



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
جامعة الوادي
كلية التكنولوجيا



مخبر (UDERZA) Unité de développement d'énergie renouvelable dans les zones arides

أطروحة دكتوراه

مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه في الطور الثالث (LMD)
الشعبة: الري
التخصص: ري حضري

Etude du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux et pente positive

إشراف: غمري علي

إعداد الطالب: بسر جمال

نوقشت أمام لجنة المناقشة:

الاسم واللقب	الرتبة	الجامعة	الصفة
عبد القادر وقواق	أستاذ	جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي-	رئيس
هندة خليلي	أستاذ	جامعة محمد خيضر - بسكرة-	مناقش
قيس باوية	أستاذ	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة-	مناقش
سمير كاتب	أستاذ	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة-	مناقش
سليم خشانة	أستاذ	جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي-	مناقش
علي غمري	أستاذ	جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي-	مشرف
فرحات ريقط	أستاذ محاضر ب	جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي-	مساعد المشرف

السنة الجامعية: 1446-1447 هـ / 2025-2026 م

الملخص :

تهدف هذه الأطروحة إلى تحليل ظاهرة القفزة الهيدروليكية من منظور نظري وتجريبي، وذلك في قناة مستطيلة ذات مقطع مركّب يتميز بوجود حوض جانبي (المجرى الفيضي) خشن وبميل موجب. الهدف الرئيس لهذه الدراسة هو بحث تأثير خشونة الحوض الجانبي وكذلك تأثير ميل القناة على خصائص القفزة الهيدروليكية. ومن خلال مقارنة نظرية مدعومة ببيانات تجريبية، تم التوصل إلى علاقة من الشكل :

$f(F_1, Y, Cr, \lambda, \beta, \tau, \alpha)$ وقد استلزم الأمر إجراء تحليل تجريبي لهذه العلاقة لتقييم الارتباط بين الخشونة المطلقة وميل القناة. إضافة إلى ذلك، تم الحصول على عدة علاقات تجريبية أخرى، توفر أدوات عملية لتصميم أحواض التهدة (أحواض تبديد الطاقة).

الكلمات المفتاحية : القفزة الهيدروليكية ، قناة مستطيلة مركّبة، عدد فرويد، خشونة المجرى الفيضي للقناة، الميل الموجب، حوض التهدة .

Abstract

This thesis aims to analyze, from both theoretical and experimental perspectives, the hydraulic jump occurring in a rectangular compound channel characterized by a rough major bed and a positive slope. The primary objective of this research is to investigate the effect of major bed roughness as well as the influence of channel slope on the characteristics of the hydraulic jump. Through a theoretical approach supported by experimental data, a relation of the form $f(F_1, Y, Cr, \lambda, \beta, \tau, \alpha)$ was established. An experimental analysis of this expression proved necessary to evaluate the relationship between absolute roughness and channel inclination. Furthermore, several empirical relations were derived, providing practical tools for the design of energy dissipation basins.

Keywords: Hydraulic jump, compound rectangular channel, Froude number, major bed roughness, positive slope, energy dissipation basin

Résumé

Cette thèse vise à analyser, sur les plans théorique et expérimental, le ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire à section composée, caractérisé par un lit majeur rugueux et une pente positive. L'objectif central de cette recherche est d'étudier l'effet de la rugosité du lit majeur ainsi que l'influence de la pente du canal sur les caractéristiques du ressaut. À travers une approche théorique appuyée par des données expérimentales, une relation de la forme $f(F_1, Y, Cr, \lambda, \beta, \tau, \alpha)$ a pu être établie. Une analyse expérimentale de cette expression s'est révélée nécessaire afin d'évaluer le lien entre la rugosité absolue et l'inclinaison du canal. Par ailleurs, plusieurs relations empiriques ont été obtenues, offrant des outils pratiques pour le dimensionnement des bassins de dissipation.

Mots clés : Ressaut hydraulique, canal rectangulaire composée, nombre de Froude, rugosité du lit majeur du canal, pente positive, bassin de dissipation.

Remerciements

Le Prophète ﷺ a dit : « Celui qui part pour rechercher la science est semblable au combattant qui part pour le jihad. »

La louange revient à Allah, car aucun effort n'a pris fin, aucun mérite n'a été accompli, et aucun chemin n'a été atteint si ce n'est par Sa miséricorde et Sa générosité. Louange donc à Lui.

