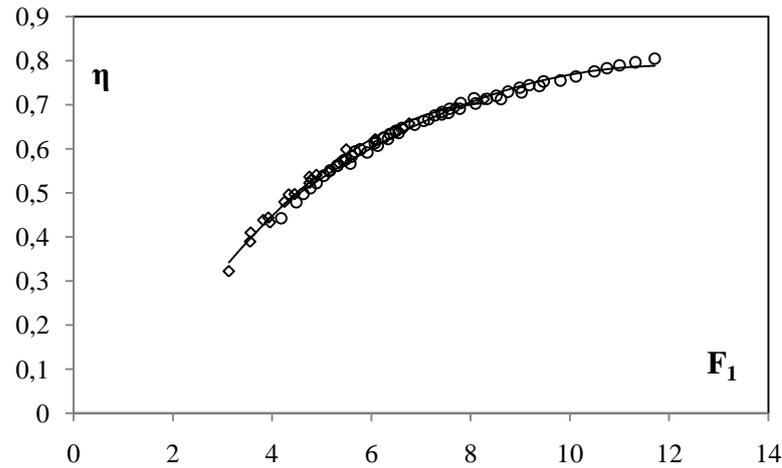
**Tableau I.20:** Ecarts relatifs entre  $Y$  expérimental et  $Y$  de la relation (I.34).

$s/h_1 th$	$s/h_1$	$\Delta S/S$ en %	$s/h_1 th$	$s/h_1$	$\Delta S/S$ en %
5,85748696	5,45	6,95668574	5,03733383	5,4	-7,19956593
6,51308205	6,05	7,11002942	5,30768242	5,6666667	-6,76348454
7,28867393	6,95	4,64657815	5,57984547	5,9666667	-6,93247209
7,84965416	7,5	4,45438936	5,99146592	6,3	-5,14955912
8,53042046	8,1	5,04571213	6,47676279	6,7666667	-4,47606188
8,98881847	8,5	5,43807255	2,38024903	2,2857143	3,97163191
9,45082601	8,95	5,29928294	2,63900038	2,5714286	2,56050664
10,0333688	9,45	5,81428642	2,95257455	2,8857143	2,26447288
10,7397322	10,15	5,49112575	3,1634697	3,1142857	1,55474857
4,35890582	4,36	-0,02510217	3,48255537	3,4571429	0,72970757
4,77012251	4,84	-1,46489927	4,02159678	3,9714286	1,24746917
5,35257059	5,56	-3,8753232	4,34930809	4,2857143	1,46215878
5,77337047	6	-3,9254285	4,56954898	4,6285714	-1,29164651
6,11284112	6,48	-6,00635405	4,7911927	4,8571429	-1,37648816
6,54068754	6,8	-3,96460553	5,01423043	5,1142857	-1,99542625
6,97239901	7,16	-2,69062327	1,76799543	1,625	8,08799772
7,32052794	7,56	-3,2712403	2,32061302	2	13,8158761
7,84728079	8,12	-3,47533391	2,57998565	2,25	12,7902126
2,56197016	3	-17,0973826	2,84204619	2,525	11,1555608
2,94139192	3,3666667	-14,4582834	3,06246354	2,725	11,0193488
3,32516674	3,6333333	-9,26770247	3,32938164	3,025	9,14228745
3,71324581	4,0333333	-8,62015354	3,82549909	3,475	9,16217941
4,30333198	4,6333333	-7,66850714	4,05386854	3,75	7,49576699
4,63523994	5	-7,86928109	4,4693823	4,05	9,38345104

#### I.3.3.4. Rendement du ressaut hydraulique

Le rendement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée, s'écrit comme suit :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2}$$



**Figure I.38:** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$

(o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur.

La figure I.38 montre la variation du rendement «  $\eta$  » en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . Pour les deux sections du canal, la figure montre que le rendement augmente avec l'accroissement du nombre de Froude.

En conséquence, pour des nombres de Froude  $F_1$  comprise entre 4 et 6, le rendement dans le canal composé se trouve légèrement inférieur à celle du canal rectangulaire. Au delà de 6 tous les points de mesure se rejoignent pour former un seul nuage de points.

Le tableau I.21 mentionne les valeurs du rendement  $\eta$  pour les nombres de Froude correspondants.

**Tableau I.21:** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure I.37.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$
0,32197316	3,1291846	0,44243348	4,1870921	0,66669026	7,155641
0,38912224	3,5574917	0,47869508	4,4908283	0,67556892	7,2811552
0,40958968	3,5699961	0,4978322	4,6333877	0,67796029	7,4222941
0,43812897	3,8231304	0,51084971	4,7774245	0,68341614	7,4297474
0,44352369	3,9259915	0,52231122	4,8985729	0,69098556	7,5793369
0,43262094	3,9583218	0,53900677	5,0452796	0,68151345	7,5568351
0,47939417	4,2488177	0,55062448	5,1721716	0,7038329	7,8055765
0,49600113	4,3357378	0,56182121	5,3179615	0,69073759	7,7828529
0,49683777	4,4537374	0,56129522	5,3143896	0,71475672	8,0723111
0,52236719	4,7533164	0,57294023	5,4434806	0,70272843	8,1029848
0,53629602	4,7533164	0,59328561	5,6718601	0,71309085	8,3342698
0,53030788	4,7919089	0,57546	5,4867399	0,71999599	8,5208536
0,54050741	4,8916229	0,58249396	5,6026546	0,71255483	8,6146607
0,5463352	5,1438827	0,56600618	5,5784391	0,72947486	8,7560116
0,56745542	5,3429871	0,59832918	5,7780342	0,73848293	8,9932939

Tableau I.21 (suite et fin): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure I.37.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$
0,59840944	5,4939609	0,59158311	5,9206168	0,72761564	9,0290684
0,62138718	6,0802842	0,61267173	6,0743084	0,74449644	9,1846367
0,61903903	6,0593777	0,60670054	6,129159	0,75272603	9,4741568
0,64609359	6,6429617	0,62552644	6,254429	0,74226947	9,3894042
0,65735948	6,7618093	0,63375039	6,3754804	0,75496713	9,8156941
0,69379427	7,6921794	0,62229367	6,3400938	0,7638303	10,124027
0,71241516	8,2646566	0,6405161	6,4973028	0,77567011	10,498197
		0,63562704	6,5533944	0,78254924	10,750148
		0,64710437	6,6198914	0,78911608	11,004082
		0,65490605	6,8777245	0,79618795	11,324266
		0,66324597	7,0601517	0,80434892	11,712505

### I.3.3.5. Profil de surface du ressaut

La variation du rapport  $y$  en fonction du rapport  $X$  est représentée à la Figure (I.39). Cette figure montre les points de mesures expérimentales pour différentes hauteurs  $h_1$ .

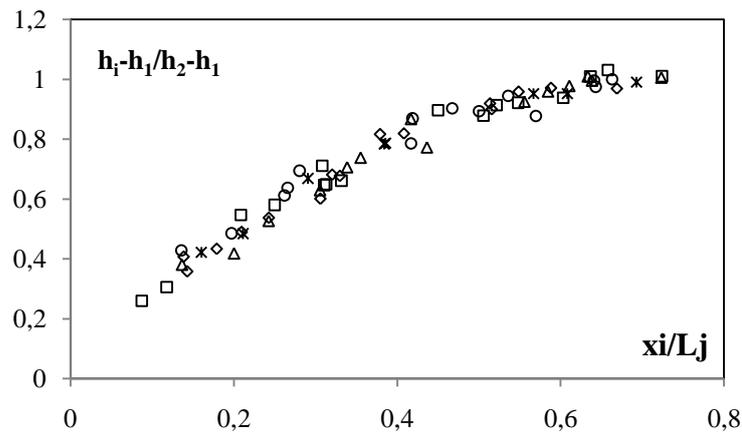


Figure I.39: Profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée,  $h_1$ : ( $\diamond$ ) 2; ( $\square$ ); 2,5; ( $\Delta$ ) 3; ( $\circ$ ) 3,5; ( $*$ ) 4.

La figure I.39 représente un nuage de points issu de l'expérimentation. Le rapport  $y$  se stabilise à la valeur 1.

Le tableau I.22, regroupe Les mesures expérimentales de  $X = x/Lr$ , et de  $y = (h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ .

**Tableau I.22:** Mesures expérimentales du profil de surface ( $y = f(X)$ ) du ressaut contrôlé par seuil épais dans un canal rectangulaire de section composée.

$X_i/L_j$	$(h_i - h_1)/(h_2 - h_1)$	$X_i/L_j$	$(h_i - h_1)/(h_2 - h_1)$	$X_i/L_j$	$(h_i - h_1)/(h_2 - h_1)$
0,13846154	0,40697674	0,30769231	0,67647059	0,33846154	0,9787234
0,17894737	0,43333333	0,67948718	0,98039216	0,72307692	0,63157895
0,37894737	0,81666667	0,19417476	0,4962406	0,13636364	0,98245614
0,3203125	0,68125	0,36893204	0,81954887	0,58441558	0,5546875
0,515625	0,9	0,20945946	0,75151515	0,35502959	0,9453125
0,0875	0,26041667	0,66891892	0,97575758	0,63313609	0,83950617
0,45	0,89583333	0,30588235	0,46192893	0,43617021	0,96296296
0,25	0,58035714	0,58823529	0,8071066	0,63829787	0,63684211
0,63636364	1,00892857	0,32972973	0,68899522	0,24242424	0,96315789
0,20869565	0,54666667	0,51351351	0,99521531	0,55555556	0,57425743
0,52173913	0,91333333	0,14285714	0,47488584	0,13571429	0,84653465
0,2	0,41836735	0,40816327	0,94063927	0,53571429	0,75943396
0,41666667	0,86734694	0,24271845	0,28820961	0,26582278	0,97169811
0,30526316	0,62962963	0,54854369	0,69432314	0,56962025	0,58482143
0,61052632	0,97777778	0,30821918	0,57083333	0,41860465	0,80803571
0,1969697	0,48543689	0,54794521	1,025	0,6627907	0,45744681
0,5	0,89320388	0,31288344	0,94202899	0,41666667	0,94680851
0,26190476	0,61157025	0,72392638	0,52830189	0,640625	0,57364341
0,64285714	0,97520661	0,11797753	0,90566038	0,16	0,86046512
0,28037383	0,69444444	0,50561798	0,81617647	0,384	0,82926829
0,46728972	0,90277778	0,31052632	1,00735294	0,29054054	0,9695122
0,21111111	0,48387097	0,65789474	0,52071006	0,60810811	0,39361702
0,56666667	0,9516129	0,33165829	0,92307692	0,38554217	0,76595745
0,51111111	0,92424242	0,60301508	0,68844221	0,69277108	0,84653465

## I.4. RESSAUT HYDRAULIQUE CONTRÔLÉ PAR MARCHÉ POSITIVE EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE

### I.4.1. Description du modèle

#### I.4.1.1. Description du canal

Dans le même dispositif expérimental, le contrôle du ressaut se fait par la mise en place d'une marche positive.

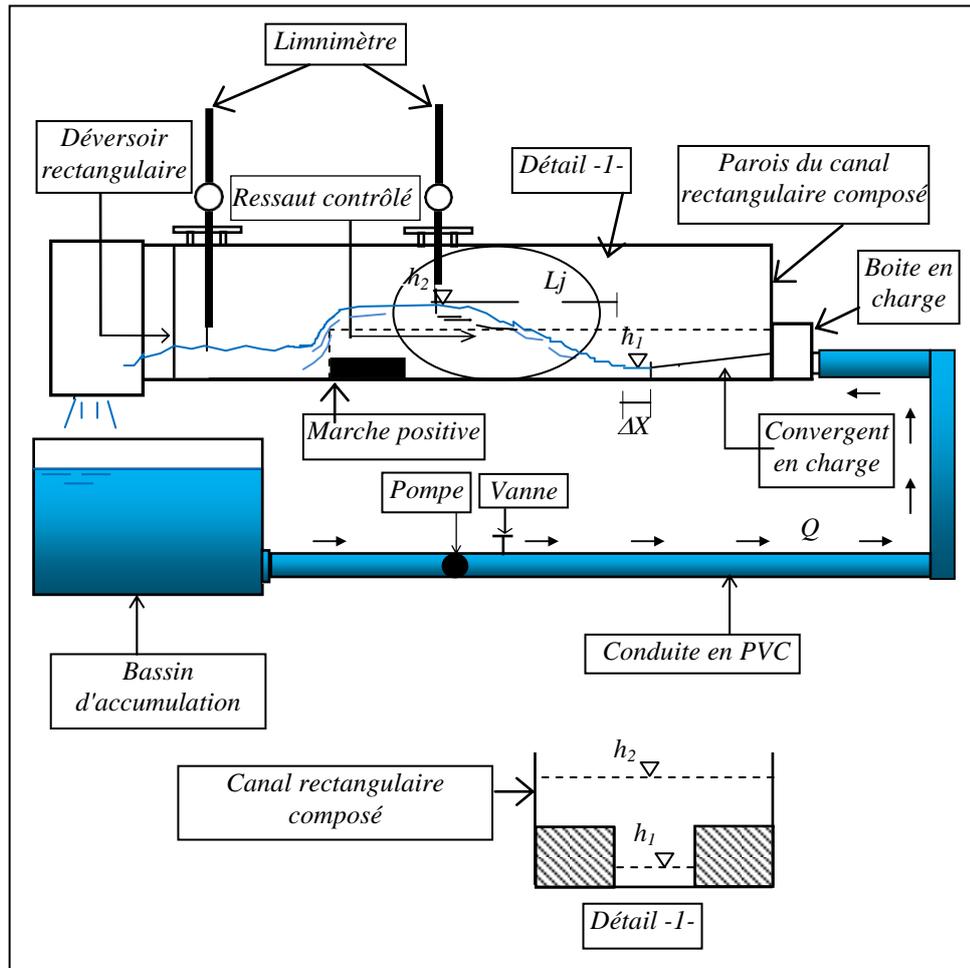


Figure I.40 : Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé, ayant servi à l'expérimentation.

#### V.4.1.2. Les marches positives

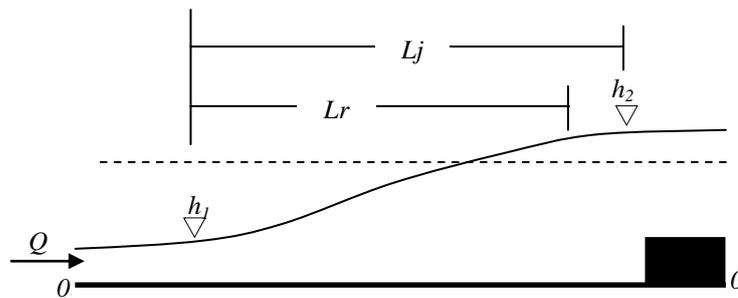
Une série de 15 marches positives métalliques, de forme rectangulaire de longueur 100 cm (photo I.15) utilisés dans notre dispositif expérimental, de différentes hauteurs:  $s = 3,5$  cm ; 4,2 cm ; 5,3 cm ; 6,3 cm ; 7,8 cm ; 9,8 cm ; 10,7 cm ; 11,8 cm ; 13,2 cm ; 14 cm ; 15 cm ; 16,1 cm ; 17,8 cm ; 18,8 cm et 20,3 cm, fixé à l'aval du canal rectangulaire composé. Dont le but est d'obtenir un nombre important de points de mesures.



*Photo I.15 : Photographie des marches positives.*

#### I.4.2. Résultats expérimentaux

Les photos I.16 et I.17 illustrent deux configurations typiques de ressaut contrôlé par marche positive en canal rectangulaire de section composée, pour la même hauteur initiale  $h_1 = 25$  mm et à débit volume croissant.



*Figure I.41: Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive évoluant dans un canal rectangulaire composé.*



*Photo I. 16 : Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive  
 $F_1 = 5,504$ ;  $s = 5,4$  cm;  $L_j = 100$  cm;  $h_2 = 15,8$  cm ;  $h_1 = 2,5$  cm*

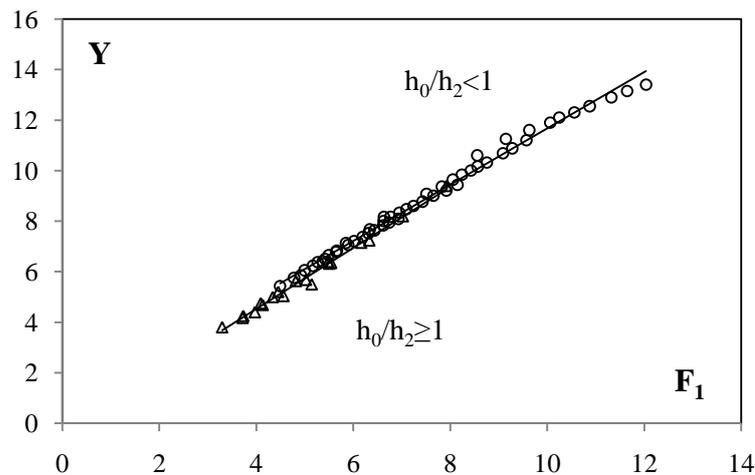


*Photos I.17 : Photographie d'un ressaut hydraulique contrôlé par marche positive  
 $F_1 = 8,56$ ;  $s = 15$  cm;  $L_j = 189$  cm;  $h_2 = 25,4$  cm;  $h_1 = 2,5$  cm*

### I.4.3. Analyse des résultats expérimentaux

#### I.4.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$

La Figure (I.42) montre la représentation graphique des hauteurs conjuguées  $Y$  en fonction des nombres de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



*Figure. I.42. Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux cas du canal, (o) points de mesures en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures en lit mineur.  
 (—) Courbes d'ajustement.*

L'ajustement des valeurs expérimentales par la méthode des moindres carrés est de type linéaire.

Nos mesures expérimentales montrent un décalage entre les deux allures obtenues pour les deux largeurs de bases du canal rectangulaire composé.

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad Y = 1,206 F_1 - 0,305 \quad R^2=0,991 \quad (\text{I.35})$$

$$3,29 < F_1 < 7,91$$

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad Y = 1,113 F_1 + 0,540 \quad R^2=0,993 \quad (\text{I.36})$$

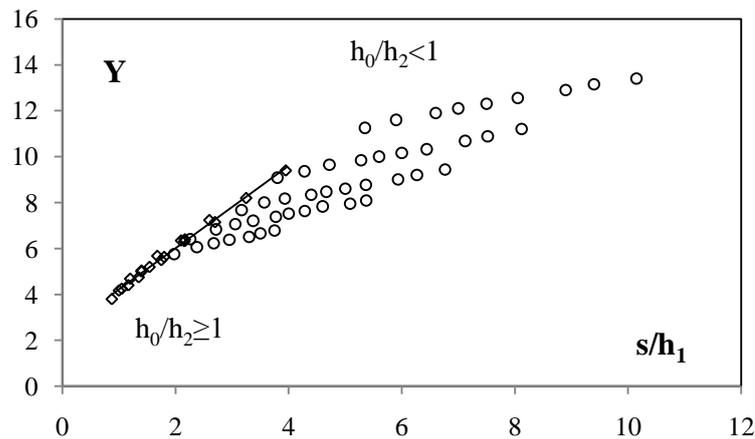
$$4,49 < F_1 < 12,03$$

Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y = f(F_1)$  pour les deux sections du canal, sont regroupées dans le tableau (I.23) :

**Tableau I.23.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
Y	$F_1$	Y	$F_1$	Y	$F_1$
3,8	3,2983075	5,425	4,4908283	8,6	7,2441638
4,1714286	3,7211836	5,75	4,7774245	8,7666667	7,4297474
4,25	3,7338767	5,8571429	4,9194425	9,08	7,5118986
4,4	3,9734395	6,05	4,9962171	9	7,6545035
4,75	4,0950702	6,225	5,1686327	9,36	7,8283222
4,6857143	4,1344247	6,375	5,2680278	9,2	7,9195254
5	4,3419688	6,4	5,3716358	9,64	8,0569888
5,2	4,4537374	6,5	5,4182987	9,4333333	8,1490681
5,04	4,5619224	6,65	5,4939609	9,84	8,2414955
5,6333333	4,8176949	6,775	5,6463304	10	8,4273896
5,68	5,0256354	6,8285714	5,6609141	10,16	8,5677144
5,5	5,1438827	7,1333333	5,8516392	10,6	8,5559912
6,4	5,4771168	7,0571429	5,895951	10,32	8,7560116
6,32	5,5040756	7,2	6,0146592	10,68	9,0887975
6,35	5,5445963	7,3714286	6,194194	11,25	9,1486577
7,15	6,1641494	7,5142857	6,314858	10,88	9,2808104
7,24	6,3330244	7,6666667	6,3400938	11,2	9,5713271
8,2	7,023539	7,6285714	6,4362955	11,6	9,6322262
9,4	7,9195254	8,16	6,6321922	11,9	10,062106
		7,8285714	6,6198914	12,1	10,248247
		8	6,6250158	12,3	10,560998
		7,9428571	6,7432415	12,55	10,876868
		8,1666667	6,7690348	12,9	11,324266
		8,0857143	6,929684	13,15	11,647496
		8,3333333	6,9505043	13,4	12,039354
		8,4666667	7,0968277		

La figure (I.43) représente la variation de Y en fonction de la hauteur relative du seuil  $S=s/h_1$ .



**Figure. I.43.** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil. (o) Points de mesures expérimentales en lit majeur; (◇) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—) courbe d'équation.

D'après cette figure on constate que :

- Pour  $h_0/h_2 \geq 1$  :

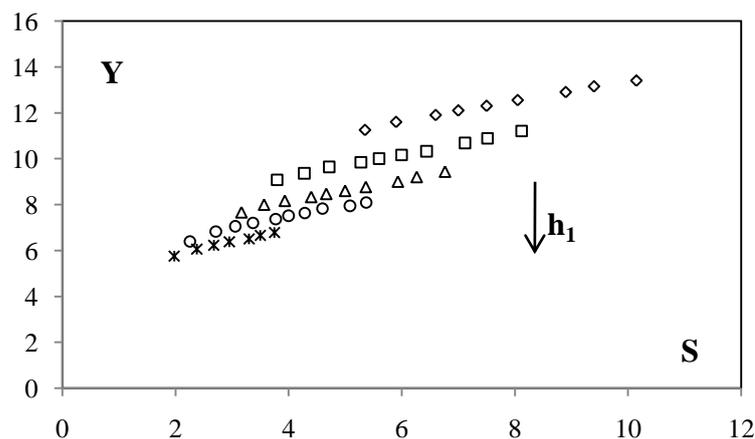
La figure montre que l'ajustement des mesures expérimentales par la méthode des moindres carrés est de type linéaire ;

$$Y = 1,794 (s/h_1) + 2,427 \quad R^2=0,993 \quad (\text{I.37})$$

- Pour  $h_0/h_2 < 1$  :

La figure montre cinq allures différentes chacune correspond à une ouverture bien déterminée, qui reflète l'écoulement qui se forme dans le lit majeur ( $\beta < 1$ ).

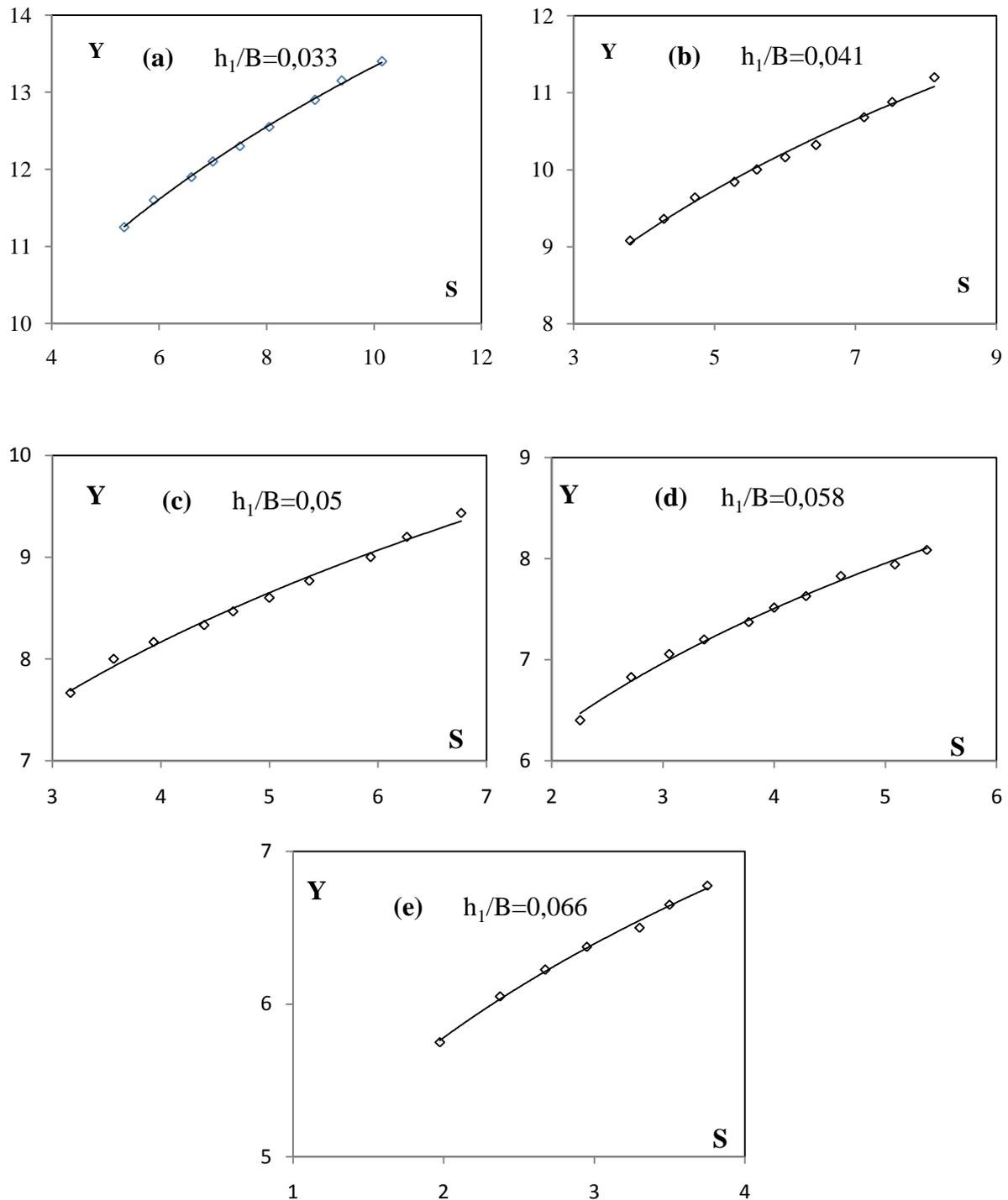
La figure (I.44) montre la variation de  $Y$  en fonction de la hauteur relative du  $S=s/h_1$  du seuil.



**Figure. I.44.** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  de la marche positive Pour  $h_0/h_2 < 1$ .  $h_1$ : (◇) 2 ; (□) 2,5 ; (Δ) 3 ; (o) 3,5 ; (\*) 4.

Cette figure montre une série de cinq allures superposées. Chaque allure correspond à une hauteur  $h_1$  d'une ouverture bien déterminée. On remarque que pour la même valeur de la marche positive, le rapport  $Y$  diminue avec l'augmentation des ouvertures.

Les figures I.45 (a, b, c, d, e) montrent la variation de  $Y$  en fonction la hauteur relative  $s/h_1$  de la marche positive, pour les cinq ouvertures, tels que :  $h_1/B = 0,033$  ;  $0,041$  ;  $0,05$  ;  $0,058$  ;  $0,066$ .



**Figure. I.45 (a, b, c, d, e).** Variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut contrôlé par marche positive en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  de la marche respectivement pour  $h_1/B = (0,03 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066)$ . (o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.

Les figures I.45 (a, b, c, d, e) montrent que l'ajustement des mesures expérimentales du rapport  $Y$  en fonction de la hauteur relative du seuil suit une loi de type puissance de la forme  $Y = a S^b$ .

Les données ayant servi au traçage des figures I.45 (a, b, c, d, e) sont rassemblées au tableau I.24.

**Tableau I.24.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y = f(s/h_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Y$	$s/h_1$	$Y$	$s/h_1$	$Y$	$s/h_1$
3,8	0,875	11,25	5,35	8,4666667	4,6666667
4,1714286	1	11,6	5,9	8,6	5
4,25	1,05	11,9	6,6	8,7666667	5,3666667
4,4	1,1666667	12,1	7	9	5,9333333
4,75	1,35	12,3	7,5	9,2	6,2666667
4,6857143	1,2	12,55	8,05	9,4333333	6,7666667
5	1,4	12,9	8,9	6,4	2,2571429
5,2	1,5428571	13,15	9,4	6,8285714	2,7142857
5,04	1,4	13,4	10,15	7,0571429	3,0571429
5,6333333	1,8	9,08	3,8	7,2	3,3714286
5,68	1,68	9,36	4,28	7,3714286	3,7714286
5,5	1,75	9,64	4,72	7,5142857	4
6,4	2,1666667	9,84	5,28	7,6285714	4,2857143
6,32	2,16	10	5,6	7,8285714	4,6
6,35	2,1	10,16	6	7,9428571	5,0857143
7,15	2,7	10,32	6,44	8,0857143	5,3714286
7,24	2,6	10,68	7,12	5,75	1,975
8,2	3,25	10,88	7,52	6,05	2,375
9,4	3,95	11,2	8,12	6,225	2,675
		7,6666667	3,1666667	6,375	2,95
		8	3,5666667	6,5	3,3
		8,1666667	3,9333333	6,65	3,5
		8,3333333	4,4	6,775	3,75

Le tableau I.25 regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées à la hauteur relative du seuil  $s/h_1$ , pour les différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures testées.

**Tableau I.25.** Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant  $Y$  à la hauteur relative du seuil pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

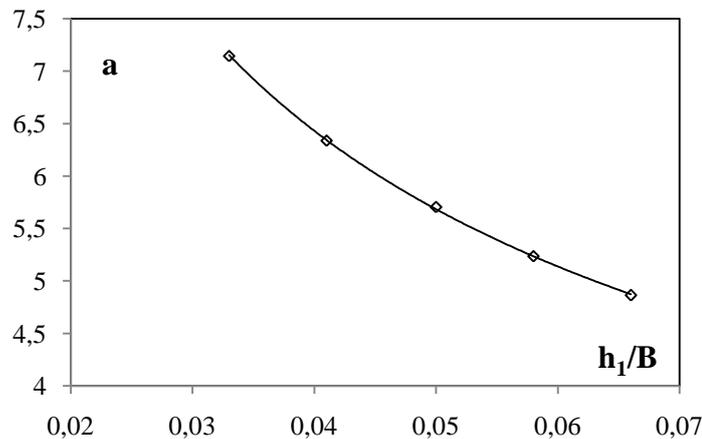
$h_1/B$	$a$	$b$	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	7,144	0,271	$Y = 7,144 s/h_1^{0,271}$	0,998
0,041	6,338	0,266	$Y = 6,338 s/h_1^{0,266}$	0,992
0,05	5,706	0,258	$Y = 5,706 s/h_1^{0,258}$	0,991
0,058	5,236	0,259	$Y = 5,236 s/h_1^{0,259}$	0,993
0,066	4,864	0,248	$Y = 4,864 s/h_1^{0,248}$	0,996

L'ajustement des relations expérimentales liant le rapport  $Y = h_2/h_1$  des hauteurs conjuguées à la hauteur relative du seuil  $s/h_1$ , sont de type puissance, tel que :  $Y = a X^b$ , pour toutes les hauteurs  $h_1$  des ouvertures testées,

Le tableau I.25 montre que les paramètres 'a' et 'b' diminuent progressivement avec l'augmentation des hauteurs relatives amont  $y_1$ . L'ajustement statistique des couples des valeurs  $(a, y_1)$  par la méthode des moindres carrés donne une relation de type puissance d'équation :

$$a = 1,084 (h_1 / B)^{-0,55} \quad R^2=0,999 \quad (\text{I.38})$$

Celle-ci est représentée dans la figure (I.46)

**Figure I.46:** Variation du coefficient "a" en fonction de la hauteur relative " $y_1$ ".

Cependant, l'ajustement des couples des valeurs  $(b, y_1)$  par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation :

$$b = - 0,638 (h_1 / B) + 0,292 ; R^2=0,921 \quad (\text{I.39})$$

Celle-ci est représentée dans la figure (I.47)

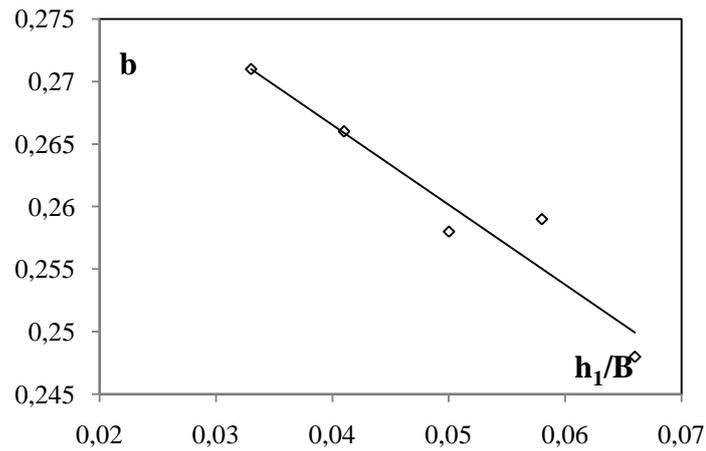


Figure I.47: Variation du coefficient "b" en fonction de la hauteur relative "y<sub>1</sub>".

En remplaçant les paramètres (a) et (b) par leurs expressions respectives on obtient la relation générale suivante :

$$Y = (1,084 (h_1 / B)^{-0,55}) \cdot s / h_1^{(-0,638 (h_1/b)+0,292)} \quad (\text{I.40})$$

$$4,49 \leq F_1 \leq 12,03 \text{ et } 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066$$

La figure (I.48) montre que l'ajustement des points expérimentaux avec la relation (I.40) suit parfaitement la première bissectrice.

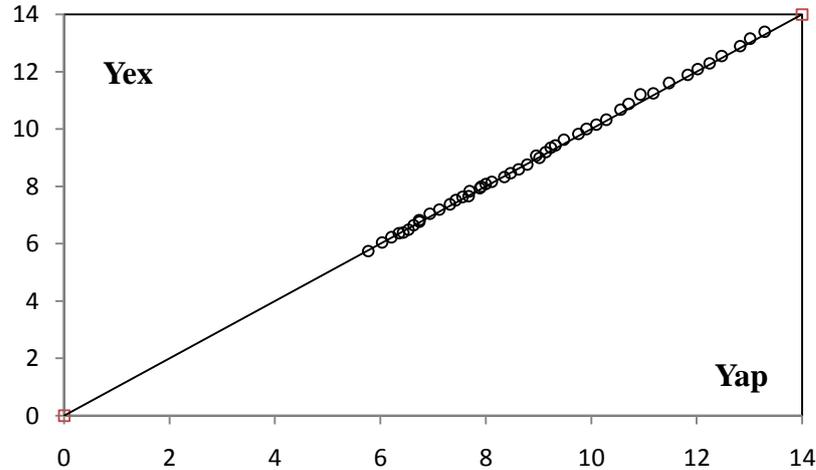


Figure I.48 : Variation de  $Y_{exp}$  en fonction de  $Y_{app}$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $Y_{exp} = Y_{app}$ .