Je souhaite exprimer ma profonde gratitude au professeur **GHOMRI Ali**, Professeur à Université Chahid Hamma Lakhdar - El Oued, pour l'encadrement attentif qu'il m'a offert tout au long de cette thèse et pour le partage de ses précieuses intuitions. Je lui suis également reconnaissant pour sa bienveillance, sa disponibilité constante et les encouragements qu'il n'a cessé de m'apporter.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au professeur **Kateb Samir**, de l'Université de Ouargla, pour l'aide précieuse qu'il nous a apportée au laboratoire. Ses conseils avisés, ses encouragements constants et sa bienveillance m'ont été d'un grand soutien.

J'adresse également mes remerciements à M. **Laid Bekkouche**, responsable de la résidence universitaire de Ouargla, pour sa gentillesse et sa collaboration.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux membres du jury et aux enseignants-chercheurs qui ont accepté de relire mon travail avec attention.

À tous ceux qui m'ont aidé, de près ou de loin, dans la préparation de ce travail, j'adresse mes sincères remerciements. Je tiens à mentionner tout particulièrement mes collègues **Haroun Khechiba** et **Ibtissam Herri**, pour leur coopération, leur collaboration et leur esprit de coordination. J'exprime également ma gratitude à mes amis pour leur soutien moral.

Je saisis cette occasion pour remercier l'ensemble des professeurs et l'administration du département d'hydraulique de l'Université d'El Oued, et plus spécialement le doyen, le professeur **Ali Chems**, pour son soutien moral et son amitié.

Dedicaces

إلى أبطال غزة

إلى الأرض التي تنبض بالعزة، وإلى شعبها الذي يكتب التاريخ بالصبر والدموع ، إلى
من بنوا من الصمود مدرسةً، ومن التضحية جسراً نحو الكرامة

إليكم أهدي ثمرة جهدي هذا عربون وفاء وتقدير،

فأنتم من علّمتهم العالم أن الكرامة لا تُقهر، وأن الأمل يولد من بين الركام، فأنتم من
علّمتونا أن العلم لا ينفصل عن الكرامة، وأن المعرفة لا تزدهر إلا في ظل الحرية.

إلى أرواح الشهداء، وإلى الجرحى والمقاومين، وإلى كل أمٍّ صابرة وأبٍ محتسب،
أهدي هذا العمل المتواضع، راجياً أن يكون لبنّةً في بناء مستقبلٍ يليق بتضحياتكم.

المجد لكم، والخلود لقضيتكم، والنصر حليفكم بإذن الله.

Sommaire

Résumé-----	i
Remerciements -----	ii
Dédicaces -----	iii
Sommaire -----	iv
Liste des tableaux -----	ix
Liste de photos -----	xix
Principale notation -----	xx

INTRODUCTION GENERALE

Première Partie

Synthèse bibliographique

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE : -----	7
--	---

Chapitre I

Notions fondamentales sur le ressaut hydraulique

I.1. INTRODUCTION : -----	9
I.2. DEFINITION L'ÉCOULEMENT A SURFACE LIBRE : -----	9
I.3. TYPE DES CANAUX : -----	10
I.3.1. Canaux prismatiques et non prismatiques : -----	10
I.3.2. Canaux à limites rigides et mobiles : -----	10
I.4. CLASSIFICATION DES ÉCOULEMENTS : -----	10
I.4.1. Écoulements stationnaires et non stationnaires : -----	10
I.4.2. Écoulements uniformes et non uniformes : -----	10
I.4.3. Écoulements à variation progressive et à variation rapide : -----	11
I.4.4. Écoulement à débit variable spatialement : -----	11
I.5. REGIMES D'ÉCOULEMENT : -----	11
I.5.1. Le nombre de Froude : -----	11
I.5.2. Le nombre de Reynolds : -----	12

I.6. LE RESSAUT HYDRAULIQUE-----	13
I.6.1. Définition : -----	13
I.6.2. Ressaut hydraulique classique-----	14
I.6.3. Classification de ressaut : -----	14
I.6.4. Les paramètres hydrauliques du ressaut :-----	16
I.6.4.1. Les hauteurs conjuguées du ressaut : -----	16
I.6.4.2. Longueurs caractéristiques du ressaut -----	17
I.6.4.2.1. Longueur du rouleau -----	17
I.6.4.2.2. Longueur du ressaut-----	17
I.7 HISTORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE : -----	18
I.7.1 Les Pionniers (XVe – XIXe Siècle) : -----	18
I.7.2 Fondements Modernes (Début du XXe Siècle – Seconde Guerre Mondiale) :-----	18
I.7.3 L'Âge d'Or et la Classification (Années 1950-1980) : -----	19
I.7.4 Recherches Contemporaines (récents) : -----	19
I.8 CONCLUSION : -----	20