Le tableau I.26, regroupe les écarts relatifs entre les mesures expérimentales du rapport des hauteurs conjuguées et celles issues de l'équation globale d'ajustement (I.40). Les erreurs relatives sont inférieures à 5%.

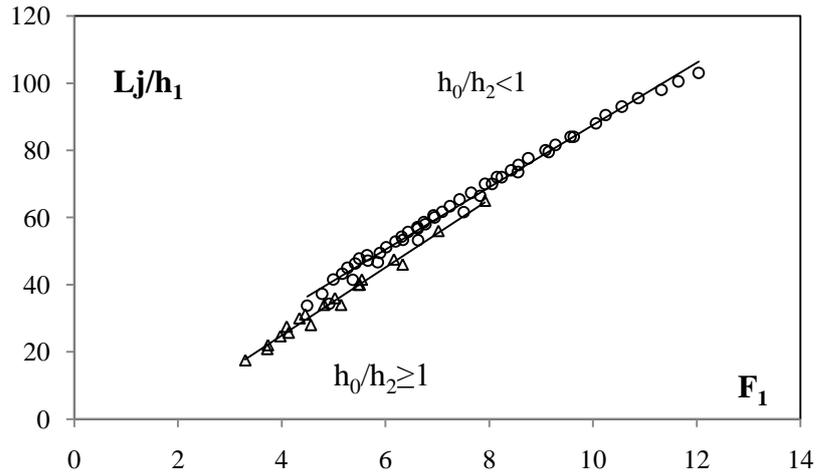
Tableau I.26 : Ecart relatif entre  $Y$  expérimental et  $Y$  de la relation (I.40).

$Y_{exp}$	$Y_{relation}$	$\Delta Y/Y(en\%)$	$Y_{exp}$	$Y_{relation}$	$\Delta Y/Y(en\%)$
11,25	11,173049	0,68400875	8,46666667	8,47298259	-0,07459755
11,6	11,4722246	1,10151168	8,6	8,62429055	-0,2824482
11,9	11,8248621	0,63141084	8,76666667	8,78230155	-0,1783447
12,1	12,0142467	0,70870504	9	9,01140312	-0,12670137
12,3	12,2401746	0,48638505	9,2	9,1386567	0,66677505
12,55	12,4763338	0,58698175	9,43333333	9,32041554	1,19700845
12,9	12,8191389	0,62683041	6,4	6,43536752	-0,55261753
13,15	13,0097473	1,06656011	6,82857143	6,73879323	1,31474346
13,4	13,2822388	0,8788148	7,05714286	6,94204257	1,63097571
9,08	8,94978674	1,43406674	7,2	7,11383331	1,19675962
9,36	9,23452114	1,34058614	7,37142857	7,3158928	0,75339231
9,64	9,47553651	1,70605278	7,51428571	7,42422219	1,19856395
9,84	9,75941952	0,81890728	7,62857143	7,55328765	0,98686604
10	9,91179178	0,88208223	7,82857143	7,68800731	1,7955271
10,16	10,0934872	0,65465345	7,94285714	7,88322575	0,75075496
10,32	10,2833213	0,35541374	8,08571429	7,99160253	1,16392636
10,68	10,5587225	1,1355572	5,75	5,76471998	-0,25599968
10,88	10,7117728	1,54620579	6,05	6,02902395	0,34671155
11,2	10,9304746	2,40647659	6,225	6,20588717	0,30703348
7,66666667	7,67064983	-0,05195434	6,375	6,35526666	0,30954252
8	7,90834441	1,14569485	6,5	6,53084177	-0,47448876
8,16666667	8,10939576	0,70127642	6,65	6,62491808	0,37717166
8,33333333	8,34603898	-0,15246774	6,775	6,73695387	0,56156651

### I.4.3.2. Longueurs caractéristiques du ressaut

#### I.4.3.2.1. Variation de la longueur relative $L_j/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$

Figure (I.49) montre la variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure I.49.** Variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , (o) points de mesures en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures en lit mineur. (—) Courbes d'ajustement.

Cette figure montre deux allures de points de mesure pour les deux lits du canal composé, telles que :

- pour  $h_0/h_2 \geq 1$  :

$$L_j / h_1 = 10,13 F_1 - 15,66 \quad (\text{I.41})$$

$$R^2 = 0,998$$

- pour  $h_0/h_2 < 1$  :

$$L_j / h_1 = 9,267 F_1 - 5,144 \quad (\text{I.42})$$

$$R^2 = 0,991$$

Les valeurs ayant servi au traçage des courbes  $L_j/h_1 = f(F_1)$ , pour les deux sections du canal sont rassemblées au tableau I.27.

**Tableau I.27.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $L_j/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

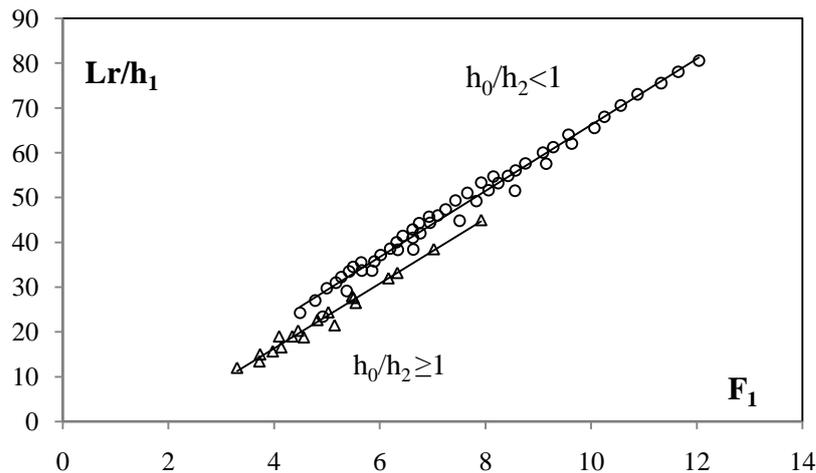
$h/h_2 \geq 1$		$h/h_2 < 1$			
$F_1$	$L_j/h_1$	$F_1$	$L_j/h_1$	$F_1$	$L_j/h_1$
3,2983075	17,5	4,4908283	33,75	7,2441638	63,333333
3,7211836	20,857143	4,7774245	37,25	7,4297474	65,333333
3,7338767	22	4,9194425	34,285714	7,5118986	61,6
3,9734395	24,666667	4,9962171	41,5	7,6545035	67,333333
4,0950702	27,5	5,1686327	43,25	7,8283222	66,4
4,1344247	25,714286	5,2680278	45	7,9195254	70
4,3419688	30	5,3716358	41,428571	8,0569888	70
4,4537374	31,142857	5,4182987	46,25	8,1490681	72
4,5619224	28	5,4939609	47,75	8,2414955	72
4,8176949	34	5,6463304	48,75	8,4273896	74
5,0256354	36	5,6609141	47,142857	8,5677144	75,6
5,1438827	34	5,8516392	46,666667	8,5559912	73,5
5,4771168	40	5,895951	49,428571	8,7560116	77,6
5,5040756	40	6,0146592	51,142857	9,0887975	80

**Tableau I.27 (suite et fin).** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Lj/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

5,5445963	41,5	6,194194	52,857143	9,1486577	79,5
6,1641494	47,5	6,314858	54,285714	9,2808104	81,6
6,3330244	46	6,3400938	53,333333	9,5713271	84
7,023539	56	6,4362955	55,714286	9,6322262	84
7,9195254	65	6,6321922	53,2	10,062106	88
		6,6198914	57,142857	10,248247	90,5
		6,6250158	56,666667	10,560998	93
		6,7432415	58,571429	10,876868	95,5
		6,7690348	58	11,324266	98
		6,929684	60,571429	11,647496	100,5
		6,9505043	60	12,039354	103
		7,0968277	61,666667		

#### I.4.3.2.2. Variation de la longueur relative $Lr/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$

La figure (I.50) montre la variation de la longueur relative  $Lr/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure I.50.** Variation de la longueur relative  $Lr/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ ,  
 (o) Points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur.  
 (—) Courbes d'ajustement.

L'ajustement des points de mesure expérimentales montre deux allures chacune correspond à une section du canal rectangulaire composé, telle que :

- pour  $h_0/h_2 \geq 1$  :

$$Lr/h_1 = 7,225 F_1 - 12,59 \quad (\text{I.43})$$

$$R^2 = 0,984$$

- pour  $h_0/h_2 < 1$  :

$$Lr/h_1 = 7,375 F_1 - 7,591 \quad (\text{I.44})$$

$$R^2 = 0,986$$

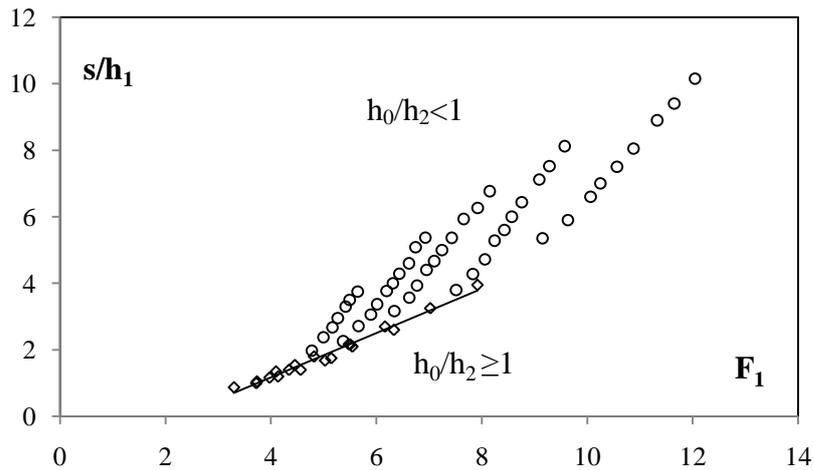
Le tableau I.28 regroupe les valeurs ayant servi au traçage des courbes  $Lr/h_1 = f(F_1)$ , pour les deux sections du canal.

**Tableau I.28.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Lr/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$Lr/h_1$	$F_1$	$Lr/h_1$	$F_1$	$Lr/h_1$
3,2983075	12	4,4908283	24,25	7,155641	7,2441638
3,7211836	13,428571	4,7774245	27	7,2811552	7,4297474
3,7338767	15	4,9194425	23,428571	7,4222941	7,5118986
3,9734395	15,666667	4,9962171	29,75	7,4297474	7,6545035
4,0950702	19	5,1686327	31	7,5793369	7,8283222
4,1344247	16,571429	5,2680278	32,25	7,5568351	7,9195254
4,3419688	19	5,3716358	29,142857	7,8055765	8,0569888
4,4537374	20,285714	5,4182987	33,5	7,7828529	8,1490681
4,5619224	18,8	5,4939609	34,5	8,0723111	8,2414955
4,8176949	22,666667	5,6463304	35,5	8,1029848	8,4273896
5,0256354	24,4	5,6609141	33,714286	8,3342698	8,5677144
5,1438827	21,5	5,8516392	33,666667	8,5208536	8,5559912
5,4771168	28	5,895951	35,714286	8,6146607	8,7560116
5,5040756	27,6	6,0146592	37,142857	8,7560116	9,0887975
5,5445963	26,5	6,194194	38,571429	8,9932939	9,1486577
6,1641494	32	6,314858	40	9,0290684	9,2808104
6,3330244	33,2	6,3400938	38,333333	9,1846367	9,5713271
7,023539	38,5	6,4362955	41,428571	9,4741568	9,6322262
7,9195254	45	6,6321922	38,4	9,3894042	10,062106
		6,6198914	42,857143	9,8156941	10,248247
		6,6250158	41	10,124027	10,560998
		6,7432415	44,285714	10,498197	10,876868
		6,7690348	42	10,750148	11,324266
		6,929684	45,714286	11,004082	11,647496
		6,9505043	44,333333	11,324266	12,039354
		7,0968277	46	11,712505	

#### I.4.3.3. Variation de la hauteur relative $s/h_1$ en fonction du nombre de Froude $F_1$

La figure (I.51) montre la variation de la hauteur relative du seuil  $S=s/h_1$  en fonction de nombre de Froude de l'écoulement incident.



**Figure. I.51.** Variation de la hauteur relative  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ ,  
 (o) Points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\emptyset$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (—)  
 Courbes d'ajustement.

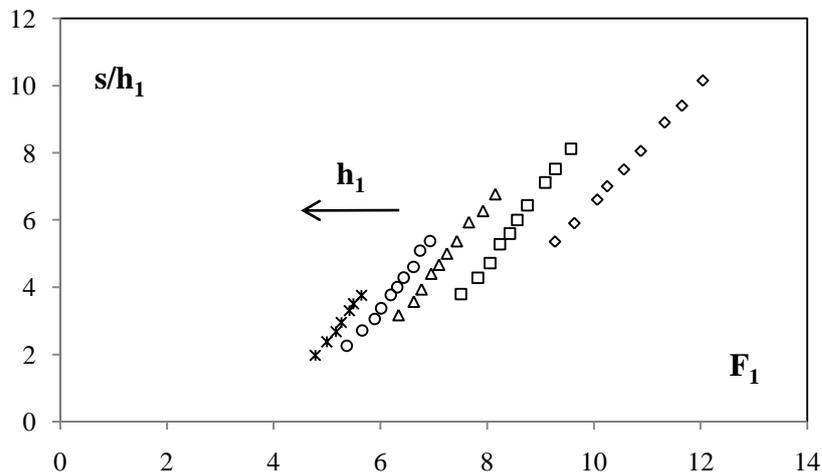
Cette figure montre deux configurations :

Pour ( $h_0/h_2 \geq 1$ ) l'ajustement des points expérimentaux a donné une courbe unique de type linéaire telle que :

$$s/h_1 = 0,667F_1 - 1,496 \quad (\text{I.45})$$

$$R^2 = 0,982$$

Cependant, pour ( $h_0/h_2 < 1$ ) l'ajustement des points expérimentaux montre une série de cinq allures chacune correspond à une ouverture bien déterminée.

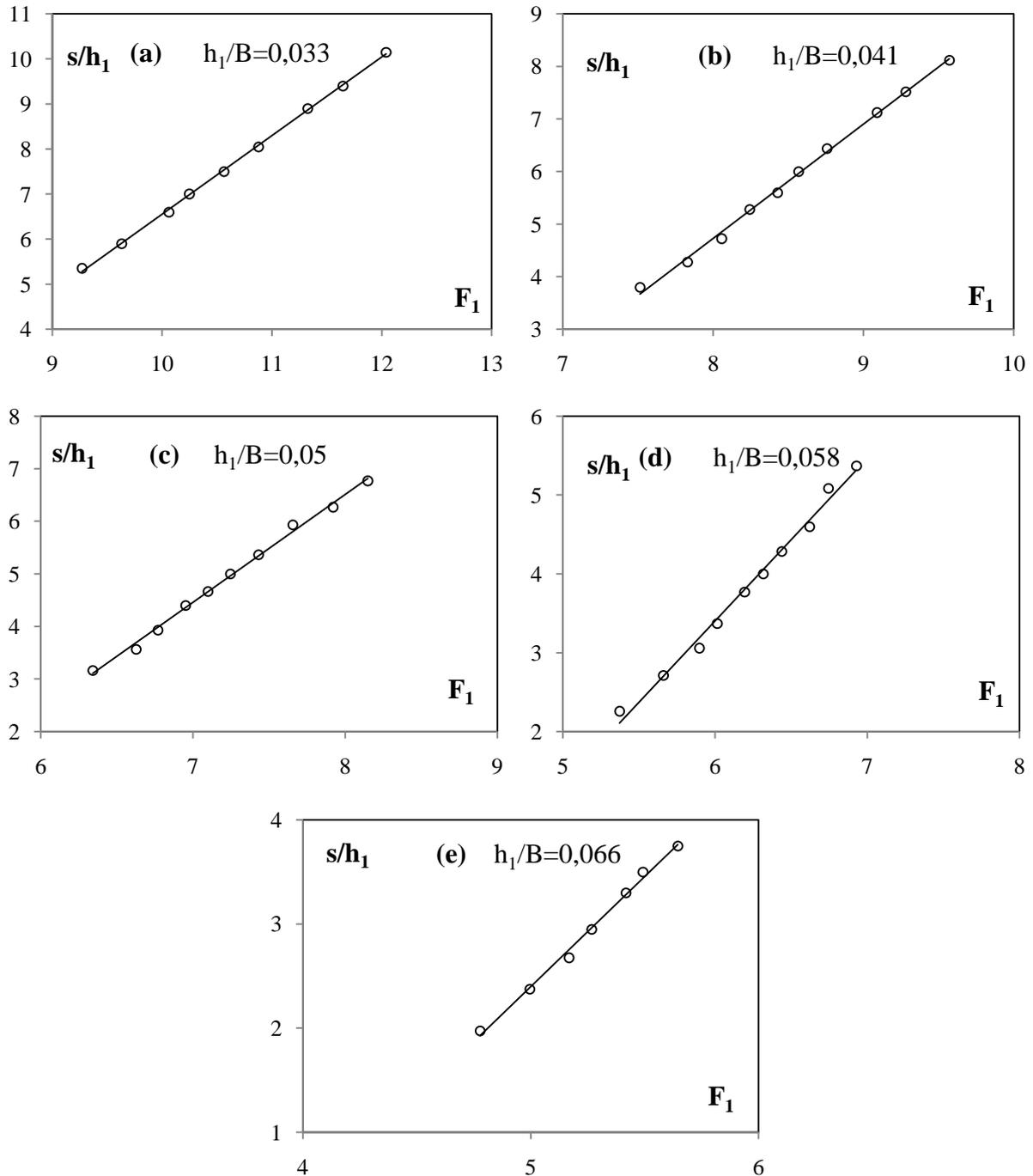


**Figure. I.52.** Variation du rapport  $S = s/h_1$  de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  Pour  $h_0/h_2 \geq 1$ .  $h_1$ : ( $\emptyset$ ) 2 ; ( $\square$ ) 2,5 ; ( $\Delta$ ) 3 ; (o) 3,5 ; (\* ) 4.

Cette figure montre que la hauteur relative du seuil augmente linéairement avec l'augmentation du nombre de Froude. Ainsi pour la même valeur de seuil relative, le nombre de Froude augmente avec la diminution de la hauteur relative des ouvertures.

Les figures I.53. (a, b, c, d, e) regroupe la variation de la hauteur relative du seuil  $S = s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les cinq ouvertures testées, telles que :

$h_1/B = 0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066$ .



**Figure. I.53. (a, b, c, d, e).** Variation du rapport de la hauteur relative du seuil  $S = s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  du ressaut respectivement pour  $h_1/B = (0,033 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,06)$ .

(o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.

Selon les figures I.51. (a, b, c, d, e), l'ajustement des mesures expérimentales de la variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire de la forme  $s/h_1 = a F_1 + b$ .

Le tableau I.31 regroupe les données ayant servi au traçage des figures I.51 (a, b, c, d, e).

**Tableau I.29.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $s/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$
0,875	3,2983075	5,35	9,2687704	4,6666667	7,0968277
1	3,7211836	5,9	9,6322262	5	7,2441638
1,05	3,7338767	6,6	10,062106	5,3666667	7,4297474
1,1666667	3,9734395	7	10,248247	5,9333333	7,6545035
1,35	4,0950702	7,5	10,560998	6,2666667	7,9195254
1,2	4,1344247	8,05	10,876868	6,7666667	8,1490681
1,4	4,3419688	8,9	11,324266	2,2571429	5,3716358
1,5428571	4,4537374	9,4	11,647496	2,7142857	5,6609141
1,4	4,5619224	10,15	12,039354	3,0571429	5,895951
1,8	4,8176949	3,8	7,5118986	3,3714286	6,0146592
1,68	5,0256354	4,28	7,8283222	3,7714286	6,194194
1,75	5,1438827	4,72	8,0569888	4	6,314858
2,1666667	5,4771168	5,28	8,2414955	4,2857143	6,4362955
2,16	5,5040756	5,6	8,4273896	4,6	6,6198914
2,1	5,5445963	6	8,5677144	5,0857143	6,7432415
2,7	6,1641494	6,44	8,7560116	5,3714286	6,929684
2,6	6,3330244	7,12	9,0887975	1,975	4,7774245
3,25	7,023539	7,52	9,2808104	2,375	4,9962171
3,95	7,9195254	8,12	9,5713271	2,675	5,1686327
		3,1666667	6,3400938	2,95	5,2680278
		3,5666667	6,6250158	3,3	5,4182987
		3,9333333	6,7690348	3,5	5,4939609
		4,4	6,9505043	3,75	5,6463304

Le tableau I.30 regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport  $S = s/h_1$  des hauteurs relatives du seuil au nombre de Froude de l'écoulement incident, pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

**Tableau I.30.** Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant  $S = s/h_1$  au nombre de Froude, pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

$h_1/B$	$a$	$b$	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	1,743	- 10,87	$s/h_1 = 1,743 F_1 - 10,87$	0,999
0,041	2,171	- 12,63	$s/h_1 = 2,171 F_1 - 12,63$	0,997
0,05	2,049	- 9,882	$s/h_1 = 2,049 F_1 - 9,882$	0,995
0,058	2,060	- 8,961	$s/h_1 = 2,060 F_1 - 8,961$	0,991
0,066	2,112	- 8,161	$s/h_1 = 2,112 F_1 - 8,161$	0,994

Le tableau I.33 montre que les paramètres 'a' et 'b' augmentent progressivement avec l'augmentation de la hauteur relative amont  $y_1$ .

Les figures I.54 et I.55 montre l'ajustement statistique des couples de  $(a, y_1)$  et  $(b, y_1)$  par la méthode des moindres carrés.

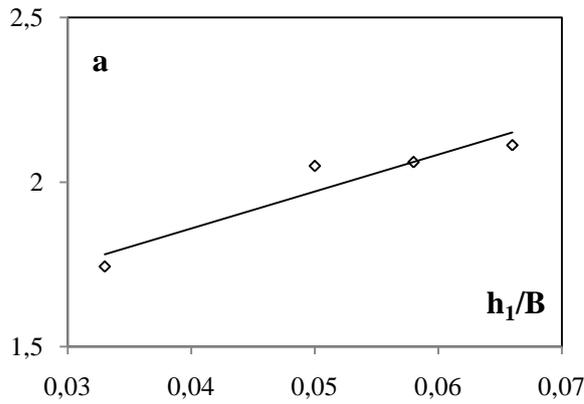


Figure I.54: Variation du coefficient "a" en fonction de la hauteur relative " $y_1$ "

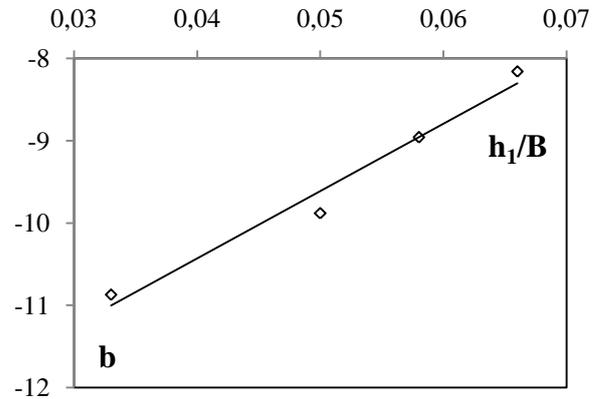


Figure I.55: Variation du coefficient "b" en fonction de la hauteur relative " $y_1$ ".

Selon les figures I.54 et I.55, l'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation des paramètres 'a' et 'b' en fonction de  $y_1$ , suit parfaitement une loi de type linéaire que l'on peut écrire comme suit :

$$a = 11,23 h_1 / B + 1,409 \quad ; \quad R^2 = 0,893 \quad (\text{I.46})$$

$$b = 81,78 h_1 / B - 13,70 \quad ; \quad R^2 = 0,973 \quad (\text{I.47})$$

En remplaçant les paramètres (a) et (b) par leurs expressions respectives on obtient la relation générale suivante :

$$s / h_1 = (11,23 h_1 / B + 1,409) F_1 + 81,78 h_1 / B - 13,70 \quad (\text{I.48})$$

$$4,49 \leq F_1 \leq 12,03 \quad \text{et} \quad 0,033 \leq h_1 / B \leq 0,066$$

La figure I.56 confirme que la relation (I.48) représente un assez bon ajustement pour la détermination de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil, connaissant le nombre de Froude incident  $F_1$ , et la hauteur relative  $(h_1/B)$  de l'ouverture.

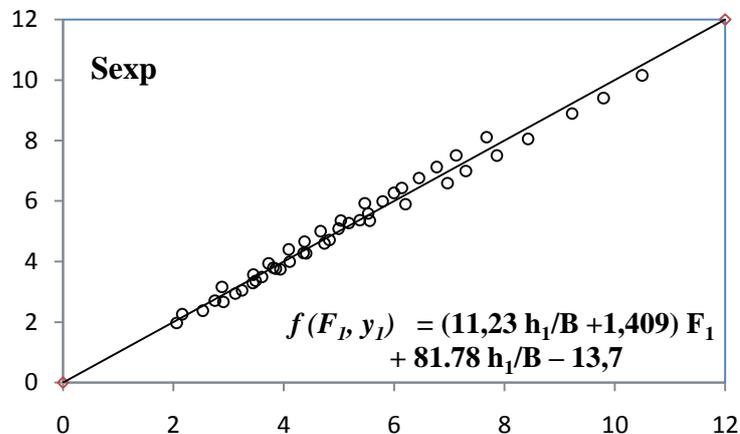


Figure I.56 : Variation de la de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction de la relation  $f(F_1, y_1)$ . (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$ .

La figure I.56 montre que les points issus de l'équation (I.48) se répartissent de manière quasi uniforme autour de la première bissectrice.

Les écarts relatifs entre les mesures expérimentales de la hauteur relative du seuil et celles issues de l'équation globale d'ajustement (I.48) sont mentionnés au tableau (I.31), qui montre clairement que les erreurs relatives sont en majorités inférieures à 5%.

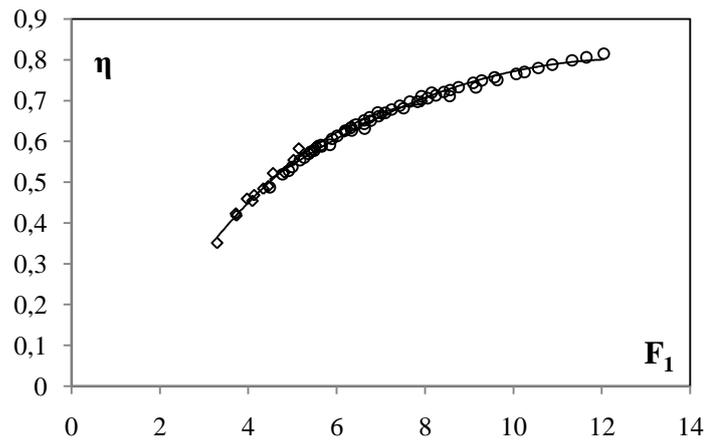
**Tableau I.31:** Ecarts relatifs entre  $S$  expérimental et  $S$  de la relation (I.48)

$s/h_1$ th	$s/h_1$	$\Delta S/S$ en %	$s/h_1$ th	$s/h_1$	$\Delta S/S$ en %
5,55530723	5,35	-3,83751837	4,37329904	4,66666667	6,28644912
6,2034701	5,9	-5,14356099	4,66362477	5	6,7275045
6,97008929	6,6	-5,60741353	5,02931726	5,36666667	6,28601386
7,30204051	7	-4,31486447	5,47219912	5,93333333	7,77192486
7,85978001	7,5	-4,79706685	5,99442485	6,26666667	4,34428435
8,42308046	8,05	-4,63453983	6,44673866	6,76666667	4,7280001
9,22094025	8,9	-3,60607019	2,15800398	2,25714286	4,39222863
9,7973681	9,4	-4,22732024	2,75509846	2,71428571	-1,50362742
10,4961819	10,15	-3,41065865	3,24023416	3,05714286	-5,98896785
3,8067077	3,8	-0,17651848	3,48525781	3,37142857	-3,37629103
4,40060848	4,28	-2,81795521	3,85583253	3,77142857	-2,23798387
4,8297965	4,72	-2,32619701	4,10489312	4	-2,62232801
5,17610032	5,28	1,96779698	4,35555028	4,28571429	-1,62950644
5,52500799	5,6	1,33914305	4,73450752	4,6	-2,92407659
5,7883859	6	3,52690171	4,9891123	5,08571429	1,89947716
6,14180414	6,44	4,63037044	5,37394529	5,37142857	-0,04685385
6,76641543	7,12	4,96607542	2,06008967	1,975	-4,30833755
7,12680768	7,52	5,22862124	2,53217109	2,375	-6,61773001
7,67208339	8,12	5,51621439	2,90418641	2,675	-8,56771619
2,88215492	3,16666667	8,98458139	3,11864789	2,95	-5,71687778
3,44359368	3,56666667	3,45064447	3,44288254	3,3	-4,32977401
3,72738305	3,93333333	5,23602408	3,60613623	3,5	-3,03246362
4,08496871	4,4	7,159802	3,93489887	3,75	-4,93063661

#### I.4.3.4. Rendement du ressaut hydraulique

La relation qui nous a permis de calculer le rendement du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée, s'écrit comme suit :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2}$$



**Figure I.57:** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
 (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur.

La figure I.57 montre la variation du rendement «  $\eta$  » en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les deux fractions du canal. On remarque que le rendement augmente progressivement avec l'augmentation du nombre de Froude.

En effet, pour des nombres de Froude  $F_1$  comprise entre 4 et 6, les points de mesure du canal composé se trouvent légèrement décalé au dessous du canal rectangulaire. Au delà de 6 tous les points de mesures se rejoignent pour former un seul nuage de points.

Le tableau I.32 regroupe les valeurs du rendement  $\eta$  pour les nombres de Froude correspondants.

**Tableau I.32:** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure I.56.

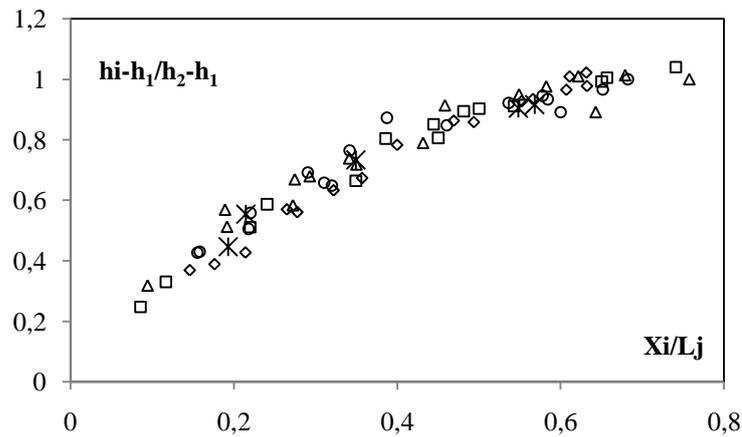
$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$
0,35138671	3,2983075	0,48744047	4,4908283	0,67807764	7,2441638
0,42332829	3,7211836	0,51924246	4,7774245	0,68773967	7,4297474
0,41839404	3,7338767	0,52842755	4,9194425	0,68154906	7,5118986
0,45944527	3,9734395	0,53728494	4,9962171	0,69775102	7,6545035
0,45426376	4,0950702	0,5540626	5,1686327	0,69754803	7,8283222
0,46840644	4,1344247	0,56025662	5,2680278	0,71093222	7,9195254
0,48428206	4,3419688	0,56966491	5,3716358	0,70606195	8,0569888
0,49012248	4,4537374	0,5750586	5,4182987	0,71986727	8,1490681
0,52219458	4,5619224	0,57727306	5,4939609	0,71323025	8,2414955
0,52407907	4,8176949	0,59124475	5,6463304	0,7211435	8,4273896
0,554505	5,0256354	0,58738716	5,6609141	0,72588156	8,5677144
0,58275152	5,1438827	0,59182671	5,8516392	0,71111294	8,5559912
0,57709698	5,4771168	0,60610396	5,895951	0,73327605	8,7560116
0,58512071	5,5040756	0,61364152	6,0146592	0,74374144	9,0887975
0,58884028	5,5445963	0,62646501	6,194194	0,73228411	9,1486577

**Tableau I.32 (suite et fin):** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure I.56.

0,62388811	6,1641494	0,63342083	6,314858	0,74957207	9,2808104
0,63794439	6,3330244	0,6264289	6,3400938	0,75755077	9,5713271
0,66620673	7,023539	0,64139534	6,4362955	0,75075302	9,6322262
0,69854531	7,9195254	0,63180779	6,6321922	0,76550418	10,062106
		0,65173375	6,6198914	0,77019447	10,248247
		0,64294048	6,6250158	0,77988652	10,560998
		0,65913212	6,7432415	0,7882091	10,876868
		0,65075598	6,7690348	0,79908688	11,324266
		0,67087071	6,929684	0,80635038	11,647496
		0,6616625	6,9505043	0,81520276	12,039354
		0,67002296	7,0968277		

#### I.4.3.5. Profil de surface du ressaut

La variation du rapport  $y$  en fonction du rapport  $X$  est représentée à la Figure (I.58). Cette figure montre les points de mesures expérimentales pour différentes ouvertures.



**Figure I.58:** Profil de surface du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée,  $h_1$ : ( $\diamond$ ) 2 ; ( $\square$ ) 2,5 ; ( $\Delta$ ) 3 ; ( $\circ$ ) 3,5 ; ( $*$ ) 4.

La figure I.58 montre un nuage de points issu de l'expérimentation. Le rapport  $y$  se stabilise à la valeur 1.

Le tableau I.33 regroupe les mesures expérimentales de  $X = x/L_r$ , et de  $y = (h(x) - h_1)/(h_2 - h_1)$ .

**Tableau I.33:** Mesures expérimentales du profil de surface ( $y = f(X)$ ) du ressaut contrôlé par marche positive dans un canal rectangulaire de section composée.