Chapitre II

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composée avec lit majeur rugueux

II.1 INTRODUCTION :-----	22
II.2 ÉLABORATION DE L'APPROCHE THEORIQUE :	
II.2.1 Analyse théorique : -----	22
II.2.2 L'établissement de la relation adimensionnelle selon Euler : -----	22
II.3. SYNTHESE DES RESULTATS :-----	25
II.3.1. Étude du paramètre Cr en fonction de $(\varepsilon/B-b)$: -----	25
II.3.2. La variation du rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction des paramètres Cr et du nombre de Froude Fr : -----	27
II.4. CONCLUSION -----	28
II.5 ANALYSE EXPERIMENTALE : -----	29
II.5.1 Description de l'installation expérimentale : -----	29
II.5.2 Instruments utilisés aux mesures :-----	30
II.5.2.1 Mesure des débits volumiques : -----	30
II.5.2.2 Instrument limnimétrique : -----	30

II.5.2.3 Déroulement expérimental :-----	31
II.5.4 Etude de variation des caractéristiques de l'écoulement-----	32
II.5.4.1 Analyse du rapport L_j/h_1 de la longueur relative du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude Fr :-----	32
II.5.4.2 Analyse de L_r/h_1 de la longueur relative du rouleau avec le facteur F_1 :-----	34
II.5.4.3 Étude du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du F_1 :-----	36
II.5.4.4 Étude du rapport S/h_1 variant avec le paramètre F_1 :-----	38
II.5.4.5 Développement de l'expression de la rentabilité -----	40
II.5.3 Synthèse des résultats du deuxième chapitre. -----	42

Chapitre III

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire pente incliné à fond rugueux

III.1. INTRODUCTION :-----	45
III.2. ANALYSE THEORIQUE DE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A PENTE INCLINE RUGUEUX -----	45
III.2.1. INTRODUCTION -----	45
III.2.2. Analyse théorique :-----	45
III.2.3. Détermination du volume du ressaut : -----	48
III.2.3.1. Détermination analytique du volume du ressaut : -----	48
III.2.3.2. Détermination géométrique du volume de ressaut : -----	48
III.2.3.3. Le Facteur De Correction : -----	49
III.2.3.4. Le nombre de Froude :-----	49
III.2.3.5 VALIDATION DE L'APPROCHE THEORIQUE PROPOSEE : -----	50
III.4 CONCLUSION :-----	54
III.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX :-----	54
III.3.2. Ressaut hydraulique incliné rugueux :-----	55
III.3.2.1. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal :-----	55
III.3.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut : -----	61
III.3.2.2.1 Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 :-----	61
III.3.2.2.2. Variation de la hauteur relative du seuil S/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 :---	68
III.3.3 Conclusion -----	74

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE-----	75
--	----

Deuxième Partie

Etude expérimentale

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE -----	78
--	----

Chapitre I

Description et fonctionnement du modèle expérimental

I.1. INTRODUCTION :-----	81
I.2. POSITION DU PROBLEME -----	81
I.3. LE PROTOCOLE EXPERIMENTAL :-----	81
I.4. INSTRUMENTS DE MESURE -----	85
I.4.1. Mesure du débit volumique-----	85
I. 4.2. Limnimétrie -----	86
I. 4.3. Les seuils minces -----	86
I.4.4 Mesure de l'angle d'inclinaison -----	88

Chapitre II

Etude théorique

II.1 INTRODUCTION -----	90
II.2 ANALYSE THEORIQUE -----	90
II.2.1 Equation de la quantité de mouvement-----	90
II.2.2 Evaluation volumétrique du ressaut-----	94
II.2.3 Nombre de Froude -----	95
II.3 ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'EQUATION SEMI THEORIQUE -----	99
II.3.1 Détermination expérimentale du facteur de correction K-----	99
II.3.2 Etude du paramètre C_r en fonction de $(\varepsilon/B-b)$, l'angle d'inclinaison α -----	103
II.3.3 Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient C_r de résistance et du nombre de Froude F_1 -----	108
II.4 CONCLUSION-----	113

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1 INTRODUCTION :-----	115
III.2 RÉSULTATS ET DISCUSSION :-----	115
III.2.1 La variation du rapport « Y » des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal « α » -----	115
III.2.2 La variation de la longueur relative du rouleau de surface « L_r/h_1 » en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal « α »-----	129
III.2.3 La variation longueur relative du ressaut « L_j/h_1 » en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal « α » -----	142
III.2.4 La variation de la hauteur relative du seuil « s/h_1 » en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal « α » -----	155
III.2.5 Rendement du ressaut hydraulique : -----	169
III.3 EXEMPLE D'APPLICATION : -----	177
III.4 CONCLUSION : -----	183
CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE-----	184

CONCLUSION GENERALE

Références bibliographiques

Liste des tableaux

<i>Tableau II.1 : Récapitulation des coefficients C_r</i>	26
<i>Tableau II.2 : Facteur a_1 de corrélations</i>	33
<i>Tableau II.3 : Facteur a_2 de corrélations</i>	35
<i>Tableau II.4 : Facteur a_3 de corrélations</i>	37
<i>Tableau II.5 : Facteur a_4 de corrélations</i>	39
<i>Tableau III.1 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (0 mm) de la pente positive</i>	51
<i>Tableau III.2 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (6 mm) de la pente positive</i>	52
<i>Tableau III.3 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (8 mm) de la pente positive</i>	52
<i>Tableau III.4 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (10 mm) de la pente positive</i>	53
<i>Tableau III.5 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (12 mm) de la pente positive</i>	53
<i>Tableau III.6 : Valeurs des paramètres a_1</i>	57
<i>Tableau III.7 : Valeurs des paramètres a_2</i>	58
<i>Tableau III.8 : Valeurs des paramètres a_3</i>	58
<i>Tableau III.9 : Valeurs des paramètres a_4</i>	58
<i>Tableau III.10 : Valeurs des paramètres a_5</i>	59
<i>Tableau III.11 : Valeurs des paramètres a et b</i>	60
<i>Tableau III.12 : Valeurs des paramètres a_1</i>	64
<i>Tableau III.13 : Valeurs des paramètres a_2</i>	65
<i>Tableau III.14 : Valeurs des paramètres a_3</i>	65
<i>Tableau III.15 : Valeurs des paramètres a_4</i>	65
<i>Tableau III.16 : Valeurs des paramètres a_5</i>	66
<i>Tableau III.17 : Valeurs des paramètres a et b</i>	67
<i>Tableau III.18 : Valeurs des paramètres a et b_1</i>	71
<i>Tableau III.19 : Valeurs des paramètres a et b_2</i>	71
<i>Tableau III.20 : Valeurs des paramètres a et b_3</i>	71
<i>Tableau III.21 : Valeurs des paramètres a et b_4</i>	72

Tableau III.22 : Valeurs des paramètres a et b_5 -----	72
Tableau III.23 : Valeurs des paramètres b -----	73
Tableau II.1 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (0 mm) de la pente positive-----	99
Tableau II.2 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (6 mm) de la pente positive-----	100
Tableau II.3 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (8 mm) de la pente positive-----	101
Tableau II.4 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (10 mm) de la pente positive -----	102
Tableau II.5 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (12 mm) de la pente positive -----	102
Tableau II.6 : Facteur a_1 de corrélations -----	105
Tableau II.7 : Facteur a_2 de corrélations -----	106
Tableau II.8 : Facteur a_3 de corrélations -----	106
Tableau II.9 : Valeurs a' et b' du coefficient de rugosité corrélées_à l'angle d'inclinaison du canal. -----	107
Tableau II.10 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y théorique selon (la rugosité 0 mm) -----	110
Tableau II.11 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y théorique selon (la rugosité 6 mm) -----	110
Tableau II.12 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y théorique selon (la rugosité 8 mm) -----	111
Tableau II.13 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y théorique selon (la rugosité 10 mm)-----	111
Tableau II.14 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y théorique selon (la rugosité 12 mm)-----	112
Tableau III.1 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Y en fonction de F_1 . -----	118
Tableau III.2 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Y en fonction de F_1 . -----	119
Tableau III.3 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Y en fonction de F_1 . -----	119
Tableau III.4 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Y en fonction de F_1 . -----	120
Tableau III.5 : Facteur a_1 de corrélations -----	121
Tableau III.6 : Facteur a_2 de corrélations -----	121
Tableau III.7 : Facteur a_3 de corrélations -----	122
Tableau III.8 : Facteur a_4 de corrélations -----	122
Tableau III.9 : Valeurs a' et b' du coefficient de rugosité corrélées_Avec l'angle d'inclinaison du canal. -----	123
Tableau III.10 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y relation selon (la rugosité 0 mm) -----	125
Tableau III.11 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y relation selon (la rugosité 6 mm) -----	126
Tableau III.12 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y relation selon (la rugosité 8 mm) -----	127
Tableau III.13 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y relation selon (la rugosité 10 mm)-----	128