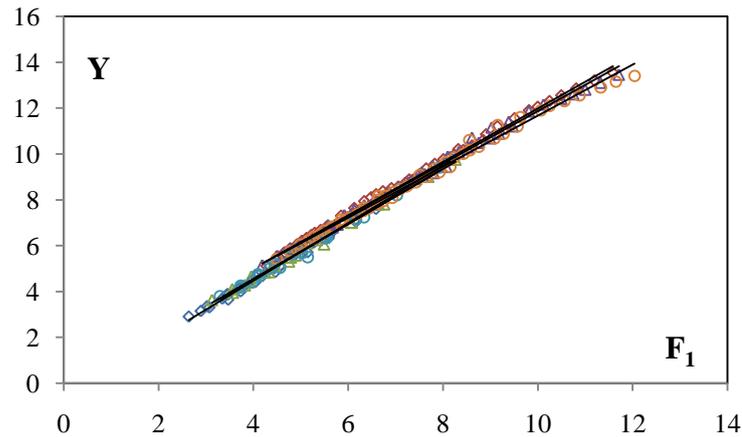
$X_i/L_j$	$(h_i - h_1)/(h_2 - h_1)$	$X_i/L_j$	$(h_i - h_1)/(h_2 - h_1)$	$X_i/L_j$	$(h_i - h_1)/(h_2 - h_1)$
0,17647059	0,38888889	0,65662651	1,00478469	0,15555556	0,42635659
0,63235294	0,97777778	0,11666667	0,33031674	0,57777778	0,94573643
0,26506024	0,57009346	0,44444444	0,85067873	0,22018349	0,55782313
0,56626506	0,93457944	0,34920635	0,66375546	0,65137615	0,96598639
0,35714286	0,67361111	0,74074074	1,03930131	0,15833333	0,42941176
0,60714286	0,96527778	0,45	0,80578512	0,34166667	0,76470588
0,14615385	0,36904762	0,65	0,99173554	0,21818182	0,50490196
0,46923077	0,86309524	0,18918919	0,56862745	0,46060606	0,84803922
0,27777778	0,56097561	0,62162162	1,00980392	0,38728324	0,87264151
0,49382716	0,85853659	0,2745098	0,66906475	0,68208092	1
0,32222222	0,63302752	0,54901961	0,94964029	0,29050279	0,69124424
0,61111111	1,00917431	0,19166667	0,51234568	0,53631285	0,92165899
0,4	0,78318584	0,45833333	0,91358025	0,31052632	0,65789474
0,63157895	1,02212389	0,29285714	0,67934783	0,58421053	0,93421053
0,21428571	0,42741935	0,64285714	0,89130435	0,32	0,64853556
0,55238095	0,92741935	0,34117647	0,73809524	0,6	0,89121339
0,08571429	0,24752475	0,58235294	0,97619048	0,19318182	0,44615385
0,54285714	0,91089109	0,09444444	0,31818182	0,56818182	0,91538462
0,22	0,5112782	0,35	0,71818182	0,21481481	0,55367232
0,5	0,90225564	0,43157895	0,78947368	0,54814815	0,9039548
0,2406015	0,58659218	0,67894737	1,01315789	0,34939759	0,73267327
0,48120301	0,89385475	0,27227723	0,58333333	0,69277108	0,98019802
0,38554217	0,80382775	0,75742574	1		

## I.5. ETUDE COMPARATIVE

Cette présente étape de notre étude expérimentale, comporte une étude comparative entre les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive.

### I.5.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$

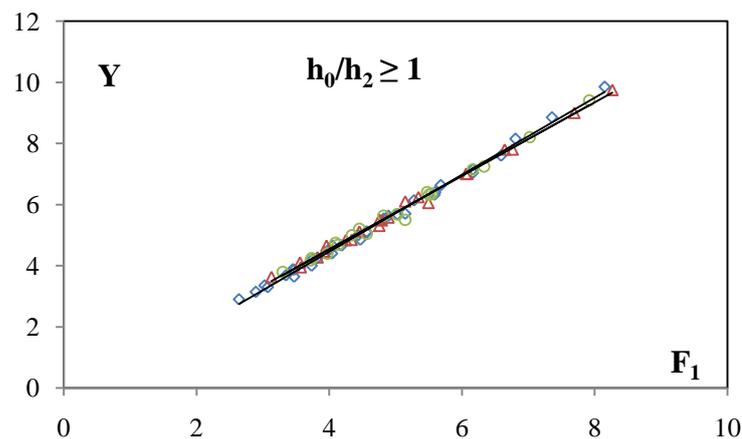
La figure (I.59) montre la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les trois configurations du ressaut citées précédemment.



**Figure I.59 :** variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les trois configurations.

Contrôlé par : ( $\diamond$ ) seuil mince, ( $\Delta$ ) seuil épais et ( $\circ$ ) marche positive.

- Pour  $h_0/h_2 \geq 1$  :

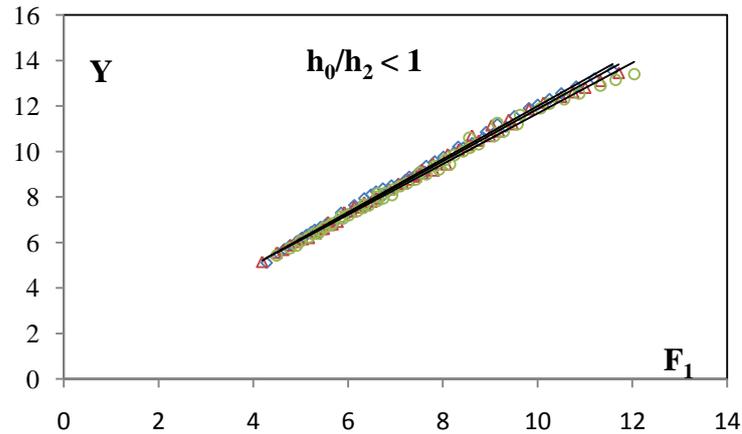


**Figure I.60 :** variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les trois configurations. Pour  $h_0/h_2 \geq 1$ .

( $\diamond$ ) seuil mince, ( $\Delta$ ) seuil épais, ( $\circ$ ) marche positive.

Cette figure montre que toutes les courbes sont presque quasi-confondues ce qui montre que le type d'obstacle n'a pas d'influence sur la variation de la hauteur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude.

- pour  $h_0/h_2 < 1$  :

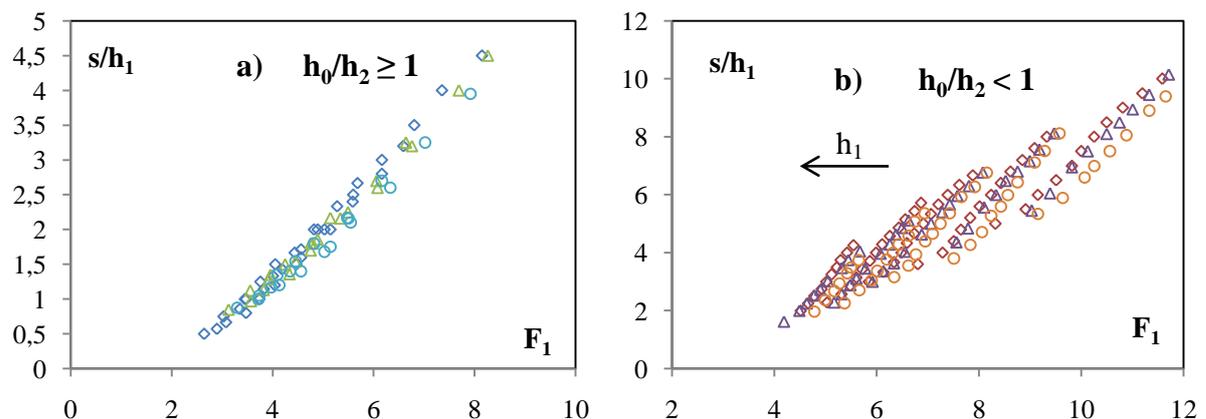


**Figure I.61:** variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les trois configurations. . Pour  $h_0/h_2 < 1$ .  
( $\diamond$ ) seuil mince, ( $\Delta$ ) seuil épais, ( $\circ$ ) marche positive.

Cette figure montre que les courbes des ressauts contrôlés par seuil mince et épais sont presque quasi-confondues pour pratiquement toute la gamme des nombres de Froude. Cependant un léger effet de la marche positive sur le rapport des hauteurs conjuguées apparaît à partir du nombre de Froude  $F_1$  supérieur à 6 environ. Cette influence s'accroît avec l'augmentation du nombre de Froude.

### I.5.2. hauteur relative du seuil et de la marche positive

La figure (I.62 a et b)) montre la variation de la hauteur relative  $S=s/h_1$  du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude pour les trois configurations du ressaut dans les deux sections du canal composé.



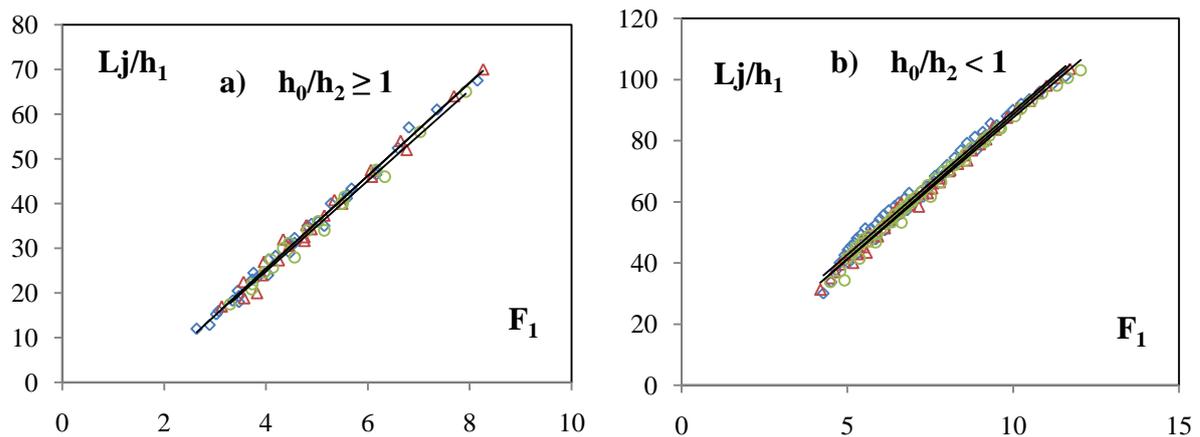
**Figure I.62 a et b:** variation de la hauteur relative  $S=s/h_1$  du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les trois configurations. ( $\diamond$ ) seuil mince, ( $\Delta$ ) seuil épais, ( $\circ$ ) marche positive.

Un décalage est visible entre les courbes des ressauts contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive. En effet, pour le même nombre de Froude  $F_1$ , la formation d'un ressaut

hydraulique contrôlé par seuil nécessite une hauteur relative du seuil plus élevée que son homologue utilisant un seuil épais ou une marche positive.

### I.5.3. Longueur relative du bassin

Les figure (I.63 a et b) montre la variation de la longueur relative  $\lambda_j=L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les trois configurations du ressaut dans les deux lits du canal composé.

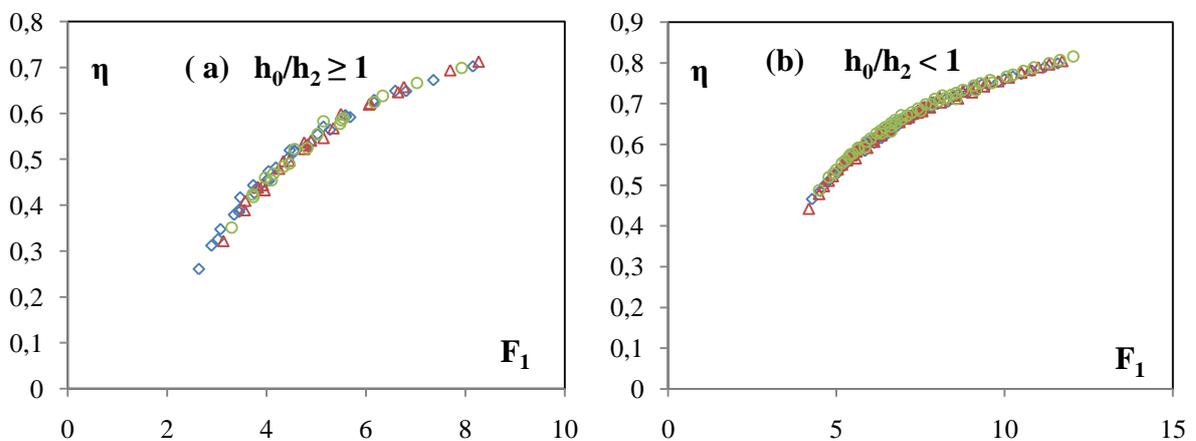


*Figure I.63 (a et b) : variation de la longueur relative  $L_j/h_1$  du ressaut en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les trois configurations. (◇) seuil mince, (Δ) seuil épais, (○) marche positive.*

Les résultats présentés sur les figures I.62 a et b, ont montré que les points de mesure du ressaut contrôlé par marche positive sont légèrement inférieure, par rapport à leurs homologues contrôlés par seuil mince et par seuil épais.

### I.5.3. Rendement du ressaut hydraulique

La figure (I.64 a et b) montre la variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  dans les deux parties du canal pour les trois configurations du ressaut testé.



*Figure I.64 (a et b) : variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les trois configurations. Contrôlés par (◇) seuil mince, (Δ) seuil épais, et (○) marche positive.*

Cette figure montre que tous les points de mesure forment un seul nuage de points dans le lit mineur du canal rectangulaire composé. Cependant dans le lit majeur les points de mesure du ressaut contrôlé par marche positive se présentent légèrement au dessus de ceux contrôlés par seuil mince et par seuil épais.

Ce qui montre ainsi que quelque soit la forme du seuil, l'effet de dissipation de la charge hydraulique est le même pour les trois configurations de ressaut dans les deux lits du canal. Alors, on peut dire que le rendement du ressaut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire de section composée est indépendant de S.

### I.6. Exemple d'application

Un exemple d'application des relations obtenues, afin de déterminer les caractéristiques d'un ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive, dans un canal rectangulaire composé.

Soient :

- $Q = 16 \text{ m}^3/\text{s}$ , le débit volume passant par le bassin d'amortissement de section droite rectangulaire composée.
- $h_1 = 0,4 \text{ m}$ , la hauteur initiale du ressaut.
- la largeur du lit mineur de canal  $b = 3 \text{ m}$ .
- la largeur du lit majeur de canal  $B = 6 \text{ m}$ .
- Le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident est :

$$F_1 = \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2h_1^3}} = \sqrt{\frac{16^2}{9,81 \cdot 3^2 \cdot 0,4^3}} = 6,73$$

#### I.6.1. Ressaut contrôlé par seuil mince

**Pour  $h_0/h_2 \geq 1$**

- Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = 1,258F_1 - 0,573 = 7,89$$

d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut  $h_2 \cong 3,16 \text{ m}$ .

- Longueur relative du ressaut est :

$$L_j/h_1$$

$$\frac{L_j}{h_1} = 10,41 \cdot F_1 - 16,23 = 53,829$$

d'où :  $L_j = 21,53 \text{ m}$

**Pour  $h_0/h_2 < 1$**

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = 1,165 \cdot F_1 + 0,328 = 8,168$$

d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut  $h_2 \cong 3,27 \text{ m}$ .

$$\frac{L_j}{h_1} = 9,378 \cdot F_1 - 4,211 = 58,9$$

d'où :  $L_j \cong 23,56 \text{ m}$

- Hauteur relative du seuil

$$\frac{s}{h_1} = 0,743.F_1 - 1,645 = 3,35$$

$$\text{d'où : } s = 1,34 \text{ m}$$

$$\frac{s}{h_1} = \left(12,85 \cdot \frac{h_1}{B} + 1,254\right) \cdot F_1 + 51,28 \cdot \frac{h_1}{B} - 10,87$$

$$= 6,75$$

$$\text{d'où : } s = 2,7 \text{ m}$$

### I.6.2. Ressaut contrôlé par seuil épais

#### Pour $h_0/h_2 \geq 1$

- Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = 1,200 F_1 - 0,255 = 7,82$$

$$\text{d'où } h_2 = 3,12 \text{ m.}$$

- Longueur relative du ressaut :

$$\frac{L_j}{h_1} = 10,39.F_1 - 16,17 = 53,75$$

$$\text{d'où } L_j = 21,5 \text{ m.}$$

- Hauteur relative du seuil

$$\frac{s}{h_1} = 0,713.F_1 - 1,57 = 3,048$$

$$\text{d'où : } s = 1,21 \text{ m}$$

#### Pour $h_0/h_2 < 1$

$$Y = 1,143.F_1 + 0,429 = 8,12$$

$$\text{d'où } h_2 = 3,24 \text{ m.}$$

$$\frac{L_j}{h_1} = 9,482.F_1 - 6,313 = 57,5$$

$$\text{d'où } L_j = 23 \text{ m.}$$

$$\frac{s}{h_1} = 1,819.F_1 + 141,6 \cdot \frac{h_1}{B} - 12,29 = 6,39$$

$$\text{d'où : } s = 2,55 \text{ m}$$

### I.6.3. Ressaut contrôlé par marche positive

#### Pour $h_0/h_2 \geq 1$

- Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = 1,206 F_1 - 0,305 = 7,81$$

$$\text{d'où } h_2 = 3,12 \text{ m.}$$

- Longueur relative du ressaut :

$$\frac{L_j}{h_1} = 10,13.F_1 - 15,66 = 52,51$$

$$\text{d'où } L_j = 21 \text{ m.}$$

- Hauteur relative du seuil

$$\frac{s}{h_1} = 0,667.F_1 - 1,496 = 2,99$$

$$\text{d'où : } s = 1,2 \text{ m}$$

#### Pour $h_0/h_2 < 1$

$$Y = 1,113.F_1 + 0,540 = 8,03$$

$$\text{d'où } h_2 = 3,21 \text{ m.}$$

$$\frac{L_j}{h_1} = 9,267.F_1 - 5,144 = 57,22$$

$$\text{d'où } L_j = 22,88 \text{ m.}$$

$$\frac{s}{h_1} = \left(11,23 \frac{h_1}{B} + 1,409\right) \cdot F_1 + 81,78 \cdot \frac{h_1}{B} - 13,7 = 6,27$$

$$\text{d'où : } s = 2,5 \text{ m}$$

## I.7. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive.

Nous avons décrit dans un premier temps, le modèle physique qui nous a servi de banc d'essai, ainsi que les instruments et l'appareillage utilisé pour la mesure des caractéristiques du ressaut hydraulique, moyennant quelques schémas et des photographies. Nous avons expliqué ainsi la procédure expérimentale suivie pendant les essais.

Passons en deuxième temps aux résultats expérimentaux, 5 hauteurs initiales  $h_1$  ont été testées. Une large série des hauteurs de seuil et de la marche positive ont été testées. Une large gamme des nombres de Froude incidents a été ainsi obtenue.

Par la suite, on a effectué une étude comparative entre les caractéristiques du ressaut contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive.

L'étude expérimentale s'est intéressée, dans un premier temps, à la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. L'expérimentation montre un décalage entre les valeurs de  $Y$  pour les mêmes nombres de Froude  $F_1$ . Pour les deux lits du canal, le rapport  $Y$  dans le lit mineur est nettement inférieur à celui dans le lit majeur du canal. L'analyse statistique des résultats expérimentaux, a montré que la loi de type linéaire présente la meilleure loi qui suit la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. Pour les trois types de ressaut testés, toutes les courbes sont presque quasi-confondues ce qui montre que le type d'obstacle n'a pas d'influence sur la variation de la hauteur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude. L'expérimentation a montré ainsi l'influence de la hauteur amont  $h_1$  dans le lit majeur sur la variation du rapport  $Y$  en fonction de la hauteur relative du seuil.

Dans un deuxième temps, nous avons étudié la variation de la longueur relative du ressaut  $L_j/h_1$ . Ainsi la variation de longueur relative  $L_r/h_1$  du rouleau de surface en fonction du nombre de Froude  $F_1$ . L'étude a montré que les points de mesure dans le lit mineur sont en dessous de celui dans le lit majeur, et que l'ajustement est de type linéaire pour les trois types de ressaut expérimentés. Ainsi la longueur relative du bassin est presque la même pour les trois configurations de ressaut.

L'expérimentation a étudié dans un troisième temps, la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les trois types de ressaut analysés, cette

étude montre l'apparition de l'influence de la hauteur amont  $h_1$  dans le lit majeur. L'ajustement des mesures expérimentales a montré que la variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire.

Enfin, nous avons étudié, la variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, et ceci pour trois types de ressaut hydraulique. L'étude a montré que tous les points de mesure forment un seul nuage de points dans le lit mineur du canal rectangulaire composé. Cependant dans le lit majeur les points de mesure du ressaut contrôlé par marche positive se présentent légèrement au dessus de ceux contrôlés par seuil mince et par seuil épais. L'effet de dissipation de l'énergie, pour les trois configurations de ressaut, est alors le même.

## *Chapitre II*

Ressaut hydraulique forcé de  
type A dans un canal  
rectangulaire de section  
composée

## **CHAPITRE II**

### ***Ressaut hydraulique forcé de type A dans un canal rectangulaire de section composée***

#### **II.1. Introduction**

Ce chapitre de notre étude vise essentiellement dans un premier temps l'étude expérimentale du ressaut hydraulique forcé type A par seuil mince, par seuil épais et par marche positive en canal rectangulaire de section composée.

La bibliographie montre que, pour un nombre de Froude  $F_1$  et une hauteur  $s$  de seuil donné, la variation du niveau d'eau de la hauteur d'eau aval est conditionnée par le déplacement vertical d'un deuxième seuil à paroi mince situé à l'extrémité aval du canal. Selon la position verticale de ce dernier, trois cas de figure de la surface libre à l'aval apparaissent et correspondent au ressaut forcé type A, type B ou type B-min (*Bretz 1988*). En effet, le ressaut hydraulique est dit contrôlé lorsque le rouleau de surface se présente à l'amont de l'obstacle. Il est dit forcé de type A, lorsque l'extrémité aval du rouleau de surface coïncide verticalement avec l'extrémité amont de l'obstacle.

Ce chapitre abordera, dans un deuxième temps, une étude comparative entre le ressaut contrôlé et forcé par les trois types d'obstacles.

#### **II.2. RESSAUT HYDRAULIQUE FORCÉ PAR SEUIL MINCE EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE**

##### **II.2.1 DESCRIPTION DU MODELE**

###### **II.2.1.1. Description du canal**

C'est le même dispositif expérimental, sauf pour créer le ressaut forcé de type A. Nous mettons un deuxième seuil mince à l'extrémité aval du canal. Figure II.1.

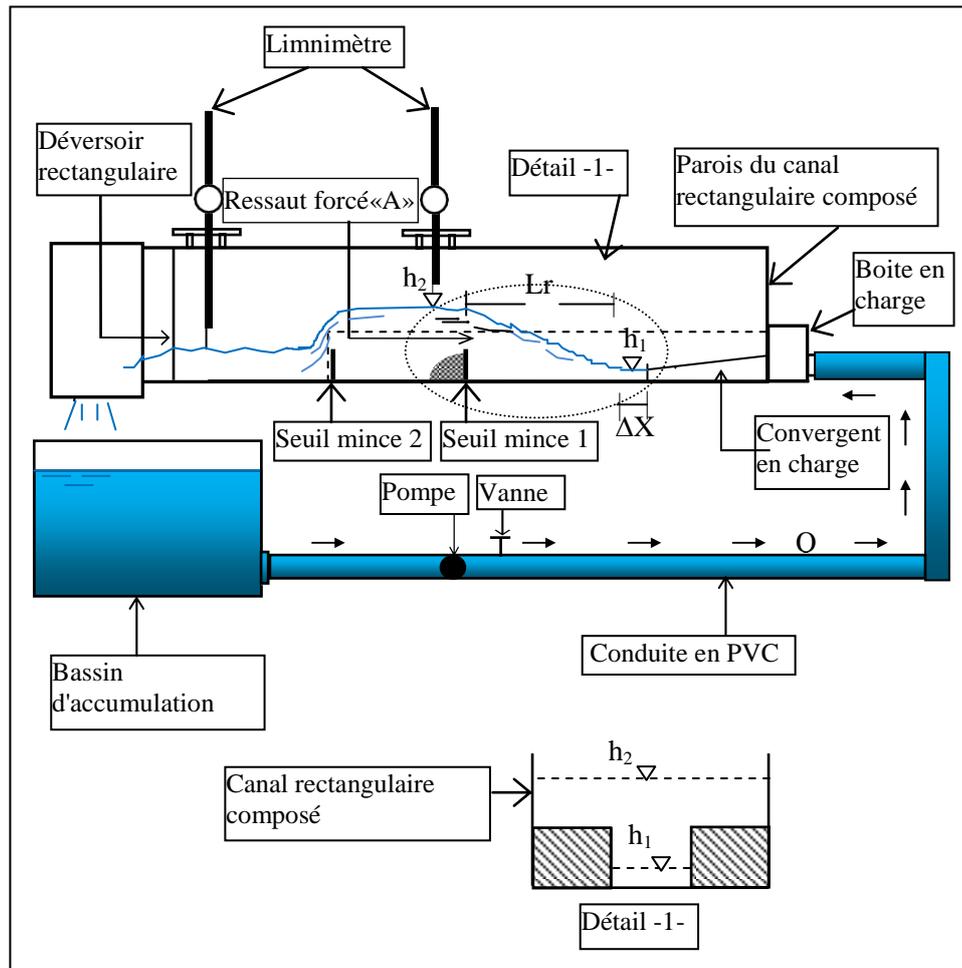


Figure II.1 : Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composée, ayant servi à l'expérimentation.

### II.2.1.2. Position du problème

Pour créer un ressaut hydraulique forcé de type A, deux seuils sont nécessaires. Le premier est installé à une distance  $L_s$  du pied du ressaut, cela permet la formation de celui-ci. Le deuxième seuil est installé à l'extrémité aval du canal, l'accroissement de la hauteur de ce dernier conditionne la variation de la hauteur d'eau aval.

La bibliographie montre que l'augmentation du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident et de la hauteur  $s$  du premier seuil implique une longueur relative  $L_r/L_s$  de plus en plus grande. Si ce dernier rapport est égal à l'unité, le ressaut forcé est de type A (figure II.2.a), et s'il est supérieur à l'unité, le ressaut est soit du type B (figure II.2.b) soit du type B-min (figure II.2.c). Ces types de ressaut ont été définis ainsi en vertu de la classification de Hager et Bretz (1987).

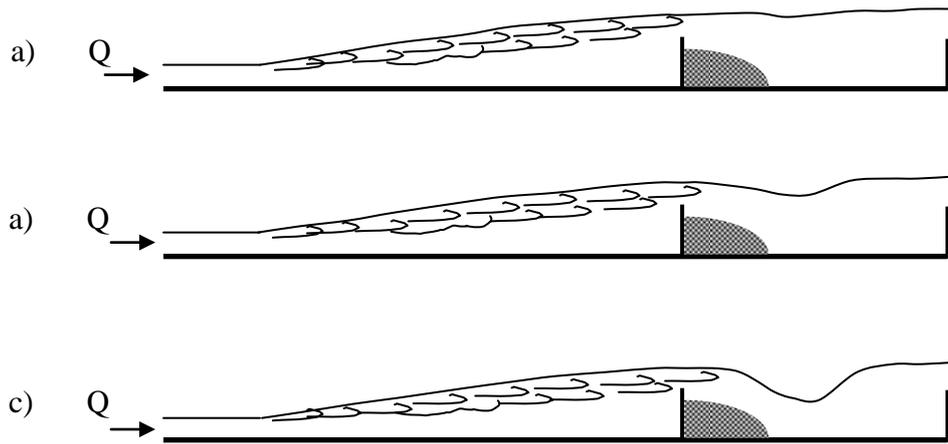


Figure II.2 : Ressaut hydraulique forcé par seuil : a) ressaut type A. b) Ressaut type B. c) Ressaut type  $B_{min}$

L'expérimentation s'est intéressé à développer des relations liant les caractéristiques du ressaut telles que la hauteur relative du ressaut  $Y = h_2/h_1$ , la position relative du seuil  $\lambda_s = L_s/h_1$  et la hauteur relative de celui-ci  $S = s/h_1$  au nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident qui nous permettra de calculer la position et la hauteur nécessaire du seuil pour forcer le ressaut dans les deux lits du canal rectangulaire composé.

## II.2.2. Résultats expérimentaux

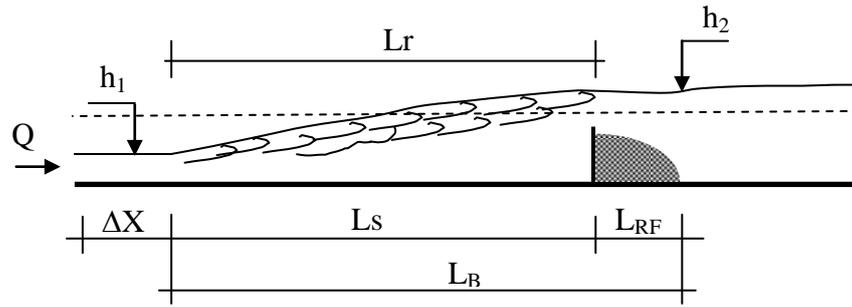
### II.2.2.1. Procédure expérimentale

Les caractéristiques étudiées dans un ressaut hydraulique forcé par seuil à paroi mince sont : le débit volume ( $Q$ ), la hauteur initiale  $h_1$ , mesurée au pied de ressaut, la hauteur finale  $h_2$ , mesurée au droit de la longueur du rouleau de fond, la hauteur ( $s$ ) du seuil, la longueur ( $L_r$ ) du rouleau de surface, et la longueur ( $L_B$ ) du ressaut, mesurée dans le même endroit de la hauteur finale ( $h_2$ ).

L'étude expérimentale a été menée sous cinq hauteurs initiales :  $h_1$  (mm) = 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; 40mm. Une gamme assez pratique de nombres de Froude incident a été ainsi obtenue :  $3,64 < F_1 < 12,03$ .

L'accroissement du nombre de Froude  $F_1$  entraîne à la fois le déplacement du ressaut vers l'aval ainsi que l'augmentation de la longueur  $L_r$  du rouleau, pour ramener le pied du ressaut à sa position d'origine (à la sortie de l'écoulement), il est nécessaire d'augmenter la hauteur du premier seuil  $s$  tout en le déplaçant vers l'aval ainsi du deuxième seuil qui se trouve à l'extrémité aval du canal.

Les photos II.1 et II.2 illustrent deux configurations typiques de ressaut forcé par seuil mince en canal rectangulaire composé, pour la même hauteur initiale  $h_1 = 25$  mm et à débit volume croissant.



**Figure II.3 :** Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique forcé par seuil mince évoluant dans un canal rectangulaire composé.



**Photos II.1 :** Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par seuil mince type A  
 $F_1 = 6, 16$ ;  $s = 4$  cm;  $L_B = 107$  cm;  $h_2 = 16,3$  cm ;  $h_1 = 2,5$  cm



**Photo II.2 :** Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par seuil mince type A  
 $F_1 = 8, 38$ ;  $s = 11$  cm;  $L_B = 171$  cm;  $h_2 = 23,5$  cm ;  $h_1 = 2,5$  cm

Pour obtenir les résultats expérimentaux, nous avons suivis les étapes suivantes :

- Mesure de la hauteur géométrique  $s$  du seuil ;
- Mesure de la longueur  $L_r$  du rouleau de surface ;
- Mesure de la longueur  $L_{RF}$  du rouleau de fond ;
- Mesure de la hauteur conjuguée aval  $h_2$  du ressaut ;

Mesure de la lame d'eau au-niveau du déversoir rectangulaire à paroi latéral;

Calcul du débit volume correspondant, par application de la relation (I.1) ;

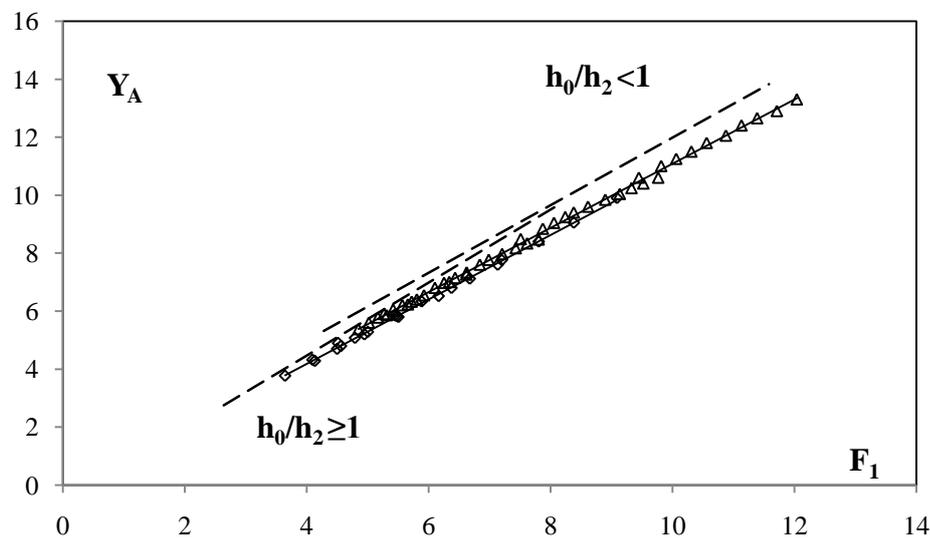
Calcul du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, par application de la relation :

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

## II.2.3 Analyse des résultats expérimentaux

### II.2.3.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$

La figure II.4 représente la variation du rapport  $Y_A$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident.



**Figure. II.4.** Variation du rapport des hauteurs conjuguées  $Y_A$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal composée. ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements

Les mesures expérimentales que nous avons réalisées en laboratoire montrent clairement un décalage entre les valeurs de  $Y_A$  du ressaut forcé et celles de  $Y$  du ressaut contrôlé par seuil mince pour les mêmes nombres de Froude  $F$  dans les deux lits du canal composé.

La figure II.4 montre deux allures l'une au lit mineur et l'autre au lit majeur et que le rapport  $Y_A$  augmente progressivement avec l'augmentation du nombre de Froude. Ainsi, pour une valeur du nombre de Froude  $F_1$ , le rapport  $Y_A$  au lit majeur est au-dessus de celui au lit mineur. L'ajustement des points de mesure expérimentale est de type linéaire. Telle que :

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad Y_A = 1,11F_1 - 0,26 ; \quad R^2 = 0,999 \quad (\text{II.1})$$

$$3,64 < F_1 < 9,05$$

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad Y_A = 1,107F_1 + 0,01 ; \quad R^2 = 0,998 \quad (\text{II.2})$$

$$4,84 < F_1 < 12,03$$

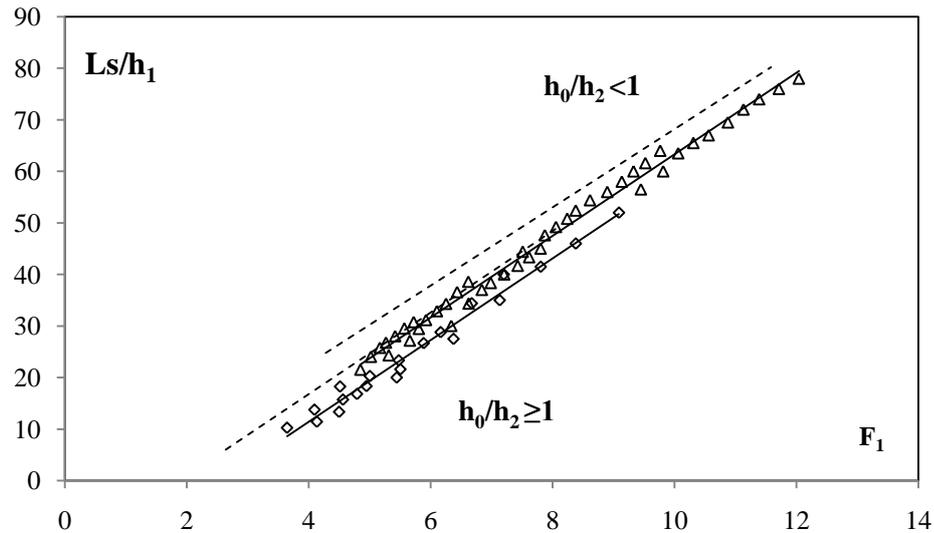
Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y_A = f(F_1)$  pour les deux cas, sont regroupées dans le tableau II.1:

**Tableau II.1.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y_A = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Y_A$	$F_1$	$Y_A$	$F_1$	$Y_A$	$F_1$
3,775	3,6453286	5,375	4,8499922	8,3333333	7,6168893
4,325	4,0950702	5,6	5,0207284	8,4666667	7,8055765
4,2857143	4,1344247	5,775	5,1686327	8,84	7,8738798
4,9	4,514485	5,9	5,2680278	9,04	8,0569888
4,7	4,4987093	5,8571429	5,3143896	9,24	8,2414955
4,8	4,5619224	6,05	5,4182987	9,4	8,3807866
5,08	4,7919089	6,2	5,569972	9,6	8,6146607
5,2	4,9473147	6,2285714	5,6609141	9,84	8,8981273
5,2857143	5,0032162	6,325	5,7230346	10,04	9,1366752
5,8333333	5,4771168	6,4	5,8074389	10,24	9,3290223
5,85	5,4434806	6,5428571	5,9255541	10,6	9,4499158
5,8	5,5040756	6,8	6,1042066	10,4	9,5227006
6,3333333	5,8860943	6,9714286	6,254429	10,6	9,7666566
6,52	6,1641494	7	6,3400938	11	9,8156941
6,8	6,3754804	7,1428571	6,4362955	11,25	10,062106
7,12	6,675305	7,2571429	6,6198914	11,5	10,310546
7,6	7,1335671	7,3333333	6,6250158	11,8	10,560998
7,76	7,1998571	7,6	6,8414305	12,05	10,876868
8,4	7,8055765	7,7666667	6,9869898	12,4	11,131788
9,05	8,3807866	7,9666667	7,2072352	12,65	11,388669
9,9	9,0887975	8,1666667	7,4297474	12,9	11,712505
		8,48	7,5118986	13,3	12,039354

### II.2.3.2. position relative du seuil

La figure II.5 représente la variation de la position relative du seuil  $\lambda_s$  en fonction de nombre de Froude  $F_1$ . Il ressort que l'effet réducteur est perceptible dans le lit mineur que dans le lit majeur. Ainsi le ressaut forcé par seuil mince évoluent dans un bassin rectangulaire composé est plus court que celui contrôlé par seuil mince.