Tableau III.14 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y relation selon (la rugosité 12 mm)-----	129
Tableau III.15 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Lr/h_1 en fonction de F_1 . -----	132
Tableau III.16 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Lr/h_1 en fonction de F_1 . -----	132
Tableau III.17 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Lr/h_1 en fonction de F_1 . -----	133
Tableau III.18 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Lr/h_1 en fonction de F_1 . -----	134
Tableau III.19 : Facteur a_1 de corrélations -----	135
Tableau III.20 : Facteur a_2 de corrélations-----	135
Tableau III.21 : Facteur a_3 de corrélations -----	135
Tableau III.22 : Facteur a_4 de corrélations -----	136
Tableau III.23 : Valeurs a' et b' du coefficient de rugosité corrélées à l'angle d'inclinaison du canal. -----	136
Tableau III.24 : Erreur relative en (%) entre Lr/h_1 expérimentale et Lr/h_1 relation selon (la rugosité 0 mm)-----	138
Tableau III.25 : Erreur relative en (%) entre Lr/h_1 expérimentale et Lr/h_1 relation selon (la rugosité 6 mm)-----	139
Tableau III.26 : Erreur relative en (%) entre Lr/h_1 expérimentale et Lr/h_1 relation selon (la rugosité 8 mm)-----	140
Tableau III.27 : Erreur relative en (%) entre Lr/h_1 expérimentale et Lr/h_1 relation selon (la rugosité 10 mm) ----	140
Tableau III.28 : Erreur relative en (%) entre Lr/h_1 expérimentale et Lr/h_1 relation selon (la rugosité 12 mm) ----	141
Tableau III.29 : Données expérimentales obtenues pour établir les courbes de Lj/h_1 en fonction de F_1 -----	144
Tableau III.30 : Données expérimentales obtenues pour établir les courbes de Lj/h_1 en fonction de F_1 . -----	145
Tableau III.31 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Lj/h_1 en fonction de F_1 .-----	146
Tableau III.32 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Lj/h_1 en fonction de F_1 .-----	146
Tableau III.33 : Valeurs des paramètres a_1 -----	147
Tableau III.34 : Valeurs des paramètres a_2 -----	148
Tableau III.35 : Valeurs des paramètres a_3 -----	148
Tableau III.36 : Valeurs des paramètres a_4 -----	148
Tableau III.37 : Valeurs a' et b' du coefficient de rugosité corrélées à l'angle d'inclinaison du canal. -----	149
Tableau III.38 : Erreur relative en (%) entre Lj/h_1 expérimentale et Lj/h_1 relation selon (la rugosité 00 mm) ----	151
Tableau III.39 : Erreur relative en (%) entre Lj/h_1 expérimentale et Lj/h_1 relation selon (la rugosité 06 mm) ----	151
Tableau III.40 : Erreur relative en (%) entre Lj/h_1 expérimentale et Lj/h_1 relation selon (la rugosité 08 mm) ----	152
Tableau III.41 : Erreur relative en (%) entre Lj/h_1 expérimentale et Lj/h_1 relation selon (la rugosité 10 mm) ----	153
Tableau III.42 : Erreur relative en (%) entre Lj/h_1 expérimentale et Lj/h_1 relation selon (la rugosité 12 mm) ----	154