**Figure II.5.** Variation de la position  $Ls/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal composé. ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements

En outre, l'ajustement des valeurs expérimentales a montré que la relation  $Ls/h_1 = f(F_1)$  est de la même forme pour les deux lits du canal. Celle-ci s'écrit comme suit :

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad Ls/h_1 = 7,929 F_1 - 20,34 \quad R^2 = 0,981 \quad (\text{II.3})$$

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad Ls/h_1 = 7,922 F_1 - 15,90 \quad R^2 = 0,991 \quad (\text{II.4})$$

Les points de mesure expérimentale qui ont servi au traçage de la figure II.5 sont consignés dans le tableau II.2.

**Tableau II.2.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des graphiques de  $Ls/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

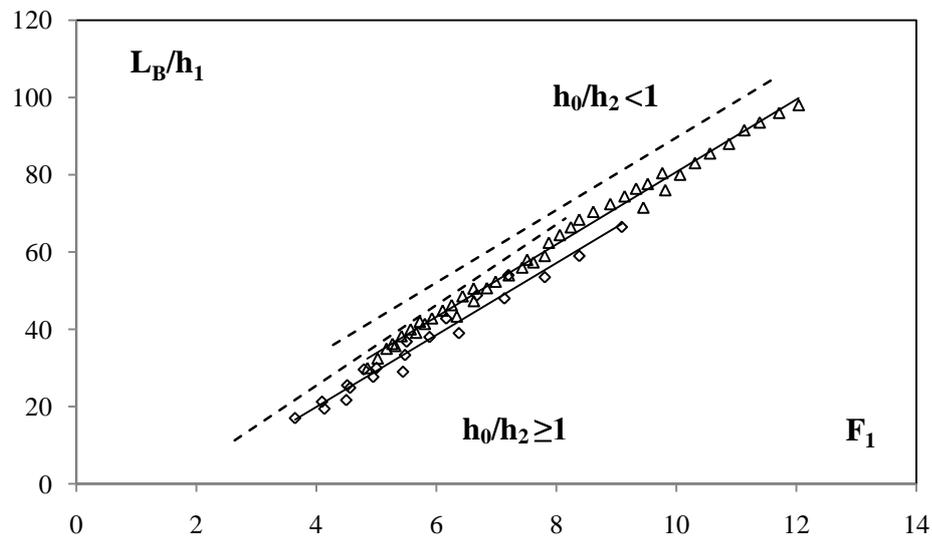
$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$Ls/h_1$	$F_1$	$Ls/h_1$	$F_1$	$Ls/h_1$
3,6453286	10,25	4,8499922	21,5	7,6168893	43,333333
4,0950702	13,75	5,0207284	24	7,8055765	45
4,1344247	11,428571	5,1686327	25,75	7,8738798	47,6
4,514485	18,25	5,2680278	26,75	8,0569888	49,2
4,4987093	13,333333	5,3143896	24,285714	8,2414955	50,8
4,5619224	15,714286	5,4182987	28	8,3807866	52,4
4,7919089	16,8	5,569972	29,5	8,6146607	54,4
4,9473147	18,333333	5,6609141	27,142857	8,8981273	56
5,0032162	20,285714	5,7230346	30,75	9,1366752	58
5,4771168	23,333333	5,8074389	29,428571	9,3290223	60
5,4434806	20	5,9255541	31,142857	9,4499158	56,5
5,5040756	21,6	6,1042066	32,857143	9,5227006	61,6
5,8860943	26,666667	6,254429	34,285714	9,7666566	64
6,1641494	28,8	6,3400938	30	9,8156941	60
6,3754804	27,5	6,4362955	36,571429	10,062106	63,5

**Tableau II.2.** (suite et fin) Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des graphiques de  $L_B/h_1 = f(F_1)$ , pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

6,675305	34,4	6,6198914	38,571429	10,310546	65,5
7,1335671	35	6,6250158	34,333333	10,560998	67
7,1998571	40	6,8414305	37	10,876868	69,5
7,8055765	41,5	6,9869898	38,333333	11,131788	72
8,3807866	46	7,2072352	40	11,388669	74
9,0887975	52	7,4297474	41,666667	11,712505	76
		7,5118986	44,4	12,039354	78

### II.2.3.3. Longueur relative $\lambda_B = L_B/h_1$ du bassin

A partir des résultats présentés sur la figure II.6, nous pouvons observer qu'il ya un décalage entre les valeurs de  $\lambda_B$  du ressaut forcé et celles du ressaut contrôlé par seuil mince pour les mêmes nombre de Froude  $F_1$  dans les deux lits du canal composé. De plus, la longueur relative du bassin est plus compacte dans le lit mineur que son homologue dans le lit majeur.



**Figure II.6.** Variation du rapport  $L_B/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal composé. ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements

L'analyse des résultats expérimentaux a également montré, que la fonction  $L_B/h_1 = f(F_1)$  est de type linéaire.

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 \geq 1 \quad \lambda_B = L_B/h_1 = 9,306 F_1 - 17,30 \quad R^2 = 0,973 \quad (\text{II.5})$$

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 < 1 \quad \lambda_B = L_B/h_1 = 9,371 F_1 - 13,01 \quad R^2 = 0,993 \quad (\text{II.6})$$

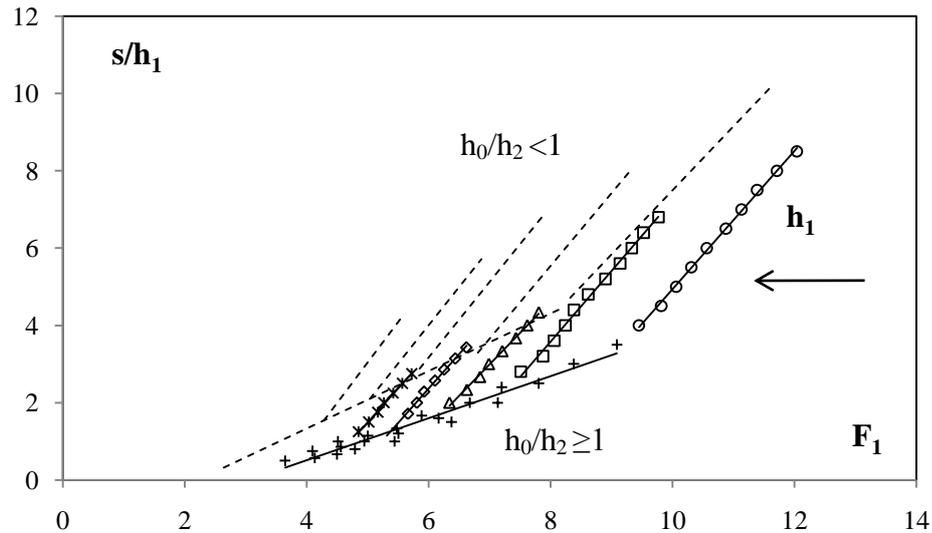
Les résultats des essais qui nous ont permis de tracer la figure II.6 sont récapitulés dans le tableau II.3.

**Tableau II.3.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des graphiques de  $\lambda_B = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$\lambda_B$	$F_1$	$\lambda_B$	$F_1$	$\lambda_B$
3,6453286	17	4,8499922	30	7,6168893	57,333333
4,0950702	21,25	5,0207284	32,5	7,8055765	59
4,1344247	19,428571	5,1686327	35	7,8738798	62,4
4,514485	25,5	5,2680278	36,25	8,0569888	64,4
4,4987093	21,666667	5,3143896	35,714286	8,2414955	66,4
4,5619224	24,857143	5,4182987	38,25	8,3807866	68,4
4,7919089	29,6	5,569972	40	8,6146607	70,4
4,9473147	27,666667	5,6609141	39,142857	8,8981273	72,4
5,0032162	30	5,7230346	42	9,1366752	74,4
5,4771168	33,333333	5,8074389	41,428571	9,3290223	76,4
5,4434806	29	5,9255541	42,857143	9,4499158	71,5
5,5040756	36,8	6,1042066	44,857143	9,5227006	77,6
5,8860943	38	6,254429	46,285714	9,7666566	80,4
6,1641494	42,8	6,3400938	43,333333	9,8156941	76
6,3754804	39	6,4362955	48,571429	10,062106	80
6,675305	48,8	6,6198914	50,571429	10,310546	83
7,1335671	48	6,6250158	47,333333	10,560998	85,5
7,1998571	54	6,8414305	50,666667	10,876868	88
7,8055765	53,5	6,9869898	52,333333	11,131788	91,5
8,3807866	59	7,2072352	54	11,388669	93,5
9,0887975	66,5	7,4297474	56	11,712505	96
		7,5118986	58	12,039354	98

#### II.2.3.4. Hauteur relatif du seuil

La représentation graphique des points expérimentaux dans la figure II.7, montre la variation du rapport du seuil relatif  $S=s/h_1$  du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les cinq ouvertures dans la section composée du lit mineur et celui majeur.



**Figure. II.7.** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal composé. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour  $h_0/h_2 < 1$ . (○)  $h_1=2\text{cm}$ ; (□)  $h_1=2,5\text{cm}$ ; (Δ)  $h_1=3\text{cm}$ ; (◇)  $h_1=3,5\text{cm}$ ; (\*)  $h_1=4\text{cm}$ . (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements du ressaut forcé par seuil mince.

En premier lieu on constate que l'augmentation du seuil relatif  $S$  entraîne celle du nombre de Froude  $F_1$  et que l'influence de la hauteur amont  $h_1$  est perceptible dans la section composée.

La figure ci-dessus montre que les valeurs de rapport  $S$  du ressaut forcé sont au dessous de son homologue du ressaut contrôlé par seuil mince.

En second lieu la figure II.7 montre que l'ajustement des points de mesure expérimentale dans le lit mineur est de type linéaire. Ainsi la figure indique cinq allures, correspondant chacune à une valeur bien déterminée de  $y_1$  pour le lit majeur. Les traits continus représentent l'ajustement des points de mesures par la méthode des moindres carrés du ressaut contrôlé dans le canal rectangulaire de forme composée.

- Pour  $h_0/h_2 \geq 1$        $s/h_1 = 0,543 F_1 - 1,662$        $R^2 = 0,962$       (II.7)
- Pour  $h_0/h_2 < 1$

Les figures dont les ajustements sont montrées dans la page suivante, pour les différentes ouvertures  $h_1$  en lit majeur.

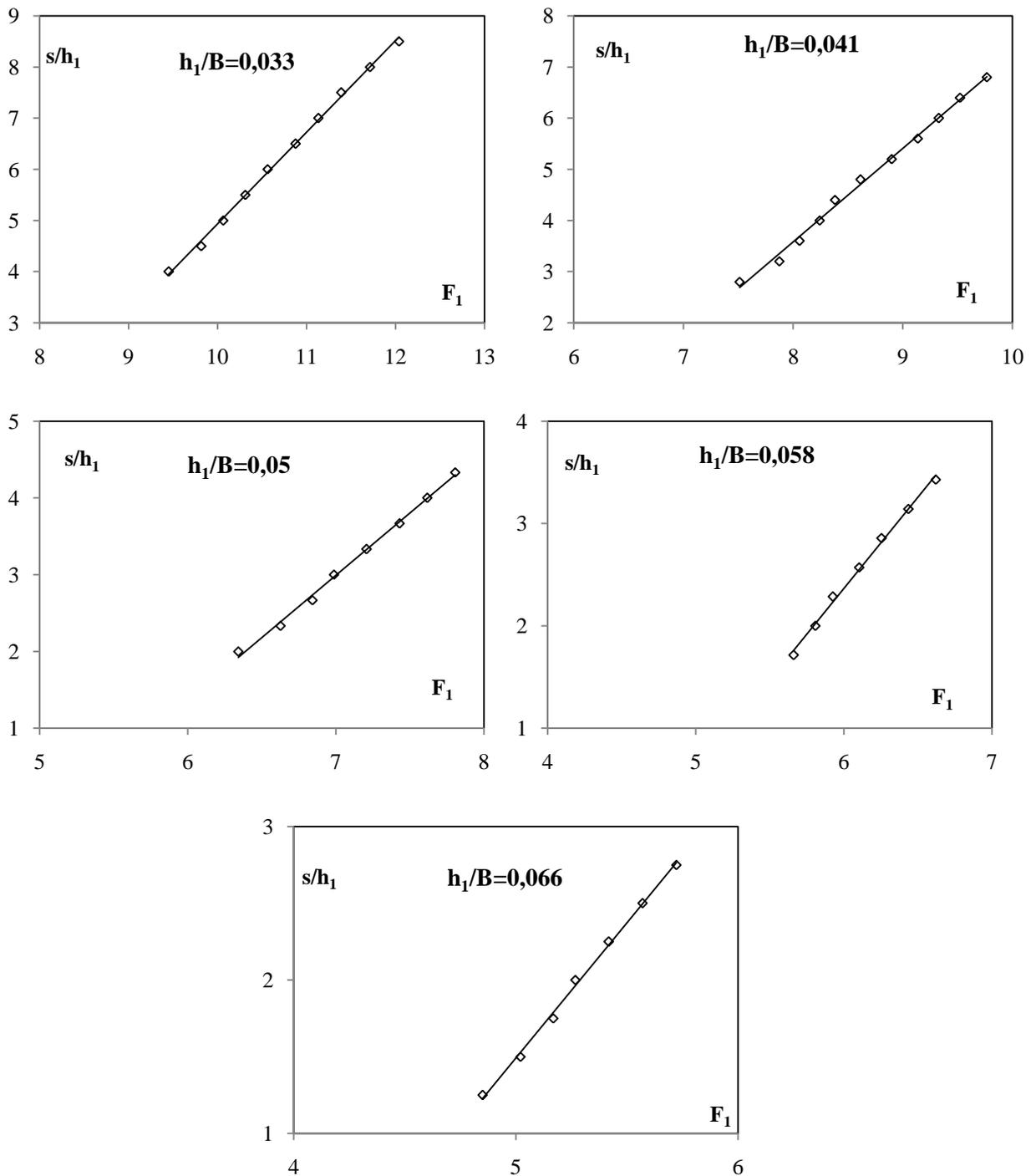


Figure II.8. (a, b, c, d, e). Variation du rapport  $S = s/h_1$  de la hauteur relative du seuil du ressaut forcé en fonction de nombre de Froude respectivement pour  $h_1/B = (0,03 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066)$ . (o) points expérimentaux. (—) courbe d'ajustement.

Les figures II.8 (a, b, c, d, e), montrent que l'ajustement des mesures expérimentales de la hauteur relative du seuil  $s/h_1$  en fonction de nombre de Froude  $F_1$  suit une loi de type linéaire de la forme  $s/h_1 = a (F_1) + b$ .

Les données ayant servi au traçage des figures II.7 et II.8 (a, b, c, d, e) sont groupées au tableau II.4.

**Tableau II.4.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $s/h_1 = f(F_1)$   
pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$
3,6453286	0,5	4,8499922	1,25	7,8055765	4,3333333
4,0950702	0,75	5,0207284	1,5	7,8738798	3,2
4,1344247	0,5714286	5,1686327	1,75	8,0569888	3,6
4,514485	1	5,2680278	2	8,2414955	4
4,4987093	0,6666667	5,4182987	2,25	8,3807866	4,4
4,5619224	0,8571429	5,569972	2,5	8,6146607	4,8
4,7919089	0,8	5,6609141	1,7142857	8,8981273	5,2
4,9473147	1	5,7230346	2,75	9,1366752	5,6
5,0032162	1,1428571	5,8074389	2	9,3290223	6
5,4771168	1,3333333	5,9255541	2,2857143	9,4499158	4
5,4434806	1	6,1042066	2,5714286	9,5227006	6,4
5,5040756	1,2	6,254429	2,8571429	9,7666566	6,8
5,8860943	1,6666667	6,3400938	2	9,8156941	4,5
6,1641494	1,6	6,4362955	3,1428571	10,062106	5
6,3754804	1,5	6,6198914	3,4285714	10,310546	5,5
6,675305	2	6,6250158	2,3333333	10,560998	6
7,1335671	2	6,8414305	2,6666667	10,876868	6,5
7,1998571	2,4	6,9869898	3	11,131788	7
7,8055765	2,5	7,2072352	3,3333333	11,388669	7,5
8,3807866	3	7,4297474	3,6666667	11,712505	8
9,0887975	3,5	7,5118986	2,8	12,039354	8,5
		7,6168893	4		

Le tableau II.5 regroupe les différents coefficients des droites d'ajustement de la relation expérimentale liant le rapport  $S = s/h_1$  des hauteurs relatives du seuil au nombre de Froude  $F_1$ , pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

**Tableau II.5.** Coefficients des relations expérimentales de type linéaire, issues de l'ajustement de la relation liant  $s/h_1$  au nombre de Froude  $F_1$  pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures

$h_1/B$	<b>a</b>	<b>b</b>	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	1,790	-12,97	$S = 1,790 F_1 - 12,97$	0,998
0,041	1,826	-11,02	$S = 1,826 F_1 - 11,02$	0,995
0,050	1,622	-8,36	$S = 1,622 F_1 - 8,36$	0,996
0,058	1,785	-8,345	$S = 1,785 F_1 - 8,345$	0,996
0,066	1,759	-7,305	$S = 1,759 F_1 - 7,305$	0,997

Le tableau (II.5) montre que les valeurs des paramètres 'a' sont presque égaux, et leur moyenne arithmétique est  $a = 1,7564$ , tandis que l'ajustement statistique des couples de valeurs (b,  $h_1/B$ ) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type logarithmique d'équation :

$$b = 8,239 \ln(h_1/B) + 15,39 \text{ avec } R^2 = 0,949$$

Celle-ci est illustrée à la figure II.9.

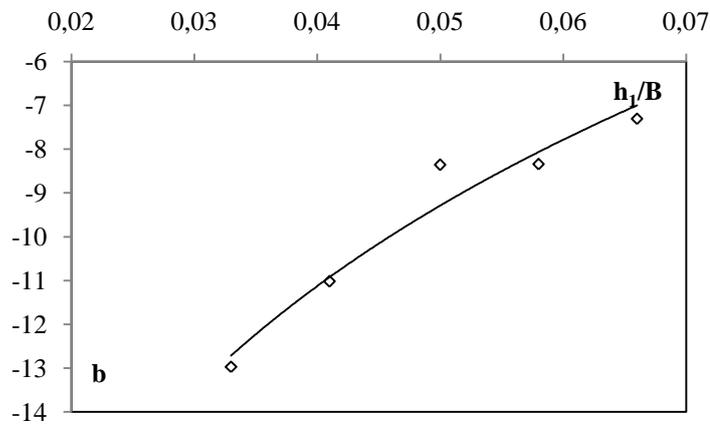


Figure II.9 : Variation du paramètre 'b' en fonction de  $h_1/B$ .

En effet, en remplaçant les coefficients a et b par leurs expressions dans la relation  $s/h_1 = aF_1 + b$ , l'équation liant le rapport des hauteurs relatif du seuil  $s/h_1$  au nombre de Froude  $F_1$  et à la hauteur relative amont  $y_1$  devient :

$$s/h_1 = 1,7564 F_1 + 8,239 \ln(h_1/B) + 15,39 \quad (\text{II.8})$$

$$0,033 < y_1 < 0,066.$$

La figure (II.10) indique que la relation  $S = f(F_1, y_1)$  ajuste avec une bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces derniers tournent en majorités autour de la première bissectrice, ce qui fiabilise la relation globale obtenue.

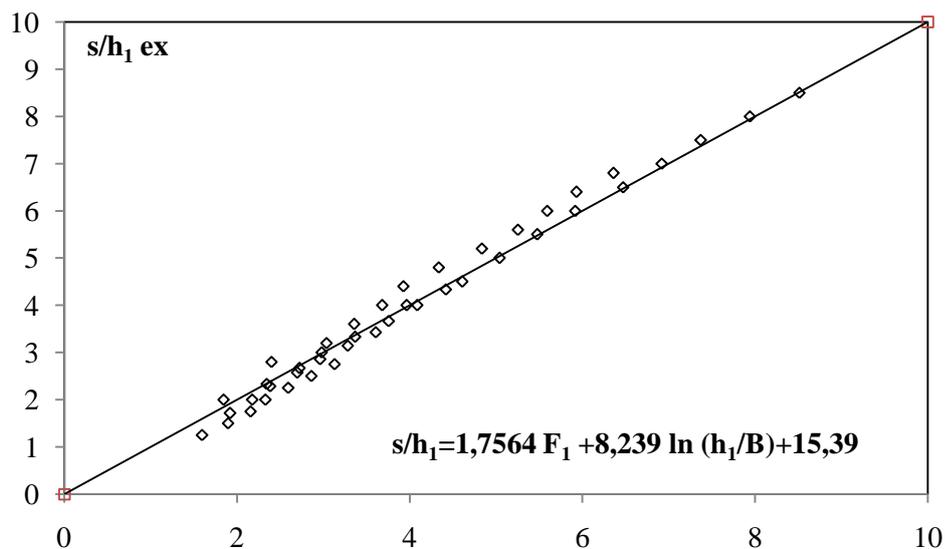
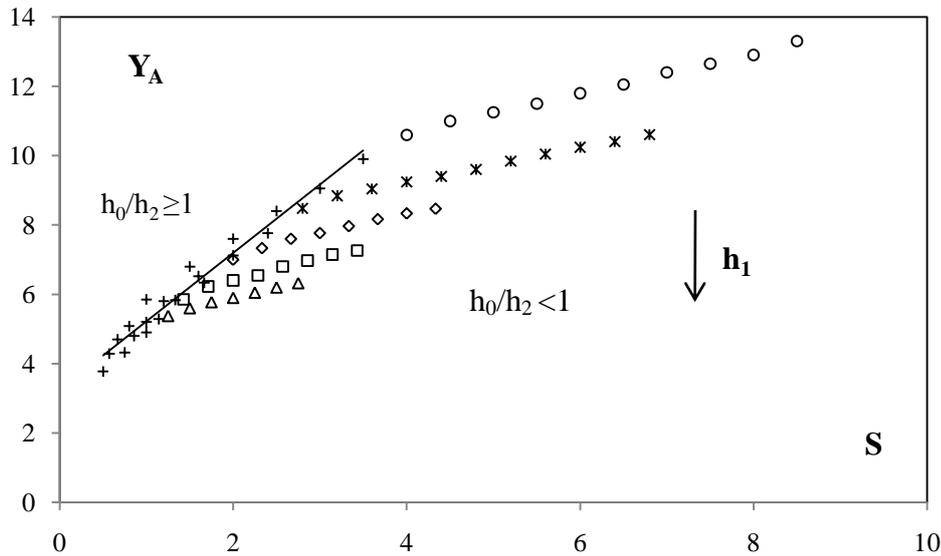


Figure II.10 : Variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction de la relation  $f(F_1, h_1/B)$ .  
(o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$ .

Parallèlement à ce que nous avons fait dans le ressaut contrôlé par seuil, on peut déduire une relation empirique liant la hauteur relative du seuil  $S$  et le rapport des hauteurs conjuguées  $Y_A$  du ressaut forcé par seuil dans chaque section du canal composé.

La figure ci-dessous résume la variation de  $Y_A$  en fonction de  $S$  dans les deux sections du canal rectangulaire de forme composée.



**Figure II.11 :** Variation du rapport  $Y_A$  des hauteurs conjuguées du ressaut forcé en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  du seuil. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour  $h_0/h_2 < 1$ . (○)  $h_1=2\text{cm}$ ; (\*)  $h_1=2,5\text{cm}$ ; (◇)  $h_1=3\text{cm}$ ; (□)  $h_1=3,5\text{cm}$ ; (△)  $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbe d'ajustement.

Au regard de cette figure on peut conclure que :

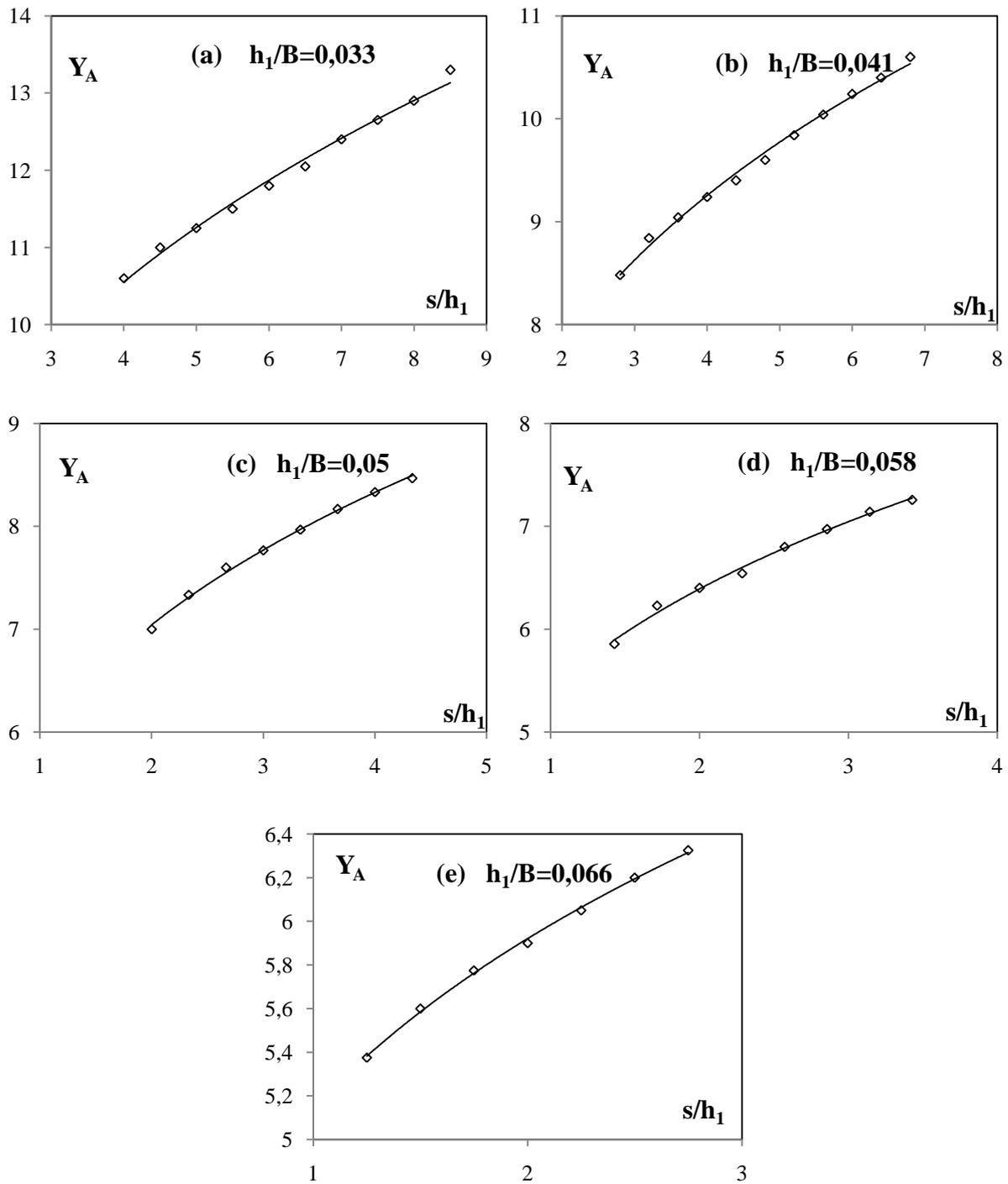
- Pour  $h_0/h_2 \geq 1$

Toutes les mesures se combinent pour former un nuage de points unique. L'ajustement des valeurs expérimentales donne une loi de type linéaire.

$$Y_A = 1,973s/h_1 + 3,245; \quad R^2 = 0,966 \quad (\text{II.9})$$

- Pour  $h_0/h_2 < 1$

La figure représente cinq nuages de points. Chaque nuage correspond à une ouverture  $h_1$  bien déterminée. Pour la même hauteur relative du seuil  $S$ ,  $Y_A$  augment inversement à la hauteur  $h_1$ .



**Figure. II.12.** (a, b, c, d, e). Variation du rapport  $Y_A$  de la hauteur conjuguée du ressaut forcé en fonction de la hauteur relative du seuil  $S$ , respectivement pour  $h_1/B = (0,03 ; 0,041 ; 0,05 ; 0,058 ; 0,066)$ .  
(o) points expérimentaux. (—) courbe d'équation.

Les figures II.12. (a, b, c, d, e), montrent en effet que les points expérimentaux obtenus suivent, dans les cinq ouvertures  $h_1$ , la variation d'une courbe unique de type puissance.

Les points de mesures expérimentales qui ont servi au traçage des courbes des figures II.11 et II.12. (a, b, c, d, e) sont présentés dans le tableau II.6.

**Tableau II.6.** Mesures expérimentales ayant servi au traçage des graphiques de  $Y_A = f(s/h_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Y_A$	$s/h_1$	$Y_A$	$s/h_1$	$Y_A$	$s/h_1$
3,775	0,5	5,375	1,25	8,3333333	4
4,325	0,75	5,6	1,5	8,4666667	4,3333333
4,2857143	0,5714286	5,775	1,75	8,84	3,2
4,9	1	5,9	2	9,04	3,6
4,7	0,6666667	5,8571429	1,4285714	9,24	4
4,8	0,8571429	6,05	2,25	9,4	4,4
5,08	0,8	6,2	2,5	9,6	4,8
5,2	1	6,2285714	1,7142857	9,84	5,2
5,2857143	1,1428571	6,325	2,75	10,04	5,6
5,8333333	1,3333333	6,4	2	10,24	6
5,85	1	6,5428571	2,2857143	10,6	4
5,8	1,2	6,8	2,5714286	10,4	6,4
6,3333333	1,6666667	6,9714286	2,8571429	10,6	6,8
6,52	1,6	7	2	11	4,5
6,8	1,5	7,1428571	3,1428571	11,25	5
7,12	2	7,2571429	3,4285714	11,5	5,5
7,6	2	7,3333333	2,3333333	11,8	6
7,76	2,4	7,6	2,6666667	12,05	6,5
8,4	2,5	7,7666667	3	12,4	7
9,05	3	7,9666667	3,3333333	12,65	7,5
9,9	3,5	8,1666667	3,6666667	12,9	8
		8,48	2,8	13,3	8,5

Le tableau II.7 regroupe les équations des droites d'ajustement, pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

**Tableau II.7.** Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant  $Y_A$  à la hauteur relative  $S$ , pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

$h_1/B$	a	b	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	7,057	0,29	$Y = 7,057 s/h_1^{0,29}$	0,992
0,041	6,599	0,244	$Y = 6,599 s/h_1^{0,244}$	0,994
0,05	5,954	0,242	$Y = 5,954 s/h_1^{0,242}$	0,996
0,058	5,412	0,24	$Y = 5,412 s/h_1^{0,24}$	0,993
0,066	5,144	0,202	$Y = 5,144 s/h_1^{0,202}$	0,998

Au vu de ces résultats, il semble d'une façon claire que les coefficients « a » et « b » diminuent progressivement avec la progression du paramètre  $h_1/B$ . L'ajustement statistique des couples des valeurs (a,  $h_1/B$ ) par la méthode des moindres carrés donne une relation de

type logarithmique d'équation :  $a = -2,88 \cdot \ln(h_1/B) - 2,712$  avec  $R^2 = 0,99$ . Celle-ci est illustrée par la figure ci-dessous

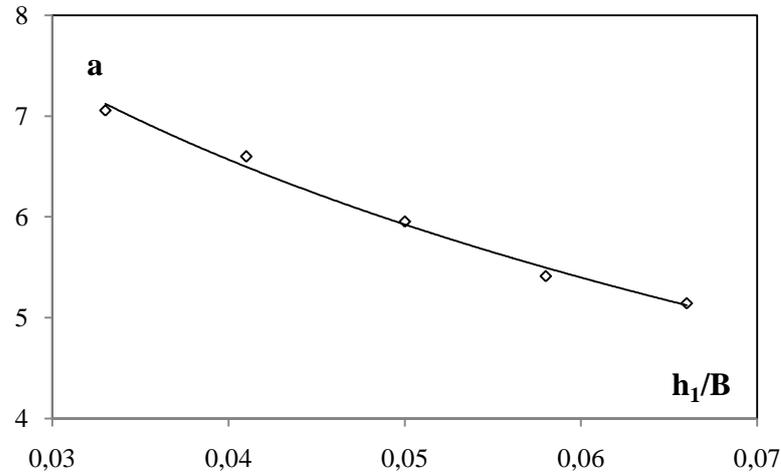


Figure II.13: Variation du paramètre 'a' en fonction de  $h_1/B$ .

Et l'ajustement des couples des valeurs ( $b, h_1/B$ ) par la méthode des moindres carrés donne une relation aussi de type linéaire d'équation :  $b = -2,484 \cdot \ln(h_1/B) + 0,372$  avec  $R^2 = 0,944$ . Comme il est indiqué sur la figure II.14.

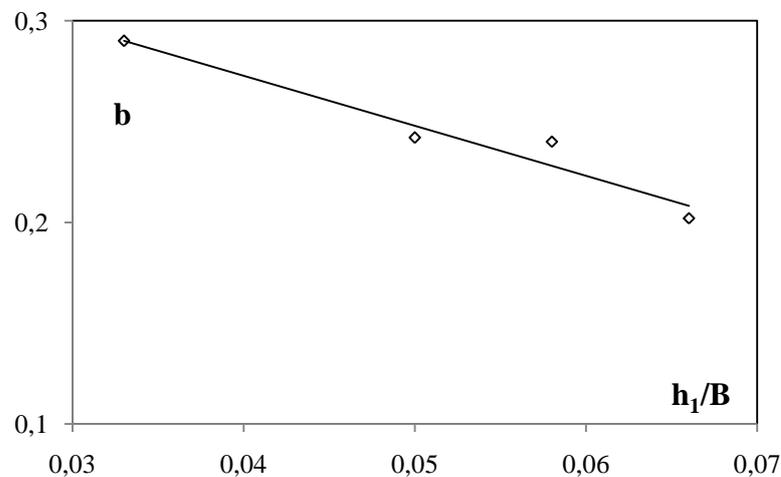


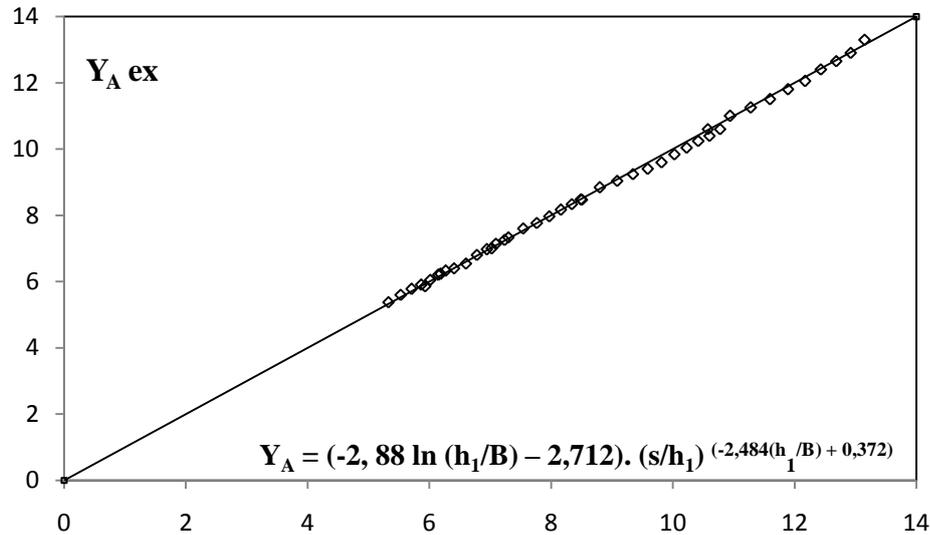
Figure II.14: Variation du paramètre 'b' en fonction de  $h_1/B$ .

En remplaçant les coefficients  $a$  et  $b$  par leurs expressions dans la relation  $Y_A = aF_1^{(b)}$ , l'équation liant le rapport des hauteurs conjuguées  $Y_A$  à la hauteur relative du seuil  $s/h_1$  et à la hauteur relative amont  $y_1$  devient :

$$Y_A = (-2,88 \ln(h_1/B) - 2,712) \cdot (s/h_1)^{(-2,484(h_1/B) + 0,372)} \quad (\text{II.10})$$

$$0,033 < y_1 < 0,066.$$

La figure (II.15) indique que la relation trouvée  $Y_A = f(h_1/B, s/h_1)$  ajuste avec une excellente corrélation les points de mesures expérimentales. Ces points suivent en totalité la première bissectrice, ce qui par conséquent explique la fiabilité des mesures obtenues au laboratoire.



**Figure II.15:** Variation de la hauteur conjuguée  $Y_A$  du ressaut en fonction de la relation  $f(h_1/B, s/h_1)$ .  
(o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $Y_A = f(h_1/B, s/h_1)$ .

### II.2.3.5. Rendement du ressaut hydraulique

Rappelons que le rendement  $\eta$  du ressaut hydraulique est défini par :

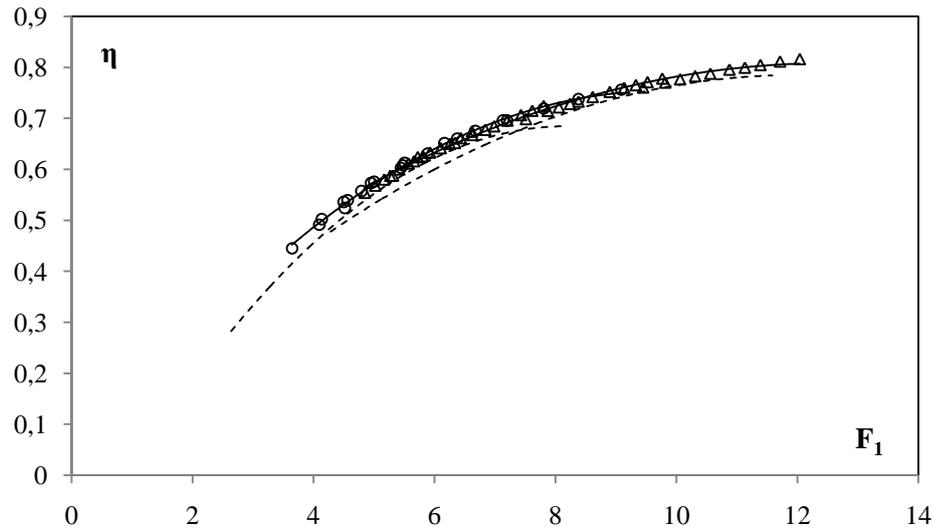
$$\eta = \Delta H / H_1 \quad \text{Avec : } \Delta H = H_1 - H_2$$

Avec  $H_1$  la charge amont,  $H_2$  la charge aval et  $\Delta H$  la différence de charge.

L'expression du rendement s'écrit dans ce cas :

$$\eta = 1 - \frac{Y_A + \frac{F_1^2}{2[Y_A / \beta - (1 / \beta - 1) / \tau]^2}}{1 + F_1^2 / 2}$$

La variation du rendement en fonction du nombre de Froude est présentée sur la figure II.16.



**Figure II.16:** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
 ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; (o) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil mince. (—) Courbes d'ajustements

A partir de cette figure, les points de mesure du ressaut contrôlé par seuil mince sont légèrement au dessous de ceux forcé type A. Ainsi dans le canal composé le décalage entre le lit mineur et le lit majeur n'est pas perceptible.

Le tableau II.8 accumule les valeurs du rendement  $\eta$  pour les différents nombres de Froude correspondants.

**Tableau II.8:** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure II.16.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$
0,44516964	3,6453286	0,55423501	4,8499922	0,7151988	7,6168893
0,49138499	4,0950702	0,56831545	5,0207284	0,72425559	7,8055765
0,50233907	4,1344247	0,58042862	5,1686327	0,71498783	7,8738798
0,52419287	4,514485	0,58765709	5,2680278	0,7219614	8,0569888
0,53610936	4,4987093	0,58790961	5,3143896	0,72863445	8,2414955
0,53955554	4,5619224	0,60003815	5,4182987	0,73321505	8,3807866
0,5573423	4,7919089	0,6118202	5,569972	0,74212908	8,6146607
0,57300168	4,9473147	0,61623579	5,6609141	0,75222985	8,8981273
0,57578719	5,0032162	0,62430385	5,7230346	0,76018971	9,1366752
0,60785214	5,4771168	0,62609027	5,8074389	0,76545542	9,3290223
0,60274234	5,4434806	0,63333056	5,9255541	0,76077626	9,4499158
0,61292401	5,5040756	0,64181172	6,1042066	0,77134143	9,5227006
0,63078151	5,8860943	0,65033211	6,254429	0,7783896	9,7666566
0,65162604	6,1641494	0,65201435	6,3400938	0,77050739	9,8156941
0,66048905	6,3754804	0,66149295	6,4362955	0,77688704	10,062106

**Tableau II.8.** (suite et fin) Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure II.16

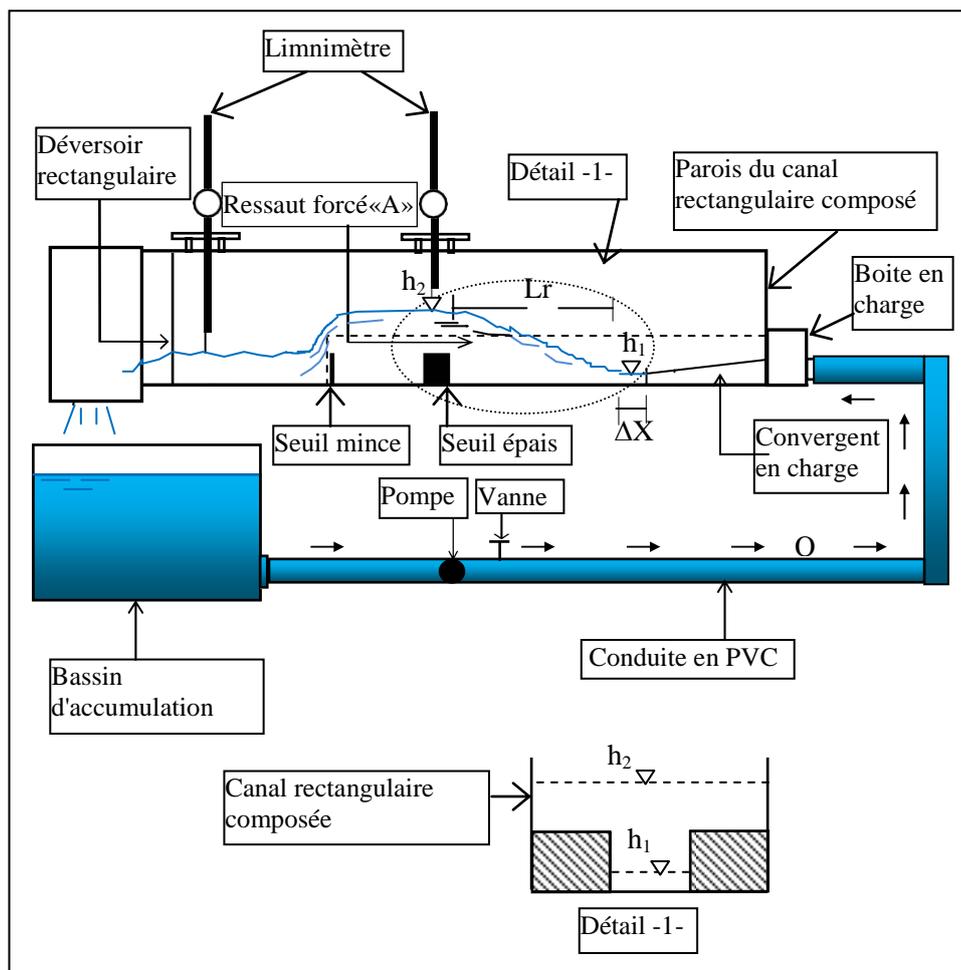
0,67527738	6,675305	0,674313	6,6198914	0,78297299	10,310546
0,6959407	7,1335671	0,66766758	6,6250158	0,78799172	10,560998
0,69573793	7,1998571	0,67785636	6,8414305	0,79590761	10,876868
0,71930219	7,8055765	0,68466339	6,9869898	0,79971787	11,131788
0,73756631	8,3807866	0,69600913	7,2072352	0,80484282	11,388669
0,75601285	9,0887975	0,70671873	7,4297474	0,81181366	11,712505
		0,69889378	7,5118986	0,81649037	12,039354

### II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE FORCÉ PAR SEUIL ÉPAIS EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE

#### II.3.1. DESCRIPTION DU MODELE

##### II.3.1.1. Description du canal

Dans le même dispositif expérimental, le premier seuil à parois mince est remplacé par un seuil à paroi épaisse. *Figure II.17.*



**Figure II.17:** Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé, ayant servi à l'expérimentation.

## II.3.2. Résultats expérimentaux

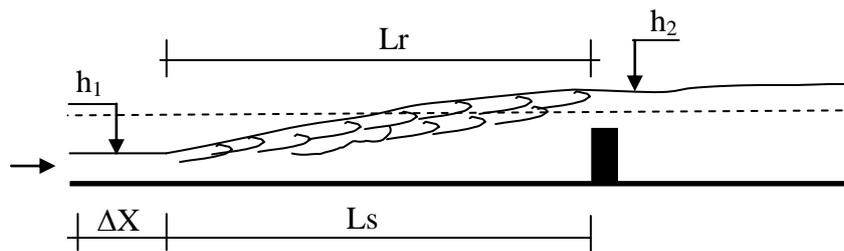
### II.3.2.1. Procédure expérimentale

L'étude expérimentale s'est intéressée au ressaut hydraulique provoqué par seuil épais, dans un canal rectangulaire de section composée, L'expérimentation a été menée sous cinq hauteurs initiales :  $h_1$  (mm) = 20 ; 25 ; 30 ; 35 ; et 40. Une large gamme des nombres de *Froude* incident a été ainsi obtenue :  $3 < F_1 < 12$ .

La formation du ressaut est conditionnée par la mise en place d'un seuil à parois épaisses au travers de l'écoulement. Pour cela 16 seuils épais ont été confectionnés et testés, de hauteur géométrique allant de 3,4 à 20,3 cm et d'une longueur  $L_0 = 20$  cm.

Un échantillon d'une cinquantaine de points de mesure expérimentaux, pour chaque caractéristique, a permis d'obtenir des résultats assez importants.

Les photos II.5 et II.6 illustrent deux configurations typiques de ressaut forcé par seuil à paroi épaisse en canal rectangulaire de section composée, pour la même hauteur initiale  $h_1 = 25$  mm et à débit volume croissant.



**Figure II.18 :** Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique forcé par seuil épais évoluant dans un canal rectangulaire composé.



**Photo II.5 :** Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par seuil épais  
 $F_1 = 5,99$ ;  $s = 4,5$  cm;  $L_s = 58$  cm;  $h_2 = 15,7$  cm;  $h_1 = 2,5$  cm



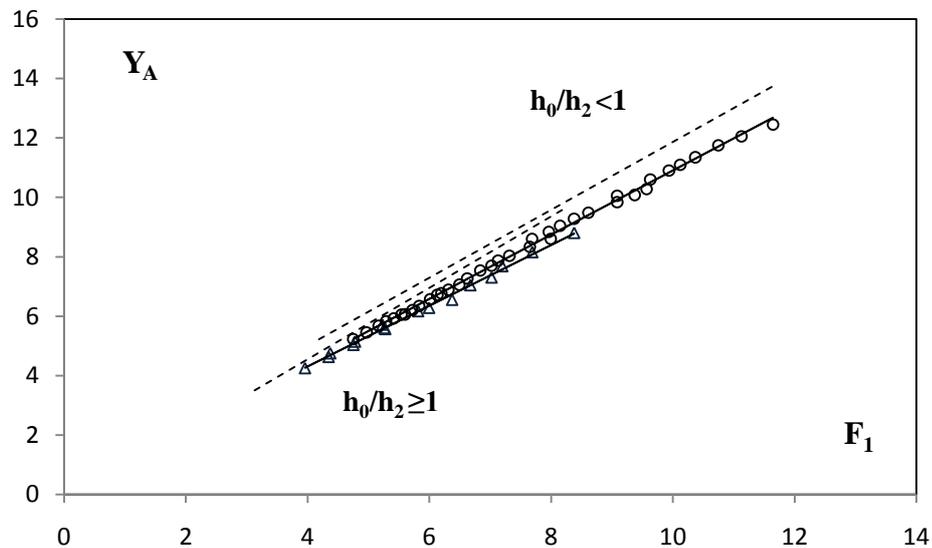
**Photo II.6 :** Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par seuil épais  
 $F_1 = 8,38$ ;  $s = 10,9$  cm;  $L_s = 115$  cm;  $h_2 = 23,4$  cm ;  $h_1 = 2,5$  cm

### II.3.3. Analyse des résultats expérimentaux

#### II.3.3.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude

$F_1$

La présente graphique de la variation du rapport  $Y_A$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident a abouti à une courbe unique pour les deux lits du canal composé, comme il est indiqué sur la figure II.19.



**Figure. II.19.** Variation du rapport des hauteurs conjuguées  $Y_A$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal composée. (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; (Δ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil épais. (—) Courbes d'ajustements

A partir des résultats obtenus, nous avons pu observer que le rapport  $Y_A$  des hauteurs conjuguées du ressaut forcé est moindre en lit mineur que celui en lit majeur. Ainsi la

réduction du rapport  $Y_A$  est remarquable au ressaut forcé qu'au ressaut contrôlé dans les deux lits du canal composé.

Un ajustement linéaire a permis d'écrire :

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad Y_A = 1,022 F_1 + 0,214 \quad R^2 = 0,996 \quad (\text{II.11})$$

$$3,95 < F_1 < 8,38$$

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad Y_A = 1,081 F_1 + 0,09 \quad R^2 = 0,998 \quad (\text{II.12})$$

$$4,75 < F_1 < 11,64$$

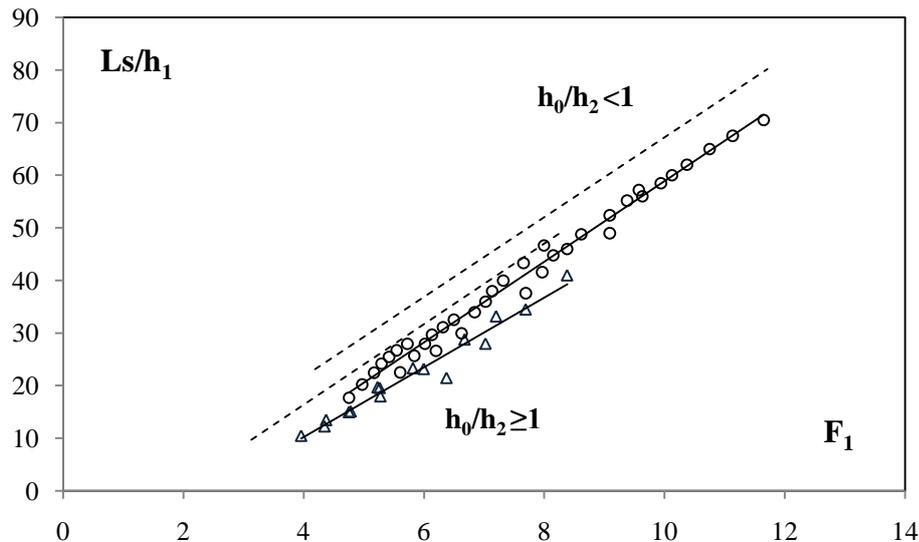
Les valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y_A = f(F_1)$  pour les deux lits, sont récapitulés dans le tableau II.9:

**Tableau II.9.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y_A = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Y_A$	$F_1$	$Y_A$	$F_1$	$Y_A$	$F_1$
4,25	3,9583739	5,225	4,753379	8,0333333	7,3183057
4,6285714	4,3464785	5,45	4,9718113	8,3333333	7,6546042
4,75	4,373226	5,675	5,1687007	8,6	7,6922807
5,0333333	4,753379	5,825	5,2930446	8,84	7,9653637
5,1428571	4,7809348	5,925	5,41837	8,6	7,9959018
5,7142857	5,2289733	6,05	5,5446692	9,04	8,1491753
5,6	5,2631123	6,0571429	5,6027283	9,28	8,3808969
5,5666667	5,2764086	6,2	5,7231099	9,48	8,6147741
6,1666667	5,8173281	6,3428571	5,8369701	9,84	9,0889171
6,28	5,9968816	6,5714286	6,0147384	10,05	9,0889171
6,55	6,3755643	6,7142857	6,1342343	10,08	9,3774409
7,04	6,6753928	6,7666667	6,1992877	10,28	9,5714531
7,3	7,0236314	6,8857143	6,3149411	10,6	9,632353
7,68	7,1999518	7,0571429	6,4973883	10,9	9,9387764
8,15	7,6922807	7,2666667	6,625103	11,1	10,12416
8,8	8,3808969	7,5333333	6,8415205	11,35	10,373108
		7,7	7,0236314	11,75	10,750289
		7,8666667	7,133661	12,05	11,131934
				12,45	11,647649

### II.3.3.2. position relative du seuil épais

La figure II.20 représente la variation de la position relative du seuil  $\lambda s$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident.



**Figure II.20.** Variation du rapport  $Ls/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal composé. (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil épais. (—) Courbes d'ajustements

Au vu des résultats que nous avons obtenus, il semble clairement que la position relative  $\lambda_s$  du ressaut forcé est plus compacte dans le lit mineur que dans le lit majeur, ainsi un décalage et très claire entre les valeurs de la longueur relative du rouleau de surface du ressaut forcé par seuil épais et celles du ressaut contrôlé pour le même nombre de Froude  $F_1$ . De plus un ajustement de type linéaire est possible pour les deux lits du canal composé.

- Pour  $h_0/h_2 \geq 1$  :  $Ls/h_1 = 7,655 F_1 - 14,21$   $R^2 = 0,986$  (II.13)

- Pour  $h_0/h_2 < 1$  :  $Ls/h_1 = 7,574 F_1 - 8,566$   $R^2 = 0,990$  (II.14)

Les points de mesure expérimentale qui ont permis le traçage de la figure II.20 sont enregistrés dans le tableau II.10.

**Tableau II.10.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des graphiques de  $Ls/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

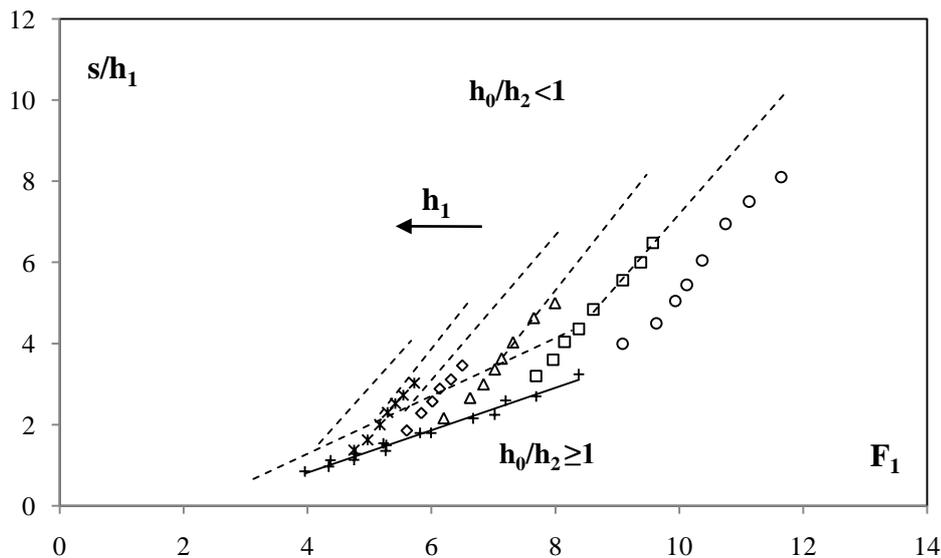
$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$Ls/h_1$	$F_1$	$Ls/h_1$	$F_1$	$Ls/h_1$
3,9583739	10,5	4,753379	17,75	7,3183057	40
4,3464785	12,285714	4,9718113	20,25	7,6546042	43,333333
4,373226	13,5	5,1687007	22,5	7,6922807	37,6
4,753379	15	5,2930446	24,25	7,9653637	41,6
4,7809348	15,142857	5,41837	25,5	7,9959018	46,666667
5,2289733	19,714286	5,5446692	26,75	8,1491753	44,8
5,2631123	19,6	5,6027283	22,571429	8,3808969	46
5,2764086	18	5,7231099	28	8,6147741	48,8
5,8173281	23,333333	5,8369701	25,714286	9,0889171	52,4
5,9968816	23,2	6,0147384	28	9,0889171	49

**Tableau II.10.** (suite et fin) Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des graphiques de  $Ls/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

6,3755643	21,5	6,1342343	29,714286	9,3774409	55,2
6,6753928	28,8	6,1992877	26,666667	9,5714531	57,2
7,0236314	28	6,3149411	31,142857	9,632353	56
7,1999518	33,2	6,4973883	32,571429	9,9387764	58,5
7,6922807	34,5	6,625103	30	10,12416	60
8,3808969	41	6,8415205	34	10,373108	62
		7,0236314	36	10,750289	65
		7,133661	38	11,131934	67,5
				11,647649	70,5

### II.2.2.3. hauteur relatif du seuil

Sur la figure II.21 sont représentées les valeurs expérimentales obtenues de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et la courbe expérimentale en trait pointillé exprime la variation de la hauteur relative du seuil du ressaut contrôlé par seuil épais.



**Figure II.21.** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal composé. (+) points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour  $h_0/h_2 < 1$ . (o)  $h_1=2\text{cm}$ ; (□)  $h_1=2,5\text{cm}$ ; (Δ)  $h_1=3\text{cm}$ ; (◇)  $h_1=3,5\text{cm}$ ; (\*)  $h_1=4\text{cm}$ . (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil épais. (—) Courbes d'ajustements.

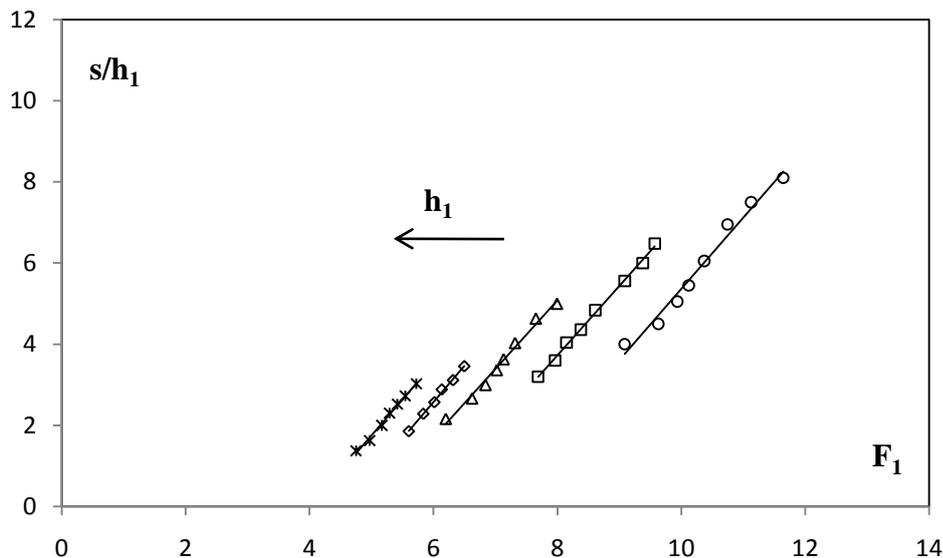
Les valeurs expérimentales que nous avons effectuées ont montrées, une autre fois, un décalage entre les valeurs de la hauteur relative du seuil forcé et celle contrôlé par seuil épais, pour les même nombre de Froude  $F_1$  dans les deux lit du canal composé.

La figure montre clairement que tous les points se rassemblent pour construire un seul nuage de points en lit mineur et que l'augmentation du nombre de Froude  $F_1$  entraîne celle du rapport de la hauteur du seuil  $S$ . Un ajustement linéaire a permis d'écrire:

$$s/h_1 = 0,522 F_1 - 1,268 \quad R^2 = 0,984 \quad (\text{II.15})$$

$$3,95 < F_1 < 8,38$$

Tandis que l'influence de la hauteur amont  $h_1$  est très perceptible dans le lit majeur, L'analyse des points de mesures expérimentales, montre que pour chaque valeur de  $y_1$ , un ajustement de type linéaire est possible de la forme :  $s/h_1 = a F_1 + b$ .



**Figure II.22.** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour le lit majeur du canal composé. (○)  $h_1=2\text{cm}$  ; (□)  $h_1=2,5\text{cm}$  ; (Δ)  $h_1=3\text{cm}$  ; (◇)  $h_1=3,5\text{cm}$  ; (\*)  $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbes d'ajustements.

La figure ci-dessus montre que les mesures expérimentales présentent cinq allures différentes, pour différentes hauteurs amont  $h_1$ . En outre, l'augmentation de nombre de Froude  $F_1$  entraîne l'augmentation de la hauteur relative  $S$  du seuil. On remarque que pour la même valeur du seuil relative, la valeur de nombre de Froude  $F_1$  augmente avec la diminution de  $h_1$ .

Les résultats obtenus de l'ajustement sont mentionnées dans le tableau ci-dessous.

**Tableau II.11** Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant  $s/h_1$  au nombre de Froude  $F_1$ , pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

$h_1/B$	a	b	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	1,754	- 12,18	$s/h_1 = 1,754 F_1 - 12,18$	0,981
0,041	1,712	- 9,976	$s/h_1 = 1,712 F_1 - 9,976$	0,997
0,05	1,688	- 8,423	$s/h_1 = 1,688 F_1 - 8,423$	0,987
0,058	1,788	- 8,155	$s/h_1 = 1,788 F_1 - 8,155$	0,996
0,066	1,773	- 7,115	$s/h_1 = 1,773 F_1 - 7,115$	0,993

Le tableau II.11 montre clairement que les valeurs des paramètres  $a$  sont presque égaux et leur moyen arithmétique est  $a=1,743$ . Cependant les valeurs du coefficient  $b$  augmentent progressivement avec l'augmentation de la hauteur relative amont  $y_1$ . L'ajustement statistique des couples de valeurs  $(b, y_1)$  par la méthode des moindres carrés donne une relation de type logarithmique :  $b=7,01.\ln(h_1/B)+12,09$  ;  $R^2 = 0,963$ .

Celle-ci est schématisée par la figure ci-dessous

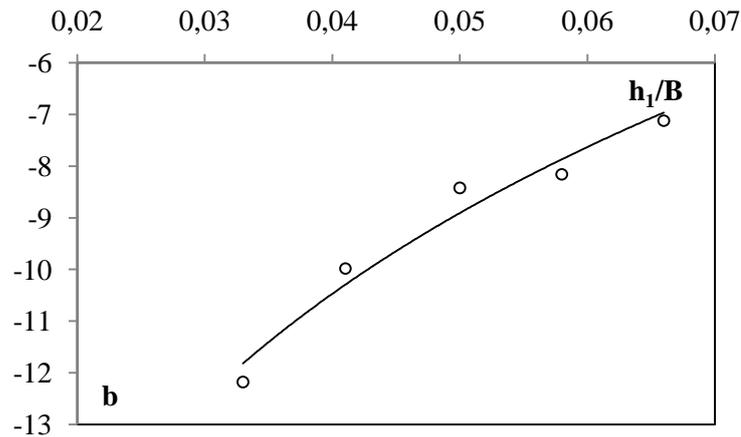


Figure II.23 : Variation du paramètre 'b' en fonction de  $h_1/B$ .

En remplaçant les paramètres (a) et (b) par leurs expressions respectives on obtient la relation générale suivante :

$$s/h_1 = 1,743 F_1 + 7,01.\ln(h_1/B) + 12,09 \tag{II.16}$$

$$4,75 \leq F_1 \leq 11,64 \text{ et } 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066$$

Les données ayant servi au traçage des figures II.21 et II.22 sont groupées au tableau II.12.

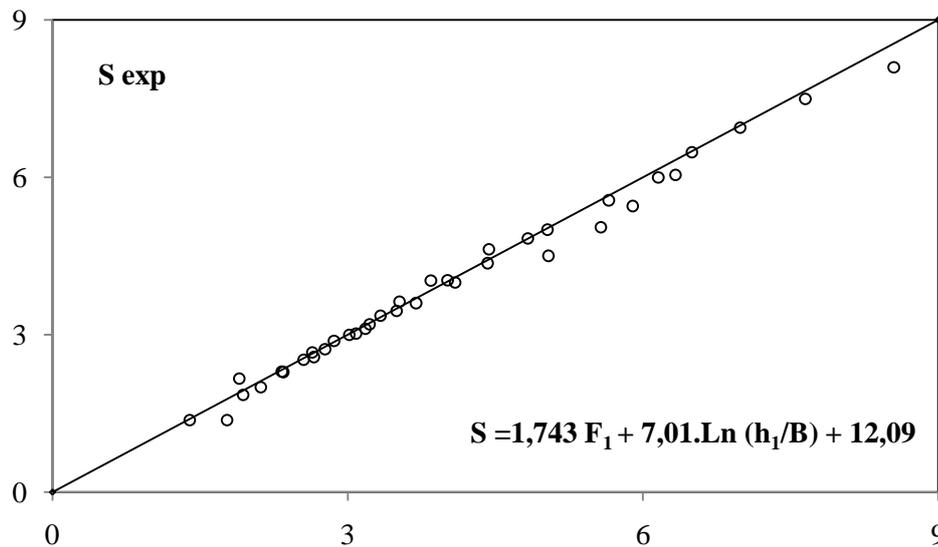
Tableau II.12. Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $s/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$
0,85	3,9583739	1,375	4,753379	4,0333333	7,3183057
0,9714286	4,3464785	1,375	4,9718113	4,6333333	7,6546042
1,125	4,373226	2	5,1687007	3,2	7,6922807
1,1333333	4,753379	2,3	5,2930446	3,6	7,9653637
1,2857143	4,7809348	2,525	5,41837	5	7,9959018
1,5428571	5,2289733	2,725	5,5446692	4,04	8,1491753
1,36	5,2631123	1,8571429	5,6027283	4,36	8,3808969
1,5	5,2764086	3,025	5,7231099	4,84	8,6147741
1,8	5,8173281	2,2857143	5,8369701	5,56	9,0889171
1,8	5,9968816	2,5714286	6,0147384	4	9,0889171
2,16	6,6753928	2,8857143	6,1342343	6	9,3774409

**Tableau II.12.** (suite et fin) Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $s/h_1 = f(F_1)$  pour  $h/h_2 \geq 1$  et  $h/h_2 < 1$ .

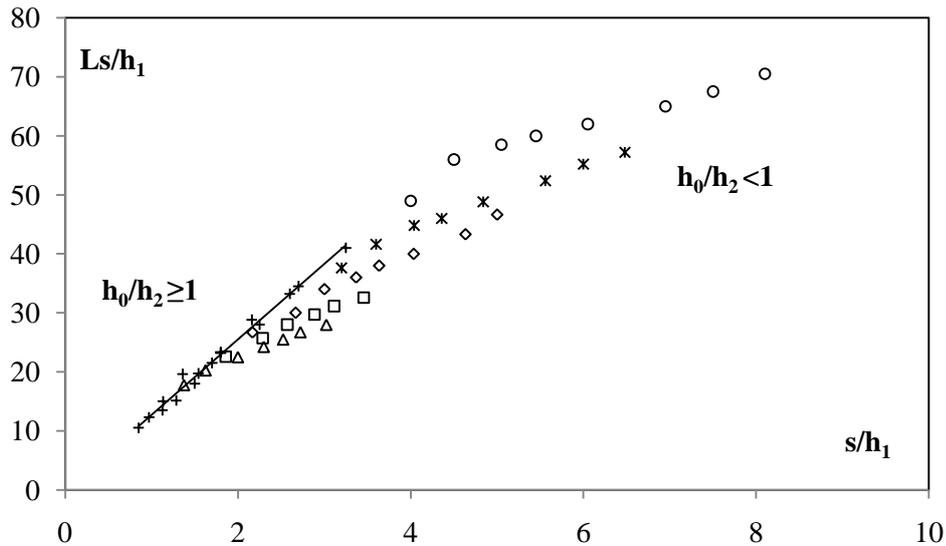
$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$
2,25	7,0236314	2,1666667	6,1992877	6,48	9,5714531
2,6	7,1999518	3,1142857	6,3149411	4,5	9,632353
2,7	7,6922807	3,4571429	6,4973883	5,05	9,9387764
3,25	8,3808969	2,6666667	6,625103	5,45	10,12416
		3	6,8415205	6,05	10,373108
		3,3666667	7,0236314	6,95	10,750289
		3,6333333	7,133661	7,5	11,131934
				8,1	11,647649

La figure (II.24) montre également que la relation trouvée  $s/h_1 = f(F_1, y_1)$  ajuste avec une très bonne corrélation les points de mesures. Ces points suivent en totalité la première bissectrice, ce qui justifie la fiabilité de la relation trouvée.