<i>Tableau III.43 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de s/h_1 en fonction de F_1.</i>	157
<i>Tableau III.44 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de s/h_1 en fonction de F_1.</i>	158
<i>Tableau III.45 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de s/h_1 en fonction de F_1.</i>	159
<i>Tableau III.46 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de s/h_1 en fonction de F_1.</i>	159
<i>Tableau III.47 : Facteur a et b_1 de corrélations</i>	160
<i>Tableau III.48 : Facteur a et b_2 de corrélations</i>	160
<i>Tableau III.49 : Facteur a et b_3 de corrélations</i>	161
<i>Tableau III.50 : Facteur a et b_4 de corrélations</i>	162
<i>Tableau III.51 : Facteur 'a' de corrélations</i>	162
<i>Tableau III.52 : Facteur b' de corrélations</i>	163
<i>Tableau III.53 : Erreur relative en (%) entre s/h_1 expérimentale et s/h_1 relation selon (la rugosité 00 mm)</i>	165
<i>Tableau III.54 : Erreur relative en (%) entre s/h_1 expérimentale et s/h_1 relation selon (la rugosité 06 mm)</i>	166
<i>Tableau III.55 : Erreur relative en (%) entre s/h_1 expérimentale et s/h_1 relation selon (la rugosité 08 mm)</i>	167
<i>Tableau III.56 : Erreur relative en (%) entre s/h_1 expérimentale et s/h_1 relation selon (la rugosité 10 mm)</i>	167
<i>Tableau III.57 : Erreur relative en (%) entre s/h_1 expérimentale et s/h_1 relation selon (la rugosité 12 mm)</i>	168
<i>Tableau III.58 : Données expérimentales de rendement en fonction de nombre de Froude pour la pente 0 %</i>	174
<i>Tableau III.59 : Données expérimentales de rendement en fonction de nombre de Froude pour la pente 0,5 %</i>	175
<i>Tableau III.60 : Données expérimentales de rendement en fonction de nombre de Froude pour la pente 1 %</i>	175
<i>Tableau III.61 : Données expérimentales de rendement en fonction de nombre de Froude pour la pente 1.5 %</i>	176

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma d'un ressaut hydraulique-----	12
Figure I.2 : Classification des ressauts-----	15
Figure I.3: Ressaut hydraulique classique -----	16
Figure II.1 : Schématisation du ressaut généré par une paroi mince dans un canal rectangulaire de forme composée avec un fond lisse. -----	22
Figure II.2 : Variation $f(Y)$ en fonction de $F_1^2 \varepsilon$ (mm)=(x)06, (□)08,(○)10 et (Δ)12-----	25
Figure II.3 : Evolution du paramètre Cr avec $\varepsilon/(B-b)$ -----	26
Figure II.4 : Illustration de $f(y_1, y_2)$ variant avec $F_1^2 (1-1.896 \varepsilon/(B-b))$ (Δ) mesures d'essai obtenues. -----	27
Figure II.5 : Illustration du Y avec de $F_1^2(1-Cr)$ (□) motifs d'essai.-----	27
Figure II.6 : Illustration du Y avec l'approche (2.22) (□) motifs d'essai. -----	28
Figure II.7: vue du canal d'essai -----	29
Figure II.8 : Illustration de L_j/h_1 variant avec Fr_ε (mm)=(♦)06, (■)08,(▲)10 et (x)12 et (*)00_ (—) Courbes de corrélation -----	32
Figure II.9 : Corrélation du facteur a_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	33
Figure II.10 : Comparaison entre L_j/h_1 expérimentale et l'approche globale $f(\varepsilon/(B-b), F_1)$ -----	34
Figure II.11 : Illustration de L_j/h_1 variant avec Fr_ε (mm)=(♦)12, (■)10,(▲)08 , (x)06 et (*)00_ (—) Courbes de corrélation. -----	34
Figure II.12 : Corrélation du facteur a_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	35
Figure II.13 : Comparaison entre L_r/h_1 expérimentale et l'approche empirique $f(\varepsilon/(B-b), F_1)$ -----	36
Figure II.14 : Illustration des mesures entre Y et F_1 pour cinq rugosités examinées :-----	36
ε (mm)=(♦)12, (■)10,(▲)08 , (x)06 et (*)00-----	36
Figure II.15 : Corrélation du facteur a_3 avec $\varepsilon/(B-b)$ -----	37
Figure II.16 : Rapport Y en fonction $f(\varepsilon/(B-b), F_1)$ (—) Premiers bissectrice. -----	38
Figure II.17 : Présentation de s/h_1 avec le paramètre F_1 pour diverses rugosités absolues ε (mm)=(♦)12, (■)10,(▲)08 , (x)06 et (*)00-----	38
Figure II.18 : Représentation du facteur a_4 avec $\varepsilon/(B-b)$ -----	39
Figure II.19: Présentation S/h_1 avec $f(\varepsilon/(B-b), F_1)$ -----	40
Figure II.20 : Présentation η avec Fr_ε .-----	41