**Figure II.24 :** Variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction de la relation  $f(F_1, h_1/B)$ .  
(o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $s/h_1 = f(F_1, h_1/B)$ .

L'expérimentation a également montré, qu'un ajustement est possible entre la position relative  $\lambda s$  du seuil et la hauteur relative  $S$  de celle-ci. Les résultats sont indiqués sur la figure II.25.



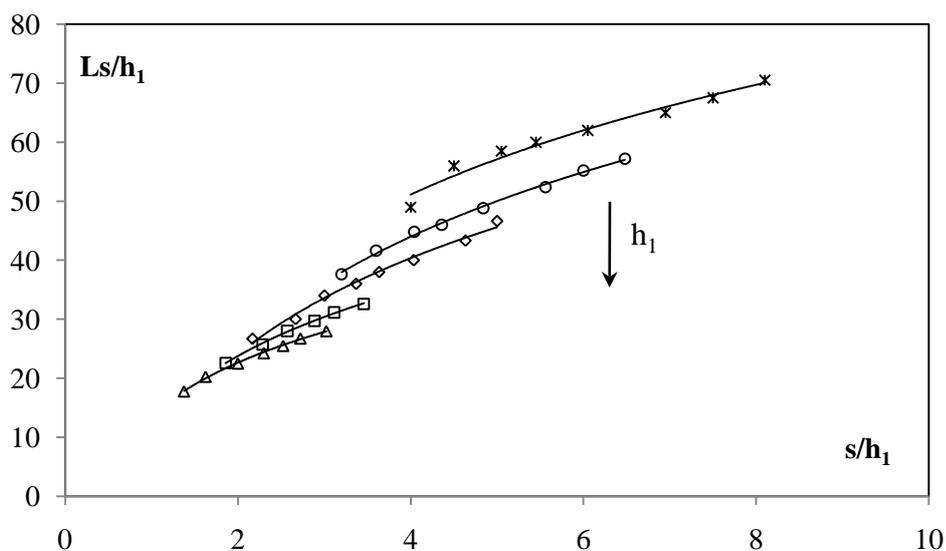
**Figure II.25 :** Variation de la position relative du seuil  $ls$  en fonction de sa hauteur relative  $s/h_1$ . (+) points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour  $h_0/h_2 < 1$ . (o)  $h_1=2\text{cm}$ ; (\*)  $h_1=2,5\text{cm}$ ; ( $\diamond$ )  $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\square$ )  $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $\Delta$ )  $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbe d'ajustement.

La représentation graphique de la relation  $Ls/h_1 = f(S)$  dans le lit mineur a abouti à une courbe unique, comme l'indique la figure II.25. Un ajustement linéaire a permis d'écrire:

$$Ls/h_1 = 12,78(s/h_1) - 0,058 \quad R^2 = 0,989 \quad (\text{II.17})$$

$$3,95 < F_1 < 8,38$$

Tandis que dans le lit majeur, cinq allures distinctes chacune correspond à une hauteur  $h_1$  bien déterminée. Cela indique l'effet de ce dernier. Comme le montre la figure II.26.



**Figure II.26 :** Variation de la position relative du seuil  $ls$  en fonction de sa hauteur relative  $s/h_1$ , Dans le lit majeur. (o)  $h_1=2\text{cm}$ ; (\*)  $h_1=2,5\text{cm}$ ; ( $\diamond$ )  $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\square$ )  $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $\Delta$ )  $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbe d'ajustement.

Un ajustement de type logarithmique est possible pour chaque valeur de  $y_1$ , de la forme :  $s/h_1 = a \ln(s/h_1) + b$ . le tableau ci-dessous résume les résultats obtenus de l'ajustement et les valeurs des coefficients a et b.

**Tableau II.13.** Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant  $ls$  à la hauteur relative  $S$ , pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

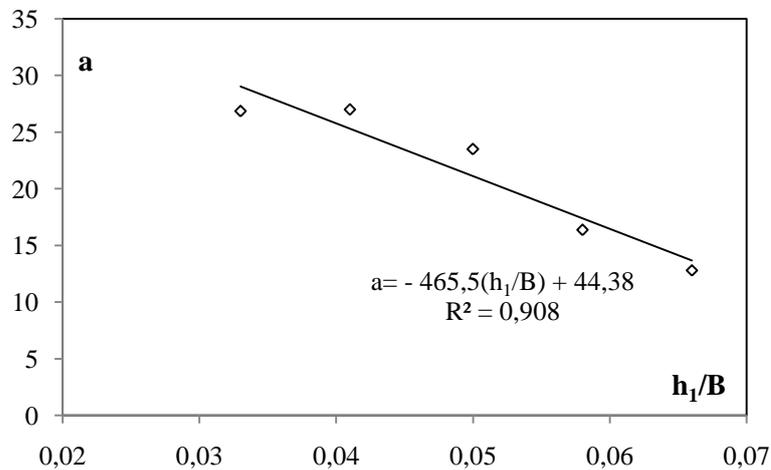
$h_1/B$	a	b	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	26,84	13,91	$Ls/h_1 = 26,84 \ln(s/h_1) + 13,91$	0,968
0,041	26,98	6,578	$Ls/h_1 = 26,98 \ln(s/h_1) + 6,578$	0,996
0,05	23,48	7,783	$Ls/h_1 = 23,48 \ln(s/h_1) + 7,783$	0,989
0,058	16,36	12,39	$Ls/h_1 = 16,36 \ln(s/h_1) + 12,39$	0,998
0,066	12,80	13,75	$Ls/h_1 = 12,80 \ln(s/h_1) + 13,75$	0,997

Au vue des résultats présenté dans le tableau ci-dessus, les valeurs des paramètres b sont approximativement égales et leur moyen arithmétique est  **$b=10,8822$** . Tandis que, les valeurs du coefficient a diminué progressivement avec l'augmentation de la hauteur relative amont  $y_1$ .

Un ajustement de type linéaire est possible des couples de valeurs (a,  $y_1$ ) :

$$a = -465,5 (h_1/B) + 44,38 \quad ; \quad R^2 = 0,908.$$

Comme il est présenté sur la figure II.27.



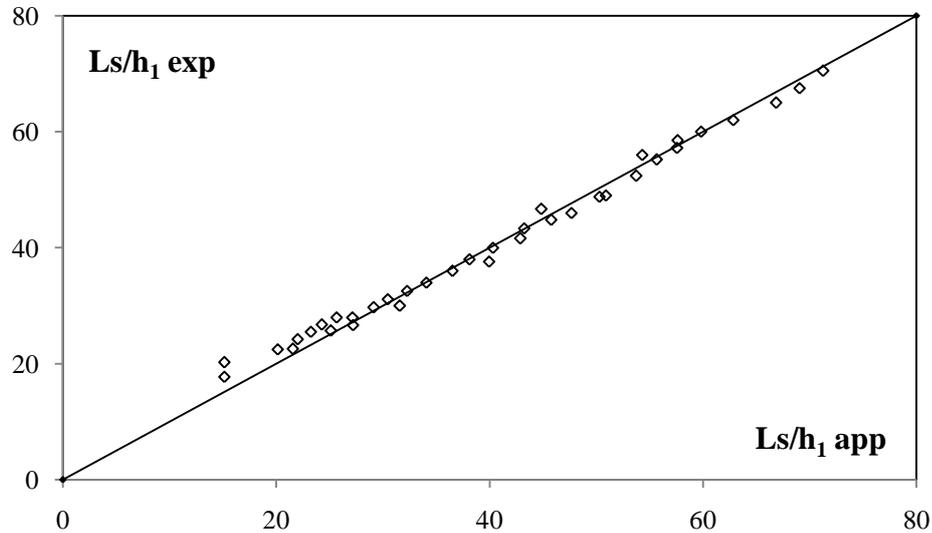
**Figure II.27:** Variation du paramètre 'a' en fonction de  $h_1/B$ .

En remplaçant les paramètres (a) et (b) par leurs expressions respectives on obtient la relation générale suivante :

$$Ls/h_1 = (-465,5 (h_1/B) + 44,38) \cdot \ln(s/h_1) + 10,8822 \quad (II.18)$$

$$4,75 \leq F_1 \leq 11,64 \quad \text{et} \quad 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066$$

La figure (II.28) montre que la relation  $\lambda_s = f(s/h_1, h_1/B)$  ajuste avec une très bonne corrélation les points de mesures expérimentales. Ces derniers tournent en majorité autour de la première bissectrice ce qui justifie la fiabilité de la relation globale obtenue.



**Figure II.28 :** Variation de la position relative  $Ls/h_1$  du seuil en fonction de la relation  $f(s/h_1, h_1/B)$ .  
 (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $Ls/h_1 = f(s/h_1, h_1/B)$ .

Les données ayant servi au traçage des figures II.25 et II.26 sont réunies au tableau II.14.

**Tableau II.14.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Ls/h_1 = f(s/h_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

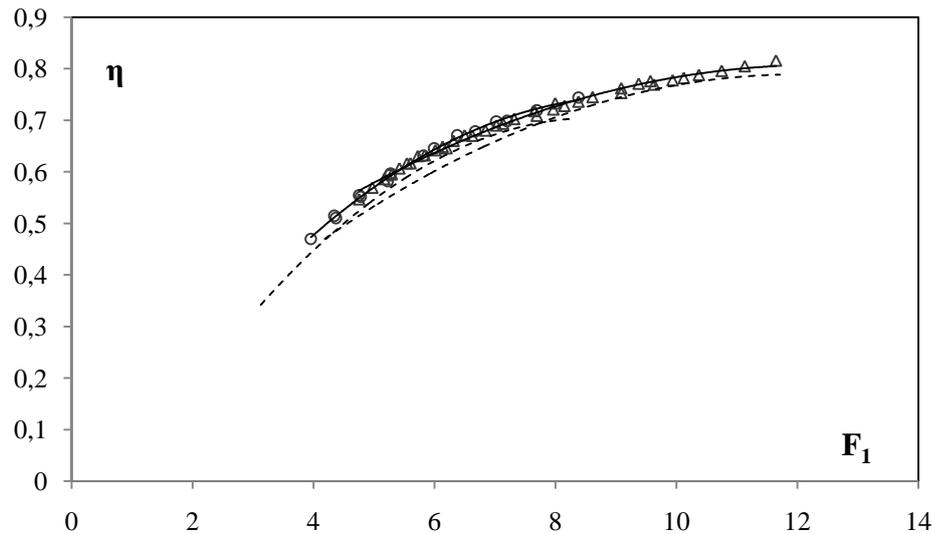
$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Ls/h_1$	$s/h_1$	$Ls/h_1$	$s/h_1$	$Ls/h_1$	$s/h_1$
10,5	0,85	17,75	1,375	40	4,0333333
12,285714	0,9714286	20,25	1,375	43,3333333	4,6333333
13,5	1,125	22,5	2	37,6	3,2
15	1,1333333	24,25	2,3	41,6	3,6
15,142857	1,2857143	25,5	2,525	46,666667	5
19,714286	1,5428571	26,75	2,725	44,8	4,04
19,6	1,36	22,571429	1,8571429	46	4,36
18	1,5	28	3,025	48,8	4,84
23,333333	1,8	25,714286	2,2857143	52,4	5,56
23,2	1,8	28	2,5714286	49	4
21,5	1,7	29,714286	2,8857143	55,2	6
28,8	2,16	26,666667	2,1666667	57,2	6,48
28	2,25	31,142857	3,1142857	56	4,5
33,2	2,6	32,571429	3,4571429	58,5	5,05
34,5	2,7	30	2,6666667	60	5,45
41	3,25	34	3	62	6,05
		36	3,3666667	65	6,95
		38	3,6333333	67,5	7,5
				70,5	8,1

### II.2.3.4. Rendement du ressaut hydraulique

L'expression du rendement s'écrit :

$$\eta = 1 - \frac{Y_A + \frac{F_1^2}{2[Y_A/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2}$$

La variation du rendement en fonction du nombre de Froude est représentée sur la figure II.29.



**Figure II.29:** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
 ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; (o) points de mesures expérimentales en lit mineur.  
 (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par seuil épais. (—) Courbes d'ajustements

Au vu de cette figure, les points de mesure du ressaut contrôlé par seuil épais sont trouvés légèrement décalés au dessous de ceux forcé de type A. Ainsi dans le canal composé, le décalage entre le lit mineur et le lit majeur n'est pas sensible.

Le tableau II.15 réunit les valeurs du rendement  $\eta$  pour les nombres de Froude correspondants.

**Tableau II.15:** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure II.29.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$
0,47207456	3,9583739	0,54784847	4,753379	0,70353792	7,3183057
0,5169026	4,3464785	0,57042511	4,9718113	0,718813	7,6546042
0,51211399	4,373226	0,58722292	5,1687007	0,70980649	7,6922807
0,55665963	4,753379	0,59649885	5,2930446	0,72211716	7,9653637
0,55335284	4,7809348	0,60791874	5,41837	0,73380553	7,9959018
0,58362921	5,2289733	0,61758706	5,5446692	0,72885411	8,1491753
0,59542373	5,2631123	0,61769281	5,6027283	0,73710537	8,3808969
0,59866747	5,2764086	0,63167716	5,7231099	0,74586208	8,6147741
0,63265077	5,8173281	0,633161	5,8369701	0,76290703	9,0889171

Tableau II.15 (suite et fin): Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure II.29.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$	$\eta$	$F_1$
0,64692621	5,9968816	0,64314337	6,0147384	0,75204991	9,0889171
0,67261917	6,3755643	0,64982975	6,1342343	0,77182695	9,3774409
0,67978679	6,6753928	0,64676434	6,1992877	0,77670976	9,5714531
0,69923811	7,0236314	0,66113032	6,3149411	0,77017191	9,632353
0,69969669	7,1999518	0,67184292	6,4973883	0,77845485	9,9387764
0,72042616	7,6922807	0,67110415	6,625103	0,78284168	10,12416
0,74505042	8,3808969	0,68125013	6,8415205	0,78871692	10,373108
		0,69100286	7,0236314	0,79665629	10,750289
		0,69447383	7,133661	0,80555853	11,131934
				0,81652502	11,647649

### II.3. RESSAUT HYDRAULIQUE FORCÉ PAR MARCHE POSITIVE EN CANAL RECTANGULAIRE DE FORME COMPOSÉE

#### II.3.1. DESCRIPTION DU MODELE

##### II.3.1.1. Description du canal

C'est le même dispositif expérimental utilisé dans notre expérimentation, dans ce cas on à utiliser une marche positive pour forcer le ressaut. *Figure II.30.*

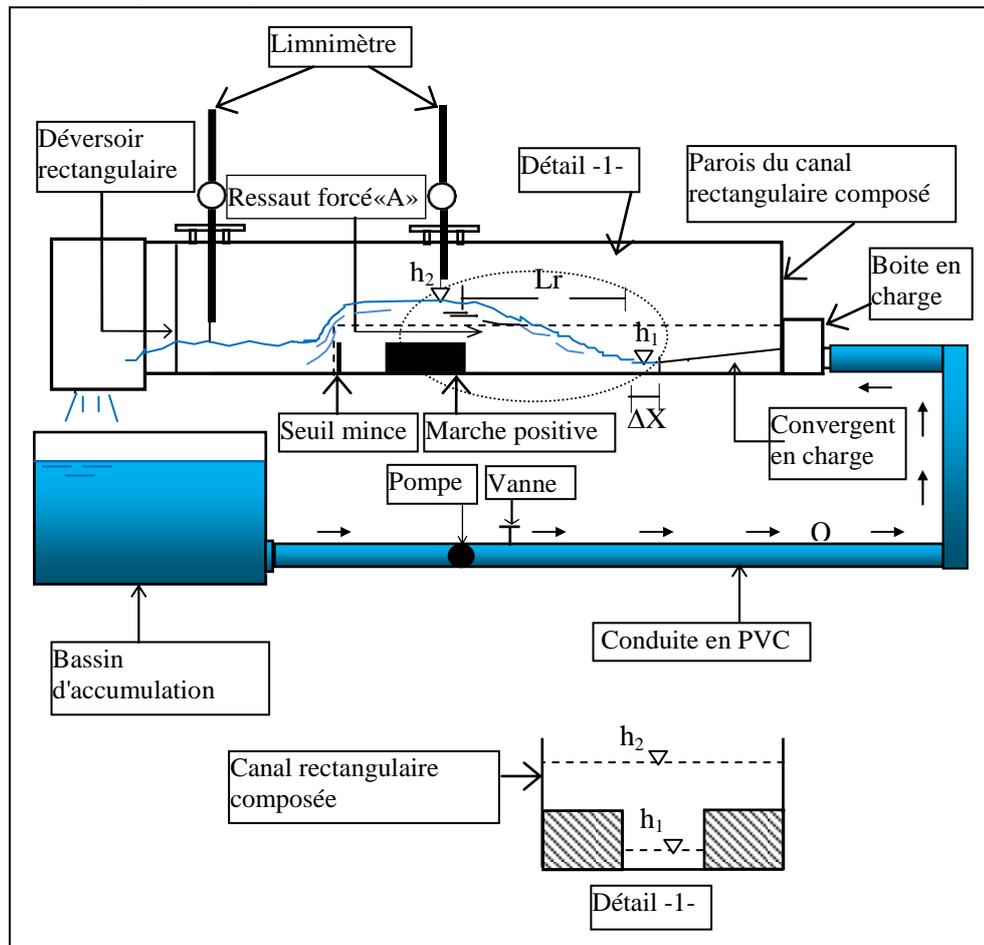
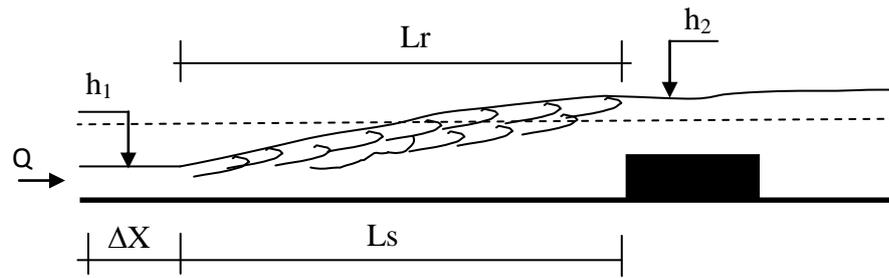


Figure II.30 : Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composé, ayant servi à l'expérimentation.



**Figure II.31 :** Schéma simplifié d'un ressaut hydraulique forcé par marche positive évoluant dans un canal rectangulaire composé.



**Photo II.7:** Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par marche positive  
 $F_1 = 6,67$ ;  $s = 5,4$  cm;  $L_s = 70$  cm;  $h_2 = 16,9$  cm;  $h_1 = 2,5$  cm

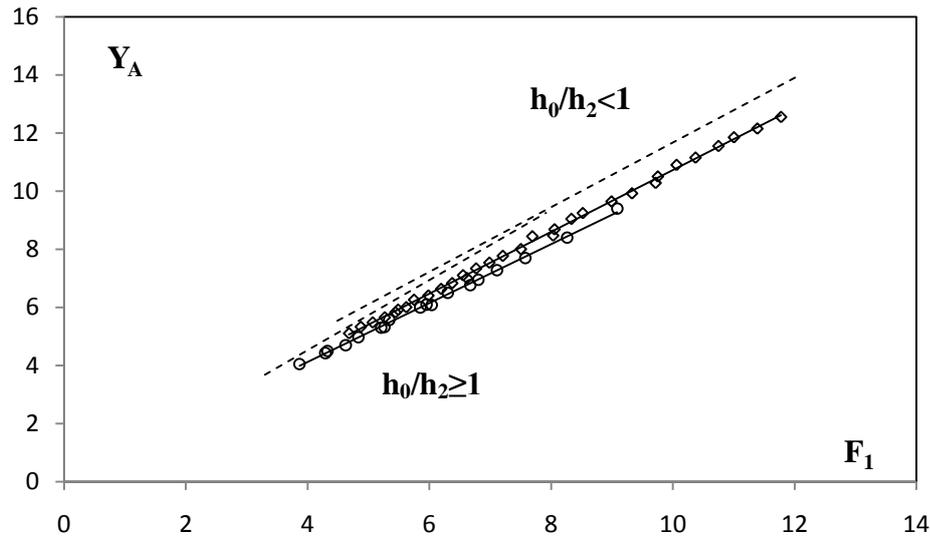


**Photo II.8:** Photographie d'un ressaut hydraulique forcé par marche positive  
 $F_1 = 8,52$ ;  $s = 11,8$  cm;  $L_s = 126$  cm;  $h_2 = 23,1$  cm;  $h_1 = 2,5$  cm

## II.3.2. Résultats expérimentaux

### II.3.2.1. Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude $F_1$

Sur la figure II.32 est représentée la variation du rapport  $Y_A$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, tel que  $Y_A = (h_2 + s) / h_1$  représente le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique forcé type « A ». La courbe en trait discontinu représente le ressaut contrôlé par marche positive.



**Figure. II.32.** Variation du rapport des hauteurs conjuguées  $Y_A$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal composé. ( $\diamond$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\circ$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par marche positive. (—) Courbes d'ajustements

A travers cette figure, la hauteur relative  $Y_A$  du ressaut est moindre au lit mineur que celui au lit majeur, ainsi le rapport  $Y_A$  du ressaut forcé type A est nettement inférieur à celui du ressaut contrôlé par marche positive.

La représentation graphique des mesures expérimentales des rapports  $Y_A$  en fonction du nombre de Froude a abouti à une courbe unique pour les deux lits du canal composé.

$$\begin{aligned}
 - \text{ Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad & Y_A = 1,014 F_1 + 0,057 \quad R^2 = 0,998 \quad (\text{II.19}) \\
 & 3,86 < F_1 < 9,08
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 - \text{ Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad & Y_A = 1,064 F_1 + 0,073 \quad R^2 = 0,998 \quad (\text{II.20}) \\
 & 3,86 < F_1 < 9,08
 \end{aligned}$$

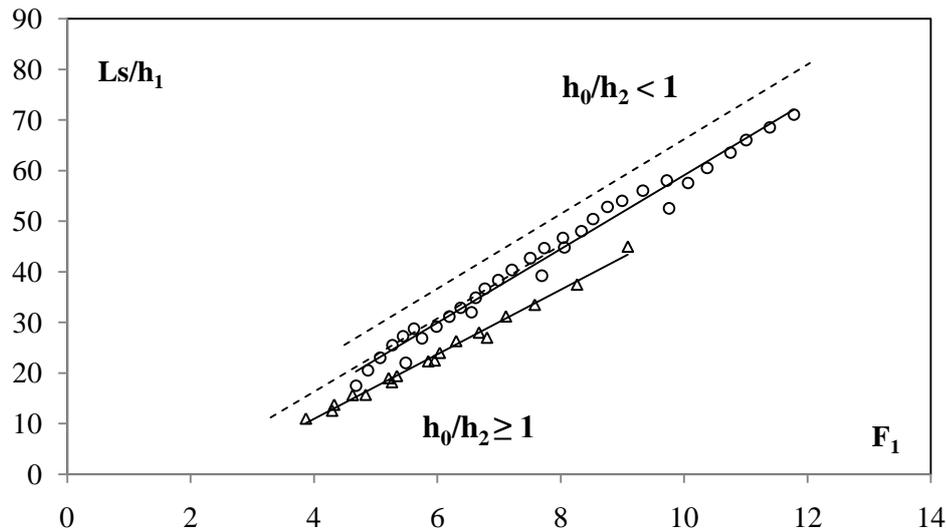
Les mesures expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y_A = f(F_1)$  pour les deux lits, sont regroupées dans le tableau II.16:

**Tableau II.16.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Y_A = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Y_A$	$F_1$	$Y_A$	$F_1$	$Y_A$	$F_1$
4,05	3,868071	5,1	4,6812982	8	7,5045166
4,4285714	4,2931479	5,325	4,8743265	8,44	7,6922807
4,5	4,3264538	5,475	5,0699374	8,4666667	8,0341292
4,7	4,6254897	5,65	5,2680971	8,68	8,0570948
4,9714286	4,8362054	5,825	5,4435522	9,04	8,3343795
5,3	5,2100391	5,9142857	5,4868121	9,24	8,5209658
5,32	5,2631123	6	5,6209131	9,64	8,9934123
5,5714286	5,3430575	6,2571429	5,7487549	9,92	9,3291451
6	5,8517162	6,4	5,984987	10,28	9,7178289
6,1	5,9552849	6,6285714	6,1942755	10,5	9,7545384
6,08	6,0385748	6,8285714	6,3755643	10,9	10,062239
6,5	6,304856	7	6,6199785	11,15	10,373108
6,76	6,6753928	7,1	6,5534807	11,55	10,750289
6,95	6,8052901	7,3333333	6,7691239	11,85	11,004226
7,28	7,1116095	7,5333333	6,9870818	12,15	11,388819
7,7	7,5794366	7,7666667	7,2073301	12,55	11,77779
8,4	8,2647654				
9,4	9,0889171				

### II.3.2.2. position relative de la marche positive $\lambda s = Ls/h_1$

La figure II.33 représente la variation de la position relative de la marche positive  $\lambda s$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. Pour le ressaut forcé de type A, la position  $Ls$  de la marche correspond à la longueur  $Lr$  du rouleau de surface. La courbe expérimentale en trait pointillée exprime la variation de la hauteur relative du seuil du ressaut contrôlé par marche positive. Les résultats présentés sur la figure II.33 ont montré que l'augmentation du nombre de Froude engendre l'augmentation de la position relative de la marche positive. Ainsi pour le même nombre de Froude la position de la marche  $Ls$  est plus longue dans le lit majeur. Également le décalage est perceptible entre le ressaut forcé type A et le ressaut contrôlé.



**Figure II.33.** Variation du rapport  $Ls/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal composé. (o) points de mesures expérimentales en lit majeur; ( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par marche positive. (—) Courbes d'ajustements

L'ajustement des valeurs expérimentales a montré que la relation  $Ls/h_1 = f(F_1)$  est de type linéaire pour les deux lit du canal. Celle-ci s'écrit pour chaque lit comme suit :

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 \geq 1 : \quad Ls/h_1 = 6,367 F_1 - 14,52 \quad R^2 = 0,992 \quad (\text{II.21})$$

$$3,86 < F_1 < 9,08$$

$$- \text{ Pour } h_0/h_2 < 1 : \quad Ls/h_1 = 7,286 F_1 - 13,84 \quad R^2 = 0,984 \quad (\text{II.22})$$

$$3,86 < F_1 < 9,08$$

Les mesures expérimentales ayant servi au tracé des courbes  $Ls/h_1 = f(F_1)$  pour les deux lits du canal composé, sont regroupées dans le tableau II.17:

**Tableau II.17.** Valeurs expérimentales ayant servi au tracé des courbes  $Ls/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Ls/h_1$	$F_1$	$F_1$	$Ls/h_1$	$F_1$	$Ls/h_1$
11	3,868071	4,6812982	17,5	7,6922807	39,2
12,571429	4,2931479	4,8743265	20,5	7,7300187	44,666667
13,75	4,3264538	5,0699374	23	8,0341292	46,666667
15,666667	4,6254897	5,2680971	25,5	8,0570948	44,8
15,714286	4,8362054	5,4435522	27,25	8,3343795	48
19	5,2100391	5,4868121	22	8,5209658	50,4
18,2	5,2631123	5,6209131	28,75	8,7561269	52,8
19,428571	5,3430575	5,7487549	26,857143	8,9934123	54
22	5,5736736	5,984987	29,142857	9,3291451	56
22,333333	5,8517162	6,1942755	31,142857	9,7178289	58
22,5	5,9552849	6,3755643	32,857143	9,7545384	52,5
24	6,0385748	6,6199785	34,857143	10,062239	57,5

**Tableau II.17(suite et fin).** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Ls/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

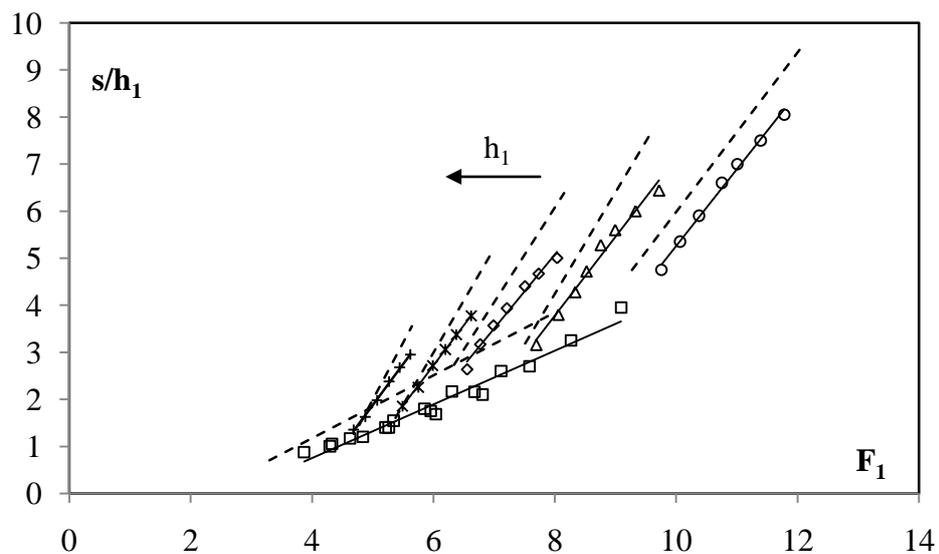
26,333333	6,304856	6,5534807	32	10,373108	60,5
28	6,6753928	6,7691239	36,666667	10,750289	63,5
27	6,8052901	6,9870818	38,333333	11,004226	66
31,2	7,1116095	7,2073301	40,333333	11,388819	68,5
33,5	7,5794366	7,5045166	42,666667	11,77779	71
37,5	8,2647654				
45	9,0889171				

### II.3.2.3. hauteur relative de la marche positive

La figure II.34 représente la variation de la hauteur relative de la marche positive en fonction du nombre de Froude  $F_1$  dans le canal composé.

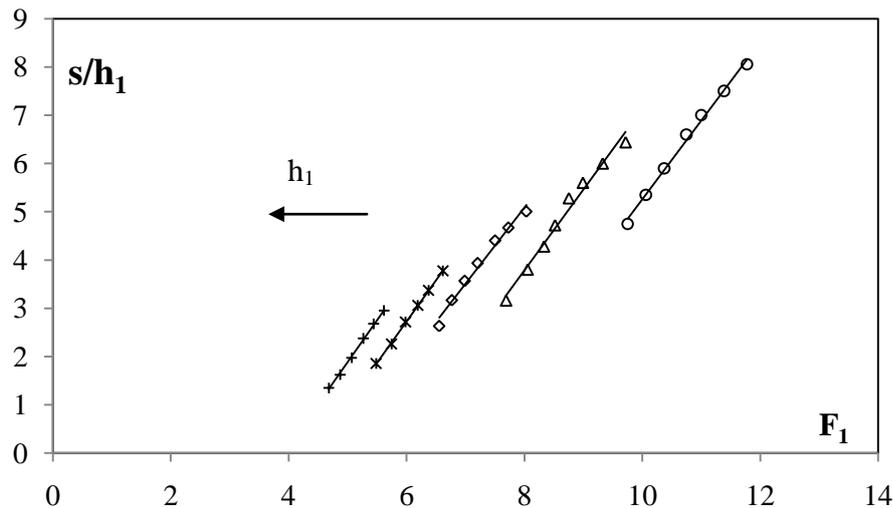
L'analyse des mesures expérimentales a également montré que dans le lit mineur, la fonction  $s/h_1 = f(F_1)$  est de type linéaire de la forme

$$s/h_1 = 0,570 F_1 - 1,53 ; R^2 = 0,971 \quad (\text{II.23})$$



**Figure II.34.** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour les deux lits du canal composé. ( $\square$ ) Points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour  $h_0/h_2 < 1$ . ( $\circ$ )  $h_1=2\text{cm}$ ; ( $\Delta$ )  $h_1=2,5\text{cm}$ ; ( $\diamond$ )  $h_1=3\text{cm}$ ; ( $*$ )  $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $+$ )  $h_1=4\text{cm}$ . (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par marche positive. (—) Courbes d'ajustements.

Cependant, l'effet de la hauteur relative amont  $Y_1$  dans le lit majeur se traduit par l'apparition des cinq allures, un ajustement de type linéaire est possible de la forme :  $s/h_1 = a F_1 + b$ .



**Figure II.35 :** Variation du rapport  $s/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  pour le lit majeur du canal composé. (○)  $h_1=2\text{cm}$ ; (Δ)  $h_1=2,5\text{cm}$ ; (◇)  $h_1=3\text{cm}$ ; (\*)  $h_1=3,5\text{cm}$ ; (+)  $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbes d'ajustements.

La figure II.35 montre cinq allures différentes, pour différentes hauteurs amont  $h_1$ . Pour la même hauteur relative du seuil, la valeur de nombre de Froude  $F_1$  augmente avec la diminution de  $h_1$ . Les résultats obtenus de l'ajustement sont récapitulées dans le tableau II.18.

**Tableau II.18** Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant  $s/h_1$  au nombre de Froude  $F_1$ , pour différentes hauteurs  $h_1$  des ouvertures.

$h_1/B$	a	b	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	1,631	- 11,05	$Y = 1,631 s/h_1 - 11,05$	0,994
0,041	1,674	- 9,613	$Y = 1,674 s/h_1 - 9,613$	0,983
0,05	1,578	- 7,54	$Y = 1,578 s/h_1 - 7,54$	0,982
0,058	1,708	- 7,532	$Y = 1,708 s/h_1 - 7,532$	0,999
0,066	1,749	- 6,868	$Y = 1,749 s/h_1 - 6,868$	0,997

Le tableau II.18 montre que les valeurs des paramètres « a » et « b » augmentent progressivement avec l'augmentation de la hauteur relative amont  $y_1$ . L'ajustement statistique des couples de valeurs (a,  $y_1$ ) par la méthode des moindres carrés donne une relation de type linéaire d'équation :  $a=3,245(h_1/B)+1,529$  ;  $R^2 = 0,962$ .

Et l'ajustement des couples des valeurs (b,  $h_1/B$ ) par la méthode des moindres carrés donne une relation aussi de type logarithmique d'équation :  $b=6,044\ln(h_1/B)+9,625$  avec  $R^2 = 0,998$ . Celle-ci est schématisée par la figure II.35.

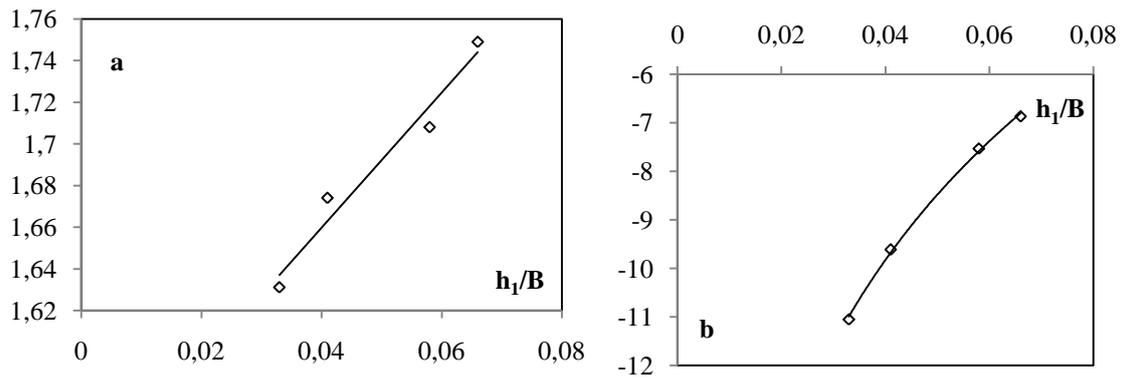


Figure II.36 (a et b): Variation des paramètres 'a' et 'b' en fonction de  $h_1/B$ .

En remplaçant les paramètres (a) et (b) par leurs expressions respectives, on obtient la relation générale suivante :

$$s = (3,245(h_1/B) + 1,529) \cdot F_1 + 6,044 \ln(h_1/B) + 9,625 \quad (\text{II.24})$$

$$4,68 \leq F_1 \leq 11,77 \quad \text{et} \quad 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066$$

Les données ayant servi au traçage des figures II.34 et II.35 sont groupées au tableau II.19.

Tableau II.19. Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $s/h_1 = f(F_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$F_1$	$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$	$F_1$	$s/h_1$
3,868071	0,875	4,6812982	1,35	7,6922807	3,16
4,2931479	1	4,8743265	1,625	7,7300187	4,6666667
4,3264538	1,05	5,0699374	1,975	8,0341292	5
4,6254897	1,1666667	5,2680971	2,375	8,0570948	3,8
4,8362054	1,2	5,4435522	2,675	8,3343795	4,28
5,2100391	1,4	5,4868121	1,8571429	8,5209658	4,72
5,2631123	1,4	5,6209131	2,95	8,7561269	5,28
5,3430575	1,5428571	5,7487549	2,2571429	8,9934123	5,6
5,5736736	1,8571429	5,984987	2,7142857	9,3291451	6
5,8517162	1,8	6,1942755	3,0571429	9,7178289	6,44
5,9552849	1,75	6,3755643	3,3714286	9,7545384	4,75
6,0385748	1,68	6,6199785	3,7714286	10,062239	5,35
6,304856	2,1666667	6,5534807	2,6333333	10,373108	5,9
6,6753928	2,16	6,7691239	3,1666667	10,750289	6,6
6,8052901	2,1	6,9870818	3,5666667	11,004226	7
7,1116095	2,6	7,2073301	3,9333333	11,388819	7,5
7,5794366	2,7	7,5045166	4,4	11,77779	8,05
8,2647654	3,25				
9,0889171	3,95				

La figure II.37 confirme que la relation (II.24) représente un assez bon ajustement pour la détermination de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil, connaissant le nombre de Froude incident  $F_1$ , et la hauteur relative amont  $h_1/B$ .

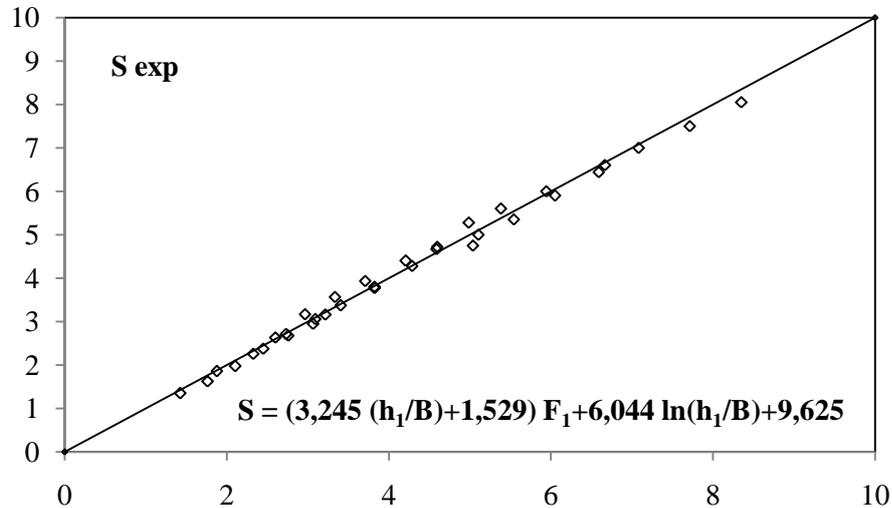


Figure II.37: Variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction de la relation  $f(F_1, h_1/B)$ .  
(o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice.

Encore une fois, nous pouvons déduire une relation empirique reliant la hauteur relative du seuil  $S$  et sa position relative  $\lambda s$  dans chaque section du canal composé. Les résultats sont présentés sur la figure II.38.

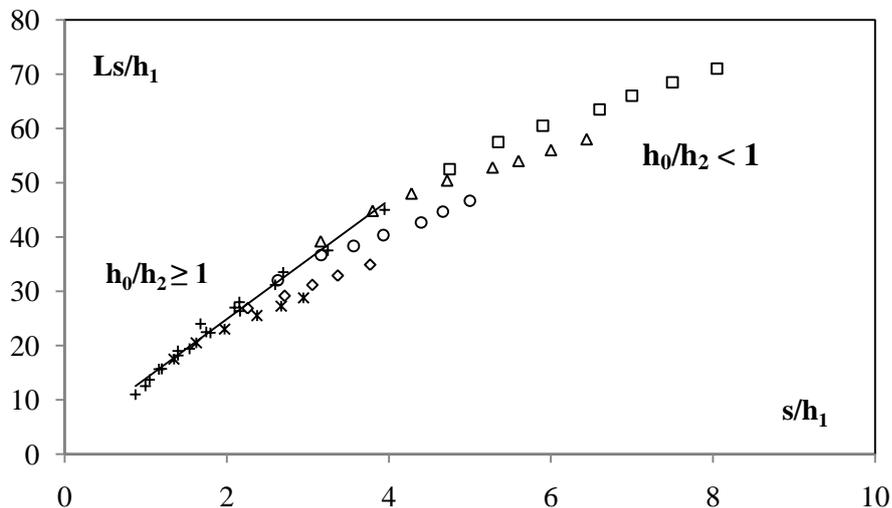
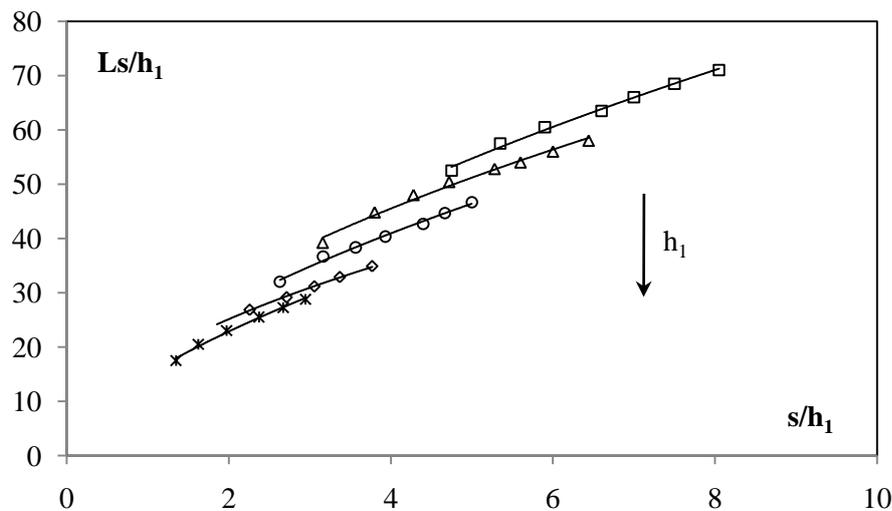


Figure II.38 : Variation de la position relative du seuil  $\lambda s$  en fonction de sa hauteur relative  $s/h_1$ . (+) points de mesures expérimentales en lit mineur; Pour  $h_0/h_2 < 1$ . ( $\square$ )  $h_1=2\text{cm}$ ; ( $\Delta$ )  $h_1=2,5\text{cm}$ ; (o)  $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\diamond$ )  $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $*$ )  $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbe d'ajustement.

La figure II.38 montre que l'ajustement par la méthode des moindres carrés des points de mesure dans le lit mineur est de type linéaire de la forme :

$$Ls/h_1 = 10,96s/h_1 + 2,906 ; R^2 = 0,986 \quad (\text{II.25})$$

Par ailleurs cinq nuages de points distincts, correspondent chacun à une hauteur  $h_1$  fixée. L'analyse des points de mesures expérimentales du ressaut au lit majeur, montre qu'à chaque hauteur  $h_1$ , correspond une courbe de type puissance de la forme  $Ls/h_1 = a s/h_1^b$ . Comme le montre la figure II.39.



**Figure II.39:** Variation de la position relative du seuil  $Ls$  en fonction de sa hauteur relative  $s/h_1$ , Dans le lit majeur. ( $\square$ )  $h_1=2\text{cm}$ ; ( $\Delta$ )  $h_1=2,5\text{cm}$ ; ( $o$ )  $h_1=3\text{cm}$ ; ( $\diamond$ )  $h_1=3,5\text{cm}$ ; ( $*$ )  $h_1=4\text{cm}$ . (—) Courbe d'ajustement.

Le tableau II.20 regroupe les résultats obtenus de l'ajustement et les valeurs des coefficients a et b.

**Tableau II.20.** Coefficients des relations expérimentales, issues de l'ajustement de la relation liant  $Ls$  à la hauteur relative  $S$ , pour différentes hauteurs amont  $h_1$ .

$h_1/B$	a	b	Équations des droites	Coefficients de corrélation $R^2$
0,033	22,40	0,554	$Ls/h_1 = 22,40 (s/h_1)^{0,554}$	0,993
0,041	21,84	0,529	$Ls/h_1 = 21,84 (s/h_1)^{0,529}$	0,987
0,05	18,76	0,562	$Ls/h_1 = 18,76 (s/h_1)^{0,562}$	0,992
0,058	17,59	0,512	$Ls/h_1 = 17,59 (s/h_1)^{0,512}$	0,997
0,066	14,87	0,619	$Ls/h_1 = 14,87 (s/h_1)^{0,619}$	0,992

D'après les résultats du tableau II.13, nous remarquons que les valeurs des paramètres b sont presque égales et leur moyen arithmétique est  $\mathbf{b = 0,5552}$ .

Nous avons observé aussi que les valeurs du coefficient ont diminué progressivement avec l'augmentation de la hauteur relative amont  $y_1$ .

Un ajustement des couples de valeurs  $(a, y_1)$  du tableau II.13, donne avec une bonne corrélation, la relation linéaire suivante :  $a = -232,9(h_1/B) + 30,64$ ,  $R^2 = 0,966$

Cette équation est issue par la figure II.40.

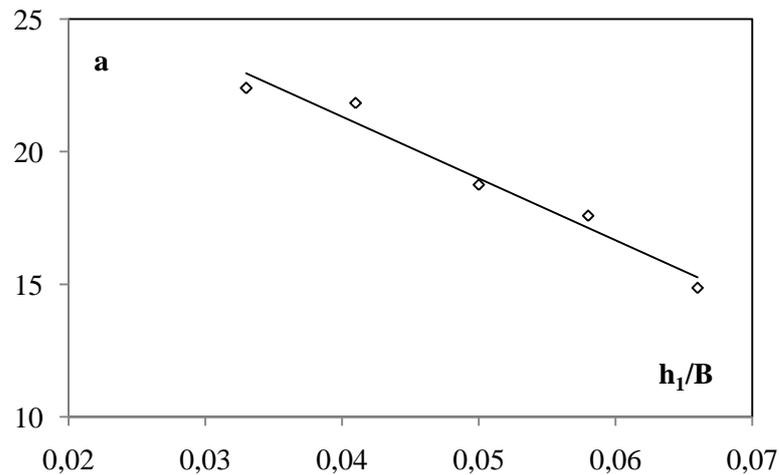


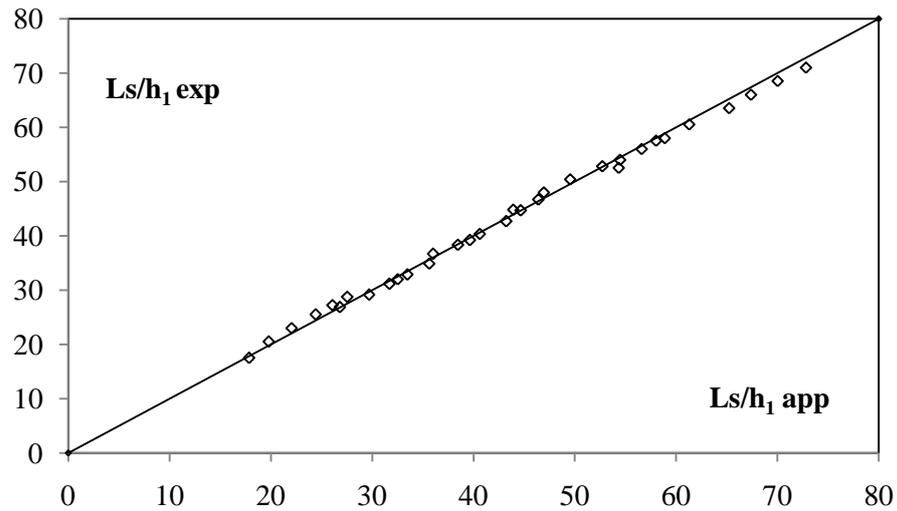
Figure II.40: Variation du paramètre 'a' en fonction de  $h_1/B$ .

La relation définitive représentant la position relative du seuil en fonction de sa hauteur relative et de la hauteur relative amont est la suivante :

$$Ls/h_1 = (-232,9 (h_1/B) + 30,64) (s/h_1)^{0,5552} \quad (\text{II.26})$$

$$4,68 \leq F_1 \leq 11,77 \text{ et } 0,033 \leq h_1/B \leq 0,066$$

La Figure II.41 illustre encore que la relation  $Ls/h_1=f(h_1/B, s/h_1)$  ajuste avec une très bonne corrélation les points de mesures expérimentales et ces derniers suivent également la première bissectrice.



**Figure II.41 :** Variation de la position relative  $Ls/h_1$  du seuil en fonction de la relation  $f(s/h_1, h_1/B)$ .  
 (o) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation :  $Ls/h_1 = f(s/h_1, h_1/B)$ .

Les données qui nous ont permis le traçage des figures II.38 et II.39 sont réunies au tableau II.21.

**Tableau II.21.** Valeurs expérimentales ayant servi au traçage des courbes  $Ls/h_1 = f(s/h_1)$  pour  $h_0/h_2 \geq 1$  et  $h_0/h_2 < 1$ .

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
$Ls/h_1$	$s/h_1$	$Ls/h_1$	$s/h_1$	$Ls/h_1$	$s/h_1$
11	0,875	52,5	4,75	38,333333	3,5666667
12,571429	1	57,5	5,35	40,333333	3,9333333
13,75	1,05	60,5	5,9	42,666667	4,4
15,666667	1,1666667	63,5	6,6	44,666667	4,6666667
15,714286	1,2	66	7	46,666667	5
19	1,4	68,5	7,5	26,857143	2,2571429
18,2	1,4	71	8,05	29,142857	2,7142857
19,428571	1,5428571	39,2	3,16	31,142857	3,0571429
22	1,8571429	44,8	3,8	32,857143	3,3714286
22,333333	1,8	48	4,28	34,857143	3,7714286
22,5	1,75	50,4	4,72	17,5	1,35
24	1,68	52,8	5,28	20,5	1,625
26,333333	2,1666667	54	5,6	23	1,975
28	2,16	56	6	25,5	2,375
27	2,1	58	6,44	27,25	2,675
31,2	2,6	32	2,6333333	28,75	2,95
33,5	2,7	36,666667	3,1666667		
37,5	3,25				
45	3,95				

### II.3.2.4. Rendement du ressaut hydraulique

Le rendement  $\eta$  du ressaut est défini par le rapport de la perte de charge  $\Delta H$  qu'il occasionne à la charge totale dans sa section initiale :

$$\eta = \Delta H / H_1 \quad (\text{II.27})$$

avec :  $\Delta H = H_1 - H_2$

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

$$H_1 = h_1 + \frac{V_1^2}{2g} \quad (\text{II.28})$$

$$H_2 = h_2 + \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{II.29})$$

En appuyant sur l'équation de continuité ( $Q = V.A$ ), ces deux dernières relations s'écrivent ainsi :

$$H_1 = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \quad (\text{II.30})$$

$$H_2 = h_2 + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (\text{II.31})$$

Où :

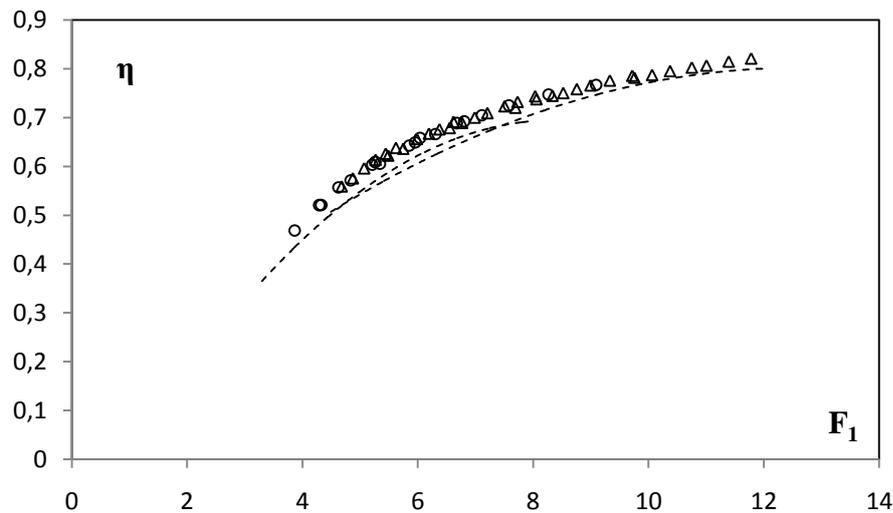
$$A_1 = bh_1 \text{ et } A_2 = b(h_0 - s) + B(h_2 - (h_0 - s))$$

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

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2 h_1^3} \quad (\text{II.32})$$

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

$$\eta = 1 - \frac{Y_A + \frac{F_1^2}{2[Y_A/\beta - (1/\beta - 1)(1/\tau - S)]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (\text{II.33})$$



**Figure II.42:** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

( $\Delta$ ) points de mesures expérimentales en lit majeur; (o) points de mesures expérimentales en lit mineur. (---) Courbes d'ajustements du ressaut contrôlé par marche positive. (—) Courbes d'ajustements

Au vu de cette figure, dans le canal composé les points de mesure du lit mineur et majeur sont quasiment confondus. Par ailleurs, le décalage est important pour le cas du ressaut forcé ; pour le même nombre de Froude, le rendement du ressaut forcé type A est trouvé au dessus de ceux contrôlés par seuil épais.

Le tableau II.22 réunit les valeurs du rendement  $\eta$  pour les nombres de Froude correspondants.

**Tableau II.22:** Mesures expérimentales ayant servi au traçage de la figure II.42.

$h_0/h_2 \geq 1$		$h_0/h_2 < 1$			
N	$F_1$	N	$F_1$	N	$F_1$
0,46868349	3,868071	0,5591632	4,6812982	0,7321465	7,7300187
0,52049033	4,2931479	0,57571479	4,8743265	0,74355221	8,0341292
0,52098375	4,3264538	0,59613449	5,0699374	0,73745565	8,0570948
0,55680804	4,6254897	0,61339033	5,2680971	0,74448828	8,3343795
0,57110373	4,8362054	0,62600977	5,4435522	0,75012805	8,5209658
0,60313824	5,2100391	0,6222436	5,4868121	0,75814775	8,7561269
0,60880166	5,2631123	0,63793282	5,6209131	0,76570123	8,9934123
0,60513114	5,3430575	0,63623363	5,7487549	0,77568802	9,3291451
0,64265287	5,8517162	0,65611964	5,984987	0,78552763	9,7178289
0,6489265	5,9552849	0,66712491	6,1942755	0,7816208	9,7545384
0,65821839	6,0385748	0,67595135	6,3755643	0,78706831	10,062239
0,66609693	6,304856	0,6786239	6,6199785	0,79499553	10,373108
0,6886844	6,6753928	0,69121887	6,5534807	0,8022518	10,750289
0,69244083	6,8052901	0,68904239	6,7691239	0,80633605	11,004226
0,70491152	7,1116095	0,69995308	6,9870818	0,81450136	11,388819
0,72465064	7,5794366	0,70902784	7,2073301	0,82076153	11,77779
0,74727658	8,2647654	0,72309272	7,5045166		
0,76675006	9,0889171	0,72009858	7,6922807		

## II.4. ETUDE COMPARATIVE

Sur la base des résultats obtenus, nous effectuerons une étude comparative entre le ressaut hydraulique contrôlé et le ressaut forcé type A par seuil mince, par seuil épais et par marche positive.

### II.4.1 Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :

Les figures II.43 (a et b) montrent respectivement la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  dans le lit mineur et le lit majeur d'un canal rectangulaire de section composée, pour les six types de ressauts testés.

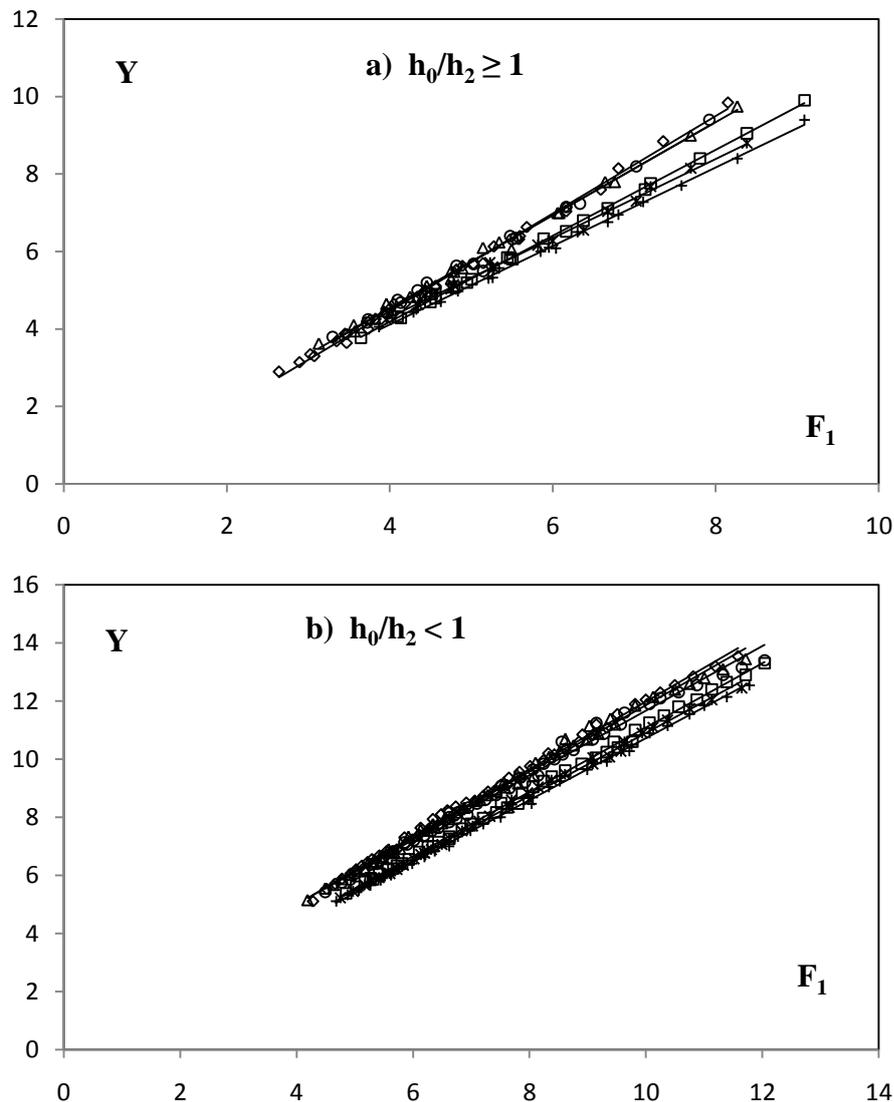


Figure II.43 (a et b): Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
a) en lit mineur, b) en lit majeur.

Ressaut contrôlé : (◇) Par seuil mince. (Δ) Par seuil épais (o) Par marche positive.  
Ressaut forcé de type A : (□) Par seuil mince. (✱) Par seuil épais. (+) Par marche positive.

L'analyse des résultats de la figure II.43, nous a permis de constater que dans le lit mineur les points de mesure des trois types du ressaut contrôlé sont pratiquement trouvés confondus, a part une légère influence de la marche positive apparait à des nombre de Froude supérieur à 6,5 environ, mais elle n'est pas significative. Nous pouvons observer ainsi que le décalage est assez important entre les courbes des ressauts forcés et contrôlés. Pour le même nombre de Froude  $F_1$ , le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut forcé par marche positive est nettement inférieur à celui par seuil épais et par seuil mince respectivement.

Par ailleurs, dans le lit majeur le décalage est perceptible entre le ressaut forcé et son homologue contrôlé pour toute la gamme des nombres de Froude  $F_1$  testé, ainsi un léger décalage qui apparait entre les trois types du ressaut forcé. Ce décalage s'accroît avec l'augmentation de  $F_1$ . En effet le ressaut forcé par marche positive présente la moindre hauteur relative.

un ajustement des valeurs expérimentales a montré que la variation de  $Y=f(F_1)$  est de type lineaire pour les six configurations étudiées, d'équation :

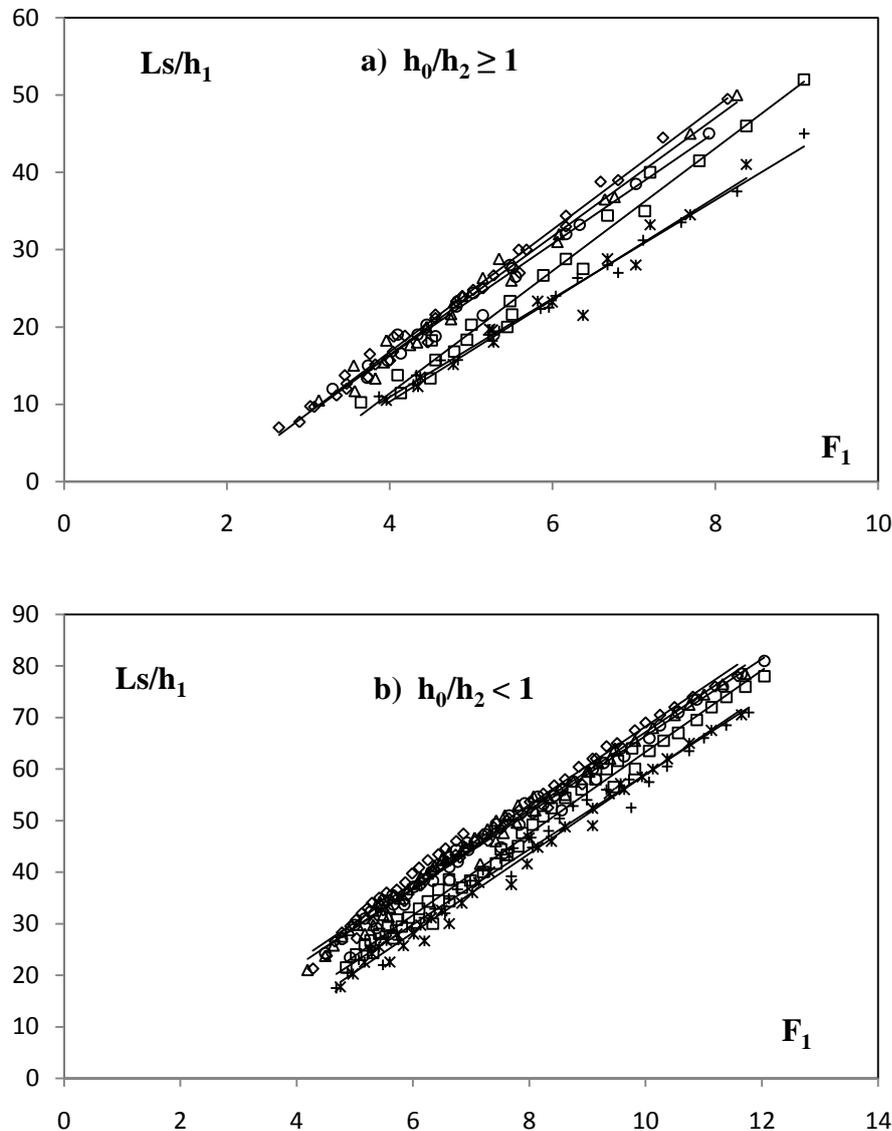
$$Y = a F_1 + b \dots\dots\dots(\text{II.34})$$

**Tableau II.23 :** valeur des constantes *a* et *b* de l'équation (II.34) pour les six type de ressaut.

		Ressaut contrôlé			Ressaut forcé type A		
		Seuil mince	Seuil épais	Marche positive	Seuil mince	Seuil épais	Marche positive
<b>Lit mineur</b>	<b>a</b>	1,258	1,200	1,206	1,11	1,022	1,014
	<b>b</b>	-0,573	-0,255	-0,305	-0,26	0,214	0,057
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,995	0,995	0,991	0,999	0,996	0,998
<b>Lit majeur</b>	<b>a</b>	1,165	1,143	1,113	1,107	1,081	1,064
	<b>b</b>	0,328	0,429	0,54	0,01	0,09	0,073
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,995	0,995	0,993	0,998	0,998	0,998

### II.4.2. position relative du seuil et de la marche positive

Les figures II.44 (a et b) représentent respectivement la variation de la position relative du seuil  $Ls/h_1$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  dans les deux lits du canal rectangulaire de section composée, pour les six types de ressauts testé.



**Figure II.44 (a et b):** Variation de la position relative du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
a) en lit mineur, b) en lit majeur.

Ressaut contrôlé : ( $\diamond$ ) Par seuil mince. ( $\Delta$ ) Par seuil épais (o) Par marche positive.  
Ressaut forcé de type A : ( $\square$ ) Par seuil mince. ( $*$ ) Par seuil épais. (+) Par marche positive.

A partir des résultats présentés sur les figures II.44 (a et b), nous pouvons observer un léger décalage entre les droites d'ajustement des trois types de ressaut contrôlés pour les deux lits du canal composé, il apparaît que l'écart est très perceptible entre les courbes des ressauts contrôlés et des ressauts forcés. En effet, le ressaut forcé par seuil épais et par marche positive

présente un rouleau de surface plus court que son homologue forcé par seuil mince et contrôlés.

En outre, l'ajustement des valeurs expérimentales par la méthode des moindres carrés a abouti à une relation de la même forme pour les six configurations expérimentées de la forme :

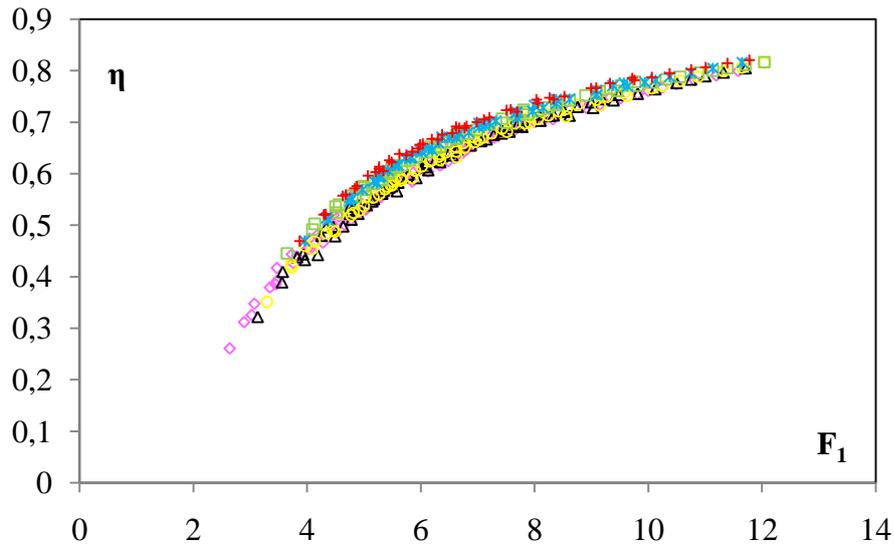
$$\lambda_r = a F_1 + b \quad (\text{II.35})$$

*tableau II.24 : valeur des constantes a et b de l'équation (II.35) pour les six types de ressaut.*

		Ressaut contrôlé			Ressaut forcé type A		
		Seuil mince	Seuil épais	Marche positive	Seuil mince	Seuil épais	Marche positive
<b>Lit mineur</b>	<b>a</b>	7,907	7,655	7,225	7,929	7,655	6,367
	<b>b</b>	-14,85	-14,21	-12,59	-20,34	-14,21	-14,52
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,991	0,986	0,984	0,981	0,986	0,992
<b>Lit majeur</b>	<b>a</b>	7,599	7,574	7,375	7,922	7,574	7,286
	<b>b</b>	-7,788	-8,566	-7,591	-15,90	-8,566	-13,84
	<b>R<sup>2</sup></b>	0,987	0,990	0,986	0,991	0,990	0,984

### II.4.3. Rendement du ressaut hydraulique

La variation du rendement en fonction de nombre de Froude incident  $F_1$  dans les deux lits du canal pour les six configurations est présentée sur la figure II.45.



**Figure II.45:** Variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .  
 Ressaut contrôlé : (◇) Par seuil mince. (Δ) Par seuil épais (o) Par marche positive.  
 Ressaut forcé de type A : (□) Par seuil mince. (\*) Par seuil épais. (+) Par marche positive.

Au vu des résultats que nous avons obtenus, il semble clairement que pour la gamme des nombres de Froude incident  $4 < F_1 < 10$ , les points de mesure du ressaut forcé de type A, par marche positive sont trouvés au-dessus de ceux forcé par seuil à paroi épaisse, par seuil mince et contrôlé. Cependant pour des nombres de Froude  $F_1 > 10$ , tous les points de mesures se rejoignent pour former un seul nuage de points,

## II.5. Exemple d'application

On prend les mêmes données de l'exemple I.6.

- $h_1 = 0,4$  m, la hauteur initiale du ressaut.
- la largeur du lit mineur de canal  $b = 3$  m.
- la largeur du lit majeur de canal  $B = 6$  m.
- Le nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident est :

$$F_1 = 6,73$$

### II.5. 1. Ressaut forcé par seuil mince

#### Pour $h_0/h_2 \geq 1$

- Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = 1,11F_1 - 0,26 = 7,21$$

d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut  $h_2 \cong 2,88$  m.

- Position relative du seuil  $L_s/h_1$

$$\frac{L_s}{h_1} = 7,929.F_1 - 20,34 = 40,16$$

d'où  $L_s \cong 16,06$  m.

- Longueur relative du bassin  $L_B/h_1$

$$\frac{L_B}{h_1} = 9,306.F_1 - 17,30 = 45,33$$

d'où :  $L_B = 18,13$  m.