Figure III.18 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (•) ; $\tan\alpha = 0,005$ (■) ; $\tan\alpha = 0,01$ (▲) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement	63
Figure 3.19 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (•) ; $\tan\alpha = 0,005$ (■) ; $\tan\alpha = 0,01$ (▲) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement	63
Figure III.20 : Variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour tang (α) $\tan\alpha = 0,00$ (•) ; $\tan\alpha = 0,005$ (■) ; $\tan\alpha = 0,01$ (▲) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement	64
Figure III.21 : Variation du paramètre a_1 en fonction de tang (α).	64
Figure III.22 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α).	65
Figure III.23 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α).	65
Figure III.24 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α).	65
Figure III.25 : Variation du paramètre 'a' en fonction de tang(α).	66
Figure III.26 : Variation du paramètre 'a' et 'b' en fonction de Rugosité (ϵ)	67
Figure III.27 : Variation de la relation $f(F_1, \alpha)$ en fonction de la hauteur relative L_j/h_1 du seuil. (□) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $f(F_1, \alpha) = L_j/h_1$.	68
Figure III.28 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (O) ; $\tan\alpha = 0,005$ (□) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (x) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement	68
Figure III.29 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (O) ; $\tan\alpha = 0,005$ (□) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (x) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement	69
Figure III.30 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (O) ; $\tan\alpha = 0,005$ (□) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (x) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement	69
Figure III.31 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (O) ; $\tan\alpha = 0,005$ (□) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (x) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement	70
Figure III.32 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour Tang $\alpha = 0,00$ (O) ; $\tan\alpha = 0,005$ (□) ; $\tan\alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan\alpha = -0,015$ (x) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement	70
Figure III.33 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α).	71
Figure III.34 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α)	71
Figure III.35 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α)	71
Figure III.36 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang (α)	72
Figure III.37 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(α)	72
Figure III.38 : Variation du paramètre 'b' en fonction de Rugosité (ϵ)	73
Figure I.1. Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composée avec pente positive variable, ayant servi à l'expérimentation	82

Figure II.1 : ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé incliné à pente positive -----	91
Figure II.2 a) Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut.	
_____ b) Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.-----	93
Figure II.3: Variation du $f(Y)$ avec le nombre de Froude $F_{1,\varepsilon}^2 (mm) = (\bullet) 06, (\bullet) 08, (\bullet) 10$ et $(\bullet) 12$. -----	104
Figure II.4: Variation du $f(Y)$ avec le nombre de Froude $F_{1,\varepsilon}^2 (mm) = (\bullet) 06, (\bullet) 08, (\bullet) 10$ et $(\bullet) 12$. -----	104
Figure II.5: Variation du $f(Y)$ avec le nombre de Froude $F_{1,\varepsilon}^2 (mm) = (\bullet) 06, (\bullet) 08, (\bullet) 10$ et $(\bullet) 12$. -----	105
Figure II.6: Corrélation du facteur a_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	105
Figure II.7: Corrélation du facteur a_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	106
Figure II.8: Corrélation du facteur a_3 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	106
Figure II.9 : Variation des facteur a' et b' en fonction de $\tan(\alpha)$ -----	107
Figure II.10: Validation de l'approche semi-théorique. -----	108
Figure II.11: illustration du rapport Y avec de $(1 - Cr)F_1^2$ -----	109
Figure II.12: Comparaison entre Y expérimental et de l'équation semi-théorique (2.34)-----	109
Figure III.1 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon(mm) = 0, 6, 8, 10$ et 12 -----	116
Figure III.2 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon(mm) = 0, 6, 8, 10$ et 12 -----	116
Figure III.3 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon(mm) = 0, 6, 8, 10$ et 12 -----	117
Figure III.4 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon(mm) = 0, 6, 8, 10$ et 12 -----	117
Figure III.5: Corrélation du facteur a_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	121
Figure III.6: Corrélation du facteur a_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	121
Figure III.7: Corrélation du facteur a_3 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	122
Figure III.8: Corrélation du facteur a_4 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	122
Figure III.9 : Variation des facteur a' et b' en fonction de $\tan(\alpha)$ -----	123
Figure III.10 : Variation de Y expérimentale du ressaut Y_{exp} en fonction de Y relation du ressaut Y calculée selon la relation (3.7). -----	124
Figure III.11 : Variation de la longueur relative du rouleau en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	130