#### Pour $h_0/h_2 < 1$

$$Y = \frac{h_2}{h_1} = 1,107.F_1 + 0,01 = 7,46$$

d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut  $h_2 \cong 2,98$  m.

$$\frac{L_s}{h_1} = 7,922.F_1 - 15,90 = 44,54$$

d'où  $L_s \cong 17,81$  m.

$$\frac{L_B}{h_1} = 9,371.F_1 - 13,01 = 50,05$$

d'où :  $L_B \cong 20,02$  m

### II.5. 1. Ressaut forcé par seuil épais

#### Pour $h_0/h_2 \geq 1$

- Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = 1,022.F_1 + 0,214 = 7,1$$

d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut  $h_2 \cong 2,84$  m.

- Position relative du seuil  $L_s/h_1$

$$\frac{L_s}{h_1} = 7,655.F_1 - 14,21 = 37,31$$

d'où  $L_s \cong 14,92$  m.

#### Pour $h_0/h_2 < 1$

$$Y = 1,081.F_1 + 0,09 = 7,36$$

d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut  $h_2 \cong 2,94$  m.

$$\frac{L_s}{h_1} = 7,574.F_1 - 8,566 = 42,41$$

d'où  $L_s \cong 16,96$  m.

### II.5. 1. Ressaut forcé par marche positive

Pour  $h_0/h_2 \geq 1$

- Rapport des hauteurs conjuguées Y

$$Y = 1,014.F_1 + 0,057 = 6,88$$

d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut  $h_2 \cong 2,75$  m.

- Position relative du seuil  $L_s/h_1$

$$\frac{L_s}{h_1} = 6,367.F_1 - 14,52 = 28,33$$

d'où  $L_s \cong 11,33$  m.

Pour  $h_0/h_2 < 1$

$$Y = 1,064.F_1 + 0,073 = 7,23$$

d'où la profondeur conjuguée à l'aval du ressaut  $h_2 \cong 2,89$  m.

$$\frac{L_s}{h_1} = 7,286.F_1 - 13,84 = 35,2$$

d'où  $L_s \cong 14,1$  m.

### II.6. Conclusion

Au cours de ce deuxième chapitre de notre contribution, nous avons étudié le ressaut hydraulique forcé type A dans un canal rectangulaire de section composée. Ce chapitre comprend quatre volets, le premier volet concernant le ressaut hydraulique forcé par seuil mince, le deuxième est le ressaut forcé par seuil épais, le troisième c'est le ressaut forcé par marche positive et le dernier volet une étude comparative entre les différentes caractéristiques des ressauts étudiés. Nous avons essayé de trouver par voie de l'expérimentation des relations fonctionnelles liant les différentes caractéristiques du ressaut hydraulique.

Commençons par l'analyse statistique de la variation du rapport Y des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident qui a montré que l'ajustement suit une loi de type linéaire, et que la hauteur relative est moindre dans le lit mineur, et ceci pour les trois ressauts étudiés. La comparaison montre que le rapport des hauteurs conjuguées Y du ressaut forcé est nettement inférieur à celui du ressaut contrôlé. Ainsi l'influence de la marche positive est perceptible pour les deux lits du canal composé, et ceci pour toute la gamme des nombres de Froude étudiés. L'augmentation de  $F_1$  accroît cette influence.

Passant ensuite à la position relative du seuil qui correspond à la longueur relative  $\lambda_r$  du rouleau de surface. L'expérimentation montre que ce dernier augmente progressivement avec l'augmentation du nombre de Froude  $F_1$ . La longueur relative  $\lambda_r$  est plus compacte au lit mineur qu'au lit majeur pour les trois ressauts analysés, l'ajustement des points expérimentaux par la méthode des moindres carrés est de type linéaire. La comparaison montre que les courbes des ressauts forcés par seuil épais et par marche positive sont quasi-

confondues pour, pratiquement, toute la gamme des nombres de Froude. Ceci indique que le ressaut forcé de type A par seuil épais et par marche positive présente une longueur du bassin amortisseur la plus courte.

Nous avons, par la suite, consacré notre étude expérimentale à la variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , pour les trois configurations étudiées. Dans le lit mineur, l'étude statistique des valeurs expérimentales a montré que la meilleure loi qui suit la variation de la hauteur relative  $S$  du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , est une loi de type logarithmique. Par contre, l'influence de la hauteur amont  $h_1$  est perceptible dans le lit majeur de la section composée, et cela pour les trois types de ressauts analysés. D'une façon générale, le ressaut forcé type A nécessite une hauteur relative de seuil moins élevée que son homologue contrôlé.

Enfin, nous avons étudié, la variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, et ceci pour les trois types de ressaut hydraulique, à savoir : le ressaut forcé type A par seuil mince, par seuil épais et le ressaut forcé type A par marche positive. L'étude a montré que les points de mesure expérimentales du ressaut forcé type A, se présente au dessus de ceux contrôlés, pour les deux lits du canal composé. L'étude comparative entre les points de mesure expérimentale a montré que le ressaut forcé par marche positive se présente, pour la gamme pratique des nombres de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, au dessus de ceux forcés par seuil mince et par seuil épais. On peut dire que l'effet de dissipation de l'énergie est très important pour le ressaut forcé par marche positive.

## CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Cette deuxième et dernière partie de notre étude a été consacrée à notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé et forcé de type A, dans un canal de section droite rectangulaire composée, par voie expérimentale.

Cette partie a été divisée en deux chapitres. Le premier chapitre c'est intéressé à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé, tandis que le dernier chapitre a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique forcé de type A. Il a été termine par une comparaison avec le ressaut contrôlé.

- Le premier chapitre c'est focalisé l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive dans un canal de section droite rectangulaire composée.

Nous avons abordé dans ce chapitre en premier lieu, la description du modèle et des essais. Nous avons entamé par la suite la procédure à suivre lors des expérimentations.

En effet, le ressaut est généré sous cinq hauteurs initiales  $h_1$ . Chaque hauteur initiale  $h_1$  fixé produit une série de mesures. Une large game des hauteurs des seuils et de la marche positive qui ont été testés, correspond à une large gamme de nombres de Froude.

L'étude a montré que la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de *Froude*  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire pour les deux lits du canal. Ainsi les points de mesure au lit mineur sont au dessous de celui au lit majeur. Cela est valable pour les trois types de ressaut étudié. Par ailleurs, une étude comparative a montré que dans le lit mineur les courbes d'ajustement sont confondues, tandit que dans le lit majeur les courbes des ressauts contrôlés par seuil mince et par seuil epais sont quasi-confondues pour pratiquement toute la gamme des nombres de *Froude*. Cependant un léger décalage est remarquable pour le ressaut controlé par marche positive à partir des valeurs du nombre de *Froude*  $F_1$  supérieurs à 7 environ. Cette influence s'accroît avec l'augmentation de  $F_1$ .

En deuxième lieu, l'étude a entamé la variation de la longueur relative  $X = x/h_1$  du bassin en fonction du nombre de *Froude*  $F_1$  de l'écoulement incident. Un décalage assez important est perceptible entre les courbes des ressauts dans le lit mineur et leur homologue dans le lit majeur. En effet, l'étude a montré que la longueur du bassin dans le lit mineur est plut compacte que celui dans le lit majeur. L'analyse des resultats experimentaux a permis d'aboutir à une relation unique de type lineaire pour chaque lit du canal et cela pour les trois

types des ressauts analysés. L'étude comparative montrée que les trois courbes sont presque confondues.

En troisième lieu, l'étude a abordé la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour les trois types de ressaut étudiés, l'ajustement des points de mesure par la méthode des moindres carrés dans le lit mineur présente une seule équation de type linéaire, tandis que dans le lit majeur l'influence de la hauteur amont est perceptible.

L'étude expérimentale s'est intéressée ensuite à la dissipation de l'énergie cinétique. Celle-ci étant représentée par la variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour les trois types de ressaut hydraulique. L'analyse a montré que les points de mesure au lit majeur présentent la continuité des points de mesure au lit mineur. Ainsi les trois courbes du rendement sont pratiquement confondues.

L'étude a abordé enfin le profil de la surface généralisée libre du ressaut. En effet, pour trois types de ressaut et dans les deux lits du canal la variation du rapport adimensionnel vertical  $y$  en fonction du rapport adimensionnel horizontal  $X$  montre que les points de mesure sont confondus.

- Le deuxième et dernier chapitre de cette partie a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique forcé type A par seuil mince, par seuil épais et par marche positive dans un canal de section droite rectangulaire composé.

Dans un premier temps nous sommes intéressés à la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, dans les deux lits du canal pour les trois types de ressaut forcé étudiés. En effet, pour les trois types de ressaut forcé étudiés, l'augmentation du rapport  $Y$  engendre l'augmentation du nombre de Froude, un décalage est perceptible entre le lit mineur et le lit majeur, ainsi un décalage important est perceptible entre le ressaut forcé type A et le ressaut contrôlé. En outre, l'ajustement statistique des points de mesures, a permis d'aboutir, avec une assez bonne corrélation, à une équation linéaire liant  $Y$  et  $F_1$ .

Par ailleurs, une étude comparative avec le ressaut contrôlé a montré l'influence de la marche positive sur le rapport des hauteurs conjuguées, Cette influence s'accroît avec l'augmentation de  $F_1$ .

Dans un second temps, nous avons abordé la variation de la longueur relative du bassin en fonction du nombre de Froude incident. Il a été obtenu que la longueur relative du bassin augmente avec l'augmentation du nombre de Froude. Ainsi le lit mineur présente un bassin

plus court, aussi le ressaut forcé est au dessous de celui contrôlé. En outre, l'ajustement statistique des points de mesures, a permis d'aboutir, avec une assez bonne corrélation, à une équation linéaire liant  $Y$ ,  $F_1$ , pour les deux lits du canal et pour les trois ressauts analysés. La comparaison avec le ressaut contrôlé montre que les courbes de ressaut forcé de type A par seuil épais et par marche positive sont confondues, et présentent le bassin le plus court dans les deux lits du canal composé.

Dans un autre temps, une analyse de la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de *Froude*  $F_1$  de l'écoulement incident, dans les deux lits du canal, pour les trois configurations de ressaut a été effectuée. En effet, il ressort que le rapport de la hauteur relative du seuil augmente avec l'augmentation du nombre de *Froude*. En outre, l'ajustement statistique des points de mesures dans le lit mineur, a permis d'aboutir, avec une bonne corrélation, à une équation de type linéaire liant  $s/h_1$  et  $F_1$ . Tandis que dans le lit majeur l'influence de la hauteur amont est perceptible. Il ressort que le ressaut contrôlé nécessite une hauteur de seuil plus élevé.

Finalement, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation de l'énergie cinétique. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de *Froude* incident indique que pour une gamme pratique des nombres de *Froude* incident, les points de mesure du ressaut forcé type A par marche positive se présentent au-dessus de ceux forcé par seuil épais et par seuil mince et ceux contrôlé. L'effet de dissipation de la charge hydraulique est plus important pour le ressaut forcé par marche positive.

# Conclusion Générale

## CONCLUSION GÉNÉRALE

Notre thèse de doctorat porte sur le ressaut hydraulique contrôlé et forcé type A dans un canal rectangulaire de section composée. Cette thèse comporte deux parties fondamentales: une première partie bibliographique et une seconde partie expérimentale ayant concerné notre propre contribution.

La première partie a été divisée en trois chapitres :

- Le premier chapitre de cette partie bibliographique a eu pour but de présenter les principaux travaux entrepris sur le ressaut hydraulique classique et contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive évoluant dans un canal de section droite rectangulaire.

- Le deuxième chapitre, a permis d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique forcé type A dans un canal de section droite rectangulaire.

- Dans le troisième et dernier chapitre, nous avons abordé les travaux de *Khattaoui et Achour (2012)* dans un canal rectangulaire composé droit.

Le premier chapitre est consacré au ressaut hydraulique classique et contrôlé en canal rectangulaire. Dans le premier volet, nous avons donné, un aperçu général sur la classification du ressaut classique proposé par *Bradley et Peterka (1957)* et ceux de *Hager et Al (1990)* relatifs aux caractéristiques du ressaut classique, en se basant sur l'équation de la quantité de mouvement. L'étude conduit à l'équation de *Belanger (1928)* qui exprime le rapport des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. L'étude confirme que la détermination des longueurs caractéristiques du ressaut, ( $L_j$  et  $L_r$ ) n'est possible que par la voie de l'expérimentation. Ainsi la longueur de rouleau peut être développé et/ou non développé. Le rendement de ressaut classique est exposé, en comparant la formule trouvée avec celle de *Hager et Sinniger (1989)*. Par la suite, *Hager et Al (1992)* sont réussis à développer une formule permettant de présenter le profil de surface.

Le deuxième volet de ce premier chapitre de notre étude bibliographique, a été consacré aux principaux travaux entrepris dans le domaine de ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince dans un canal de section rectangulaire. Nous avons abordé dans ce volet, les travaux de *Forster et Skrinde (1950)*. L'étude montre que, la hauteur relative du seuil n'est fonction que du nombre de Froude  $F_1$  et de la position relative  $x/h_2$ . Pour des valeurs constantes de  $x/h_2$ , *Forster et Skrinde (1950)* ont établi des courbes expérimentales montrant la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  en fonction de  $F_1$ . Trois courbes expérimentales ont été obtenues

correspondant chacune à une valeur de la position relative  $x/h_1$  du seuil ( $x/h_1 = 3, 5$  et  $10$ ). Dans un second temps, on a examiné l'étude *Achour et Al (2002)*, dans le but de compléter les travaux de *Forster et Skrinde (1950)*, Deux configurations du ressaut sont considérées. La première configuration répond aux conditions expérimentales de *Forster et Skrinde (1950)* ( $x = Lr$ ). Les auteurs sont arrivés à proposer des relations empiriques permettant le calcul de la hauteur relative  $S$  du seuil en fonction de la position relative  $x/h_2$  de celui-ci et du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident. La deuxième configuration correspond à un ressaut contrôlé dont la longueur  $L_j$  coïncide avec la position  $x$  du seuil. L'analyse des mesures expérimentales a permis aux auteurs de corrélérer de manière plus significative la position relative  $x/h_1$  du seuil au nombre de Froude incident  $F_1$ .

Le troisième volet est dédié au ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi épaisse dans un canal rectangulaire, nous avons examiné les travaux de *Forster et Skrinde (1950)* et ceux de *Achour (2002)*. L'étude de *Forster et Skrinde (1950)* a montré que l'application de l'équation de quantité de mouvement est possible. Une relation analytique implicite a été proposée, qui lie la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil au nombre de Froude  $F_1$  ; Contrairement au cas du seuil mince, une seule courbe est alors obtenue.

*Achour (2002)* propose une relation explicite au calcul de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil épais en fonction du nombre de Froude  $F_1$ , les valeurs calculées par application de cette relation sont supérieures à celles données par *Forster et Skrinde*; l'écart observé peut atteindre les 10%.

Deux configurations ont été examinées; l'écoulement torrentiel à l'amont du ressaut est créé d'abord par la mise en place d'une vanne de fond et enfin par un déversoir standard.

Concernant la configuration avec la vanne de fond, le développement théorique a mené à l'établissement d'une relation explicite permettant d'évaluer la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil en fonction du nombre de Froude  $F_1$ .

Pour le cas du ressaut précédé d'un déversoir standard, l'étude théorique a montré que le nombre de Froude  $F_1$  est lié implicitement au paramètre adimensionnel  $S=1- s_2/s_1$  dans lequel  $s_2$  représente la hauteur géométrique du seuil épais et  $s_1$  celle du déversoir standard.

Le dernier volet de ce chapitre a trait à l'approche de *Forster et Skrinde (1950)* et concerne le ressaut hydraulique contrôlé par marche positive. Ils ont élaboré un diagramme qui exprime la variation du nombre de Froude  $F_1$ , en fonction du rapport  $h_3/h_1$ , pour différentes valeurs des hauteurs relatives  $s/h_1$  de la marche positive.

Le second chapitre de cette partie bibliographique, a concerné le ressaut hydraulique forcé type A en canal rectangulaire, le premier volet a trait au ressaut hydraulique forcé par

seuil mince. Nous avons présenté en premier lieu les différents types du ressaut forcé proposé par *Rand (1957)*. En se basant sur cette étude, *Bretz (1988)* a classifié le ressaut forcé par seuil en trois types. Il s'agit des ressauts type A, type B et type B-min. Le premier correspond pratiquement au ressaut classique, les deux autres sont obtenus par diminution de la hauteur d'eau aval.

Des courbes, représentant le rapport des hauteurs conjuguées  $Y_F$  en fonction de nombre de Froude pour les trois types de ressaut, sont tracées et indiquent que le type A fournit les rapports  $Y_F$  les plus élevés, le type B-min les moins élevés et le type B des valeurs intermédiaires.

L'étude a montré que le rapport  $Y_F$  des hauteurs conjuguées dépend du nombre de Froude  $F_1$  et de la hauteur relative  $S$  du seuil.

Les longueurs relatives du bassin et de la position relative du seuil par rapport au pied du ressaut, varient linéairement en fonction du nombre de Froude, pour les trois types de ressaut forcé. Les longueurs sont maximales pour le type A, minimales pour le type B-min et intermédiaire pour le type B.

Par la suite, les travaux de *Hager et Li (1992)* montrent que la réduction  $\Delta Y_S = Y^* - Y$  du niveau aval due à la présence du seuil peut s'exprimer en fonction de la hauteur relative  $S = s/h_1$  et de la position relative  $\Lambda = L_s/L_r^*$  du seuil. Ils définissent la longueur du bassin comme égale au moins à la distance qui sépare le début du ressaut de la fin du rouleau de fond. La longueur relative  $\Lambda_B = L_B/L_r^*$  peut également s'exprimer en fonction de  $S$  et de  $\Lambda$ .

Les auteurs présentent le ressaut forcé par seuil, comparé au ressaut classique, comme plus avantageux par une hauteur aval moindre, un bassin plus court et une efficacité plus grande.

Le dernier volet de ce deuxième chapitre s'est intéressé aux principaux travaux entrepris dans le domaine de ressaut hydraulique forcé par marche positive dans un canal de section rectangulaire. Nous avons mis l'accent sur les travaux de *Forster et Skrinde (1950)* et ceux de *Hager et Sinniger (1986)*. Dans un premier lieu, L'étude a montré que, le rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  varie en fonction du nombre de Froude  $F_1$  et de la hauteur relative de la marche positive  $S = s/h_1$ .

Dans un second temps, l'étude montre à travers les travaux de *Hager et Bretz (1987)* que la stabilité des ressauts hydrauliques dans des bassins amortisseurs à marche positive est donc indépendante du nombre de Froude  $F_1$ . L'étude montre que l'efficacité relative minimale est donnée par le ressaut hydraulique forcé de type A. La plus grande est obtenue pour le ressaut hydraulique forcé type B. L'étude expérimentale, a permis aux auteurs de conclure enfin que la marche positive offre une meilleure compacité, et la zone de dissipation est plus courte.

Le dernier chapitre de la partie bibliographique a mis l'accent en un premier lieu sur l'approche théorique de *Khattaoui et Achour (2012)* qui ont montré que l'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé droit a abouti à une équation fonctionnelle de forme  $\phi(Fr1, Y, \beta, \tau) = 0$ .

En s'inspirant du développement théorique mené par *Achour (2000)* sur le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, les auteurs ont proposée une nouvelle approche en rajoutant une force de résistance liée à la forme composée du canal. Après l'injection de cette force dans leur développements théoriques, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées  $Y$  et de  $\eta$  se sont révélées interdépendantes en augmentant ou en diminuant et se sont certainement rapprochées de la réalité.

En second lieu, l'étude trait les travaux de *benabdesselam et Al (2017 et 2020)*. Qui ont développé une approche théorique avec et sans considération de la force volumique  $F_x$ , assimilée par analogie à l'expression de Borda-Carnot. Des expériences ont été menées avec trois valeurs différentes du rapport  $\tau_y$ . La validité expérimentale des relations théoriques élaborées avec et sans la force  $F_x$ . La validation expérimentale de la perte d'énergie relative est élaborée et ne dépasse pas 4,83% comme erreur maximale. L'étude révèle également l'utilité du canal composé en termes de capacité de dissipation d'énergie lorsqu'il est comparé au canal rectangulaire de référence.

La deuxième partie de notre travail a concerné notre propre contribution à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé et le ressaut forcé de type A, par seuil mince, par seuil épais et par marche positive dans un canal de section droite rectangulaire de section composée. Cette partie a été divisée en deux chapitres :

- Le premier chapitre de cette présente partie, a été consacré au ressaut hydraulique contrôlé, par seuil mince, par seuil épais et par marche positive.
- Le deuxième chapitre a concerné le ressaut hydraulique forcé type A, par seuil mince, par seuil épais et par marche positive.

Le premier chapitre de cette deuxième partie a concerné l'étude expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé par seuil mince, par seuil épais et par marche positive dans un canal de section droite rectangulaire composé.

Nous avons abordé dans ce chapitre en premier lieu, la description du modèle et des essais. Nous avons entamé par la suite la procédure suivie lors des expérimentations.

En effet, le ressaut est généré sous cinq hauteurs initiales  $h_1$ , chaque hauteur initiale  $h_1$  fixe produit une série de mesures. Une large gamme des hauteurs des seuils et de la marche positive testée, correspond à une large gamme de nombres de Froude.

L'étude a montrée que la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident suit une loi de type linéaire pour les deux lits du canal, ainsi les points de mesure au lit mineur sont au dessous de celui au lit majeur. Cela pour les trois types de ressaut étudié. Par ailleurs, une étude comparative à montré que dans le lit mineur les courbes d'ajustement sont confondues, tandis que dans le lit majeur les courbes des ressauts contrôlés par seuil mince et par seuil épais sont quasi-confondues pour pratiquement toute la gamme des nombres de Froude. Cependant un léger décalage est remarquable pour le ressaut contrôlé par marche positive à partir des valeurs du nombre de Froude  $F_1$  supérieures à 7,0 environ. Cette influence s'accroît avec l'augmentation de  $F_1$ .

En deuxième lieu, l'étude a entamé la variation de la longueur relative  $X = x/h_1$  du bassin en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, Un décalage assez important est visible entre les courbes des ressauts dans le lit mineur et leur homologue dans le lit majeur. En effet, l'étude a montré que la longueur du bassin dans le lit mineur est plus compacte que celle dans le lit majeur. L'analyse des résultats expérimentaux a permis d'aboutir à une relation unique de type linéaire pour chaque lit du canal et cela pour les trois types de ressaut analysés, l'étude comparative a montré que les trois courbes sont presque confondues.

En troisième lieu, l'étude a abordé la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, pour les trois types de ressaut étudiés. L'ajustement des points de mesure par la méthode des moindres carrés dans le lit mineur présente une seule équation de type linéaire, tandis que dans le lit majeur l'influence de la hauteur amont est perceptible.

L'étude expérimentale s'est intéressée ensuite à la dissipation de l'énergie cinétique. Celle-ci étant représentée par la variation du rendement  $\eta$  en fonction du nombre de Froude de l'écoulement incident, pour les trois types de ressaut hydraulique. L'analyse a montré que les points de mesure au lit majeur présentent la continuité des points de mesure au lit mineur. Ainsi les trois courbes de rendement sont pratiquement confondues.

L'étude a abordé enfin le profil de la surface généralisé libre du ressaut. En effet, pour trois types de ressaut et dans les deux lits du canal, la variation du rapport adimensionnel

vertical  $y$  en fonction du rapport adimensionnel horizontal  $X$  montre que les points de mesure sont confondus.

Le deuxième et dernier chapitre de cette partie a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique forcé type A par seuil mince, par seuil épais et par marche positive dans un canal de section droite rectangulaire composé.

Dans un premier temps nous sommes intéressés à la variation du rapport  $Y$  des hauteurs conjuguées en fonction de nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, dans les deux lits du canal pour les trois types de ressaut forcé étudié. En effet, l'augmentation du rapport  $Y$  engendre l'augmentation de nombre de Froude. Un décalage est perceptible entre le lit mineur et le lit majeur. Ainsi un décalage important est perceptible entre le ressaut forcé type A et le ressaut contrôlé. En outre, l'ajustement statistique des points de mesures, a permis d'aboutir, avec une assez bonne corrélation, à une équation linéaire liant  $Y$  et  $F_1$ .

Par ailleurs, une étude comparative avec le ressaut contrôlé a montré l'influence de la marche positive sur le rapport des hauteurs conjuguées. Cette influence s'accroît avec l'augmentation de  $F_1$ .

Dans un second temps, nous avons abordé la variation de la longueur relative du bassin en fonction du nombre de Froude incident. Il a été obtenu que la longueur relative du bassin augmente avec l'augmentation du nombre de Froude. Ainsi le lit mineur présente un bassin plus court. Aussi le ressaut forcé est au dessous de celui contrôlé. En outre, l'ajustement statistique des points de mesures, a permis d'aboutir, avec une assez bonne corrélation, à une équation linéaire liant  $Y$ ,  $F_1$ , pour les deux lits du canal et pour les trois ressauts analysés. La comparaison avec le ressaut contrôlé montre que les courbes de ressaut forcé type A par seuil épais et par marche positive sont confondues, et présentent le bassin le plus court dans les deux lits du canal composé.

Dans un autre temps, une analyse de la variation de la hauteur relative  $s/h_1$  du seuil et de la marche positive en fonction du nombre de Froude  $F_1$  de l'écoulement incident, dans les deux lits du canal, pour les trois configurations de ressaut a été effectuée. En effet, il ressort que le rapport de la hauteur relative du seuil augmente avec l'augmentation du nombre de Froude. En outre, l'ajustement statistique des points de mesures dans le lit mineur, a permis d'aboutir, avec une bonne corrélation, à une équation de type linéaire liant  $s/h_1$  et  $F_1$ . Tandis que dans le lit majeur l'influence de la hauteur amont est perceptible. Il ressort que le ressaut contrôlé nécessite une hauteur de seuil plus élevé.

Finalement, l'étude expérimentale s'est intéressée à la dissipation de l'énergie cinétique. En effet, la variation du rendement du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude incident indique que pour une gamme pratique des nombres de Froude incidents, les points de mesure du ressaut forcé type A par marche positive se présentent au-dessus de ceux forcés par seuil épais et par seuil mince et ceux contrôlés. L'effet de dissipation de la charge hydraulique est plus grand pour le ressaut forcé type A par rapport aux autres configurations du ressaut étudié.

## **REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES**

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Achour, B., (1997). Dissipateurs d'énergie par ressaut, Thèse de Doctorat d'état, Institut de Génie Civil, Université de Tizi-ouzou.
- Achour, B., (2000). Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie, JHR, 38(4), 307-311.
- Achour, B., Debabeche, M., (2003). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil en canal triangulaire. Journal of Hydraulic Research 41(3), 319-325.
- Andersen, J. V. M., (1978). Undular hydraulic jump, Proc, ASCE, j, Hydraulics Division, Vol. 104, pp. 1185-1188.
- 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.
- Benabdesselam, A., Achour, B. and HOUICHI, L. (2017). Hydraulic jumps in a straight rectangular compound channel: theoretical approach and experimental study. Larhyss Journal, 29 (2017), 323-340.
- Benabdesselam, A., (2020). Approches théoriques et expérimentales du ressaut hydraulique dans un profil de canal composé. Thèses de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra.
- Benmalek, A., (2018). Étude de la compacité du ressaut hydraulique dans quelques profils de canaux à ciel ouvert. Thèses de doctorat, Université Mohamed Khider Biskra.
- 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.
- Bousmar, D., (2002). Flow modelling in compound channels / Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains, Ph-D thesis, Université catholique de Louvain, Faculté des Sciences Appliquées.
- Bousmar, D., Rivière, N., Proust, S., Paquier, A., Morel, R., and Zech, Y., (2005). Upstream discharge distribution in compound-channel flumes, J.H.Eng, ASCE, 131(5), 408-412.

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.

Bretz, N., V., (1988). Ressaut Hydraulique Forcé par seuil, Laboratoire de constructions Hydrauliques, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, Département de Génie Civil, Communication No. 2.

Carlier, M., (1980). Hydraulique Générale et Appliquée 1er édition.

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., (2005). Effet du seuil sur le ressaut hydraulique en canal profilé en U. Colloque International sur l'Eau dans le bassin méditerranéen 'Watmed2' – Marrakech – Maroc.

Debabeche, M., Lakehal, M., Mansri, N. and Achour B., (2006). Ressaut hydraulique forcé par marche positive. The third international conference on the 'Water Resources in the Mediterranean Basin', Watmed 3 – Tripoli – Lebanon.

Debabache, 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.

Doeringsfeld, H.A., Barker, C.L. (1941). Pressure-momentum theory applied to the broad-crested weir, Transactions, ASCE, Vol. 106, pp. 934-946.

Forster ,J. W. and Skrinde, R. A., (1950). Control of Hydraulic jump by sills, Trans. ASCE, 115,973-1022.

- Hachemi, R, L., (2006). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale, Mémoire de magistère en sciences hydrauliques, Département d'Hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Hager, W.H., Sinniger, R., (1985). Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 23, pp.101- 113.
- Hager, W.H., Sinniger, R., (1986). 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.
- Hager, W., H., (1987). Der Ablufss im U-Profil. *Korrespondenz Abwasser* 34(5) : 468-482.
- Hager, W.H., Bretz N.V., (1987). Hydraulic Jump at Positive and Negative Step; *J. Hydraulic Research* 24(4),237-253.
- Hager, W.H., Bremen, R., (1989). Classical Hydraulic Jump : Sequent depths, *J.H.R.*, 27(5), 565-585.
- Hager, W.H., Sinniger, R., (1989). *Construction hydraulique, Ecoulement stationnaire*, Edition suisse romande.
- Hager, W.H., Hydraulic jump in U-shaped channel, *Journal of Hydraulic Engineering*, 115 (5): 667–675, 1989.
- 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., LI, D., (1992). Sill-controlled energy dissipater, *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 30, pp.165-181.
- Kateb, S., M. Debabeche, A. Benmalek (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.
- Kateb, S., (2014). Etude théorique et expérimentale de quelques types de ressauts hydrauliques dans un canal trapézoïdal. Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider Biskra.

- Khattaoui, M., (2007). Contribution à l'étude des écoulements brusquement variés à faible nombre de Froude, thèse de doctorat, université Med Khider de Biskra, décembre, 2007, Algérie.
- Khattaoui, M., Achour, B., (2012). Ressaut hydraulique en lit composé droit, J.H.Eng, LJEE N°20. Juin 2012.
- Knight D.W., Demetriou J.D., (1983), Flood plain and main channel interaction, J. Hydraulic. Eng.
- Knigh,t D.W., Shiono, K., (1990). Turbulence measurements in shear layer region of a compound channel, J.Hydraul.
- 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).
- Lane, E.W., Kindsvater, C.E., Hydraulic jump in enclosed conduits, Engineering News-Records: 121 (26), 1938.
- Lapray, G., (1967). Hauteurs conjuguées du ressaut, Communication No. 19, Ecole Nationale Polytechnique d'Alger.
- Mansri, N., Debabeche, M., Lakehal, M., (2008). Ressaut hydraulique contrôlé par marche positive dans un canal triangulaire. Séminaire national d'hydraulique, Université de Chlef.
- Mc Corcodal, (1994), Journal of Hydraulic Research, VOL. 32, 1994, NO.1; 119-130.
- Moore, W. L., (1943), Energy loss at the base of a free overfall. Trans. ASCE 108, 1343-1392.
- Muto, Y., Shiono, K., Imamoto, H., Ishigati, T., (1998). Three-dimensional structure flow in meandering channels for overbank flow, J. Hydroscience and Hydr. Engrg.
- Myers W.R.C (1978). Momentum transfer in compound channel, International association for hydraulic research.
- Naot, D., Nezu, I., and Nakagawa, H., (1993). Calculation of Compound-Open-Channel Flow, J.H.E., Asce, 119(12), 1418-1426
- Negm et Abdel-Azim M. (2000). Semi-theoretical Approach for Detection of Cavitation at Steps in Sloping Stilling Basins Under Hydraulic Jump Conditions”, Faculty of Engineering, Zagazig University, Egypt.

- 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.
- Ohtsu. I., (1976). Free hydraulic jump and submerged hydraulic jump in trapezoidal and rectangular channels. Trans. JSCE 8, 122-125.
- Peterka, A.J. (1983). Hydraulic design of stilling basins and energy dissipator, US Department of the Interior, Bureau of Reclamation, Engineering Monograph, No. 25, Denver, Col.
- Proust, S., (2005). Ecoulements non-uniformes en lit composé : effets de variations de largeur du lit majeur, Thèse de doctorat de l'INSA de Lyon, spécialité : mécanique des fluides, INSA de Lyon, Lyon.
- Rajaratnam, N., (1964). Discussion, Proc. ASCE, J.H.D., 90(4), 341-350.
- Rajaratnam, N., (1964). Discussion to Silvester (1964), Journal of Hydraulic Division, ASCE 90(HY4), 341-350.
- Rajaratnam, N., (1964). The forced Hydraulic jump, Water Power 16 (jan):14-19, 16 (feb) : 61-65.
- Rajaratnam, N., (1965). Hydraulic Jump in horizontal conduit, Water Power, 17, pp. 80-83.
- Rajaratnam, N., (1967). Hydraulic jumps, Advances in Hydrosience, 4 : 197-280, ed. V.T. Chow, Academic Press, New York.
- Rajaratnam, N., (1964). Discussion of [2], J. Hyd. Div., ASCE, 90 (4): 341–350.
- Rajaratnam, N., (1965). Hydraulic jump in horizontal conduits, Water Power, 17: 80–83.
- Rajaratnam, N., Subramania, K., (1967). Flow equation for the sluice gate, Proc. ASCE, J. Irrigation and Drainage Division, 93, IR3, 167-186.
- Rajaratnam, N., Subramania, K., (1968, 1969, 1970). Profile 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., Murahari, V., (1971). A contribution to forced hydraulic jumps, J. Hydraulic Research, vol. 9, 217-239.

- Rand, W., (1957). An approach to generalized design of stilling basins, Trans. New York Academy of Sciences, Vol. 20 (2), 173-191. 7
- Rand, W., (1965). Flow over vertical sill in an open channel. proc. ASCE, J. Hydraulic Division 91, Hy4 97-121.
- Rao N.S.G., Muralidhar D. (1963). Discharge characteristics of weirs of limit crest width, La Houille Blanche, Vol. 18,537-545.
- Riguet, F., étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique évoluant dans un canal trapézoïdal incliné. Mémoire de magister en hydraulique, Département d'hydraulique, Université de Biskra, Algérie.
- Riguet F, Debabeche M and Ghomri A. Experimental study of the sequent depth ratio of the hydraulic jump in a straight compound rectangular channel. J. Fundam. Appl. Sci., 2020, 12(1S), 56-65.
- 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(7), 793-802.
- Shiono, K., Knight, D. W., (1990). Two dimensional analytical solution for a compound channel, Proc., 3rd Int. Symp on refined flow modeling and turbulence measurements, Tokyo, Japan, 591-599.
- Silvester, R., (1964). Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels, Proc. ASCE, J. Hyd. Div., 90, (HY1): 23-55.
- Tominaga, A., et al. (1989). Three dimensional turbulent structure in straight open channel flows. J.hydraul. Eng
- Tominaga, A., Nezu I., (1991). Turbulent structure in compound open channel flows. J.hydraul. Eng
- Zahiri, A., Dehghani, A. A., (2009). Flow Discharge Determination in Straight Compound Channels Using ANNs. International Journal of Computer, Electrical, Automation, Control and Information Engineering Vol:3, No:10.