Figure III.12 : Variation de la longueur relative du rouleau en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	130
Figure III.13 : Variation de la longueur relative du rouleau en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	131
Figure III.14 : Variation de la longueur relative du rouleau en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	131
Figure III.15: Corrélation du facteur a_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	135
Figure III.16: Corrélation du facteur a_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	135
Figure III.17: Corrélation du facteur a_3 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	135
Figure III.18: Corrélation du facteur a_4 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	136
Figure III.19 : Variation des facteur a' et b' en fonction de $\tan(\alpha)$ -----	137
Figure III.20 : Comparaison entre Lr/h_1 expérimentale et l'approche globale $f(\tan(\alpha), \varepsilon/(B-b), F_1)$ -----	138
Figure III.21 : Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude_Pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	142
Figure III.22 : Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude_Pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	143
Figure III.23 : Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude_Pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	143
Figure III.24 : Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude_Pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	144
Figure III.25 : Corrélation du facteur a_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	147
Figure III.26 : Corrélation du facteur a_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	148
Figure III.27: Corrélation du facteur a_3 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	148
Figure III.28: Corrélation du facteur a_4 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	148
Figure III.29 : Variation des facteurs a' et b' en fonction de $\varepsilon/(B-b)$ -----	149
Figure III.30 : Comparaison entre Lj/h_1 expérimentale et l'approche globale $f(\tan(\alpha), \varepsilon/(B-b), F_1)$ -----	150
Figure III.31 : Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	155
Figure III.32 : Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	156
Figure III.33 : Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	156

Figure III.34 : Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm. -----	157
Figure III.35 : Corrélation du facteur b_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	160
Figure III.36 : Corrélation du facteur b_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	161
Figure III.37 : Corrélation du facteur b_3 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	161
Figure III.38 : Corrélation du facteur b_4 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ -----	162
Figure III.39 : Corrélation du facteur a avec le $\tan(\alpha)$ -----	163
Figure III.40 : Corrélation du facteur b' avec le $\tan(\alpha)$ -----	164
Figure III.41 : Comparaison entre s/h_1 expérimentale et l'approche globale $f(\tan(\alpha), \varepsilon/(B-b), F_1)$ -----	165
Figure III.42: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour la pente 0% . -----	172
Figure III.43 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour la pente 0.5% -----	172
Figure III.44 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour la pente 1% -----	173
Figure III.45 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour la pente 1.5% -----	173

Liste de photos

<i>Photo I.1 : le ressaut hydraulique dans le nature-----</i>	13
<i>Photo I.2 : le ressaut hydraulique dans le laboratoire -----</i>	14
<i>Photo II.1 : dispositif de mesure des débits volumiques-----</i>	30
<i>Photo II.2 : appareillage de lecture des profondeurs-----</i>	30
<i>Photo II.3 : a) section composée rugueuse b) section composée lisse -----</i>	31
<i>Photo II.3 : Les divers tapis rugueux -----</i>	31
<i>Photo I.1. Ressaut hydraulique évoluant dans canal rectangulaire composé. -----</i>	82
<i>Photo I.2. La section composée du canal avec lit majeur rugueux -----</i>	83
<i>Photo I.3. Les ouvertures amont h_1 (cm) : 2,5 ; 3 ; 3,5 ; 4 -----</i>	83
<i>Photo I.4. Pompe axiale-----</i>	84
<i>Photo I.5. Vanne de régulation du débit. -----</i>	84
<i>Photo I.6. Les divers tapis rugueux et leur préparation-----</i>	84
<i>Photo I.7. Déversoir de section rectangulaire pour mesurer des débits volumiques. -----</i>	85
<i>Photo I.8. Instrument de mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique de la règle. -----</i>	86
<i>Photo I.9. Les parois minces(seuils) pour contrôler la formation du ressaut hydraulique. -----</i>	87
<i>Photo I.10. vue d'ensemble du canal d'essai et le mécanisme à vis-écrou-----</i>	88

Principale notation

A_1	<i>L'aire de la section mouillée initiale</i>	[m]
A_2	<i>L'aire de la section mouillée finale</i>	[m]
B et b	<i>Largeur de lit majeur et de lit mineur du canal</i>	[m]
Cr	<i>Coefficient de résistance</i>	[-]
F_1	<i>Nombre de Froude à l'amont du ressaut</i>	[-]
$f_1 ; f_2$	<i>Force hydrostatique au pied et à la fin du ressaut</i>	[N]
fr	<i>Force de résistance</i>	[N]
F_x	<i>Force de résistance due à la rugosité appliquée au fond du canal</i>	[N]
$\sum F_{ext}$	<i>La somme des forces extérieures</i>	[N]
g	<i>Accélération de la pesanteur</i>	[m/s ²]
h	<i>Hauteur de plein bord du lit mineur</i>	[m]
h_1	<i>Hauteur initiale du ressaut</i>	[m]
h_2	<i>Hauteur finale du ressaut</i>	[m]
h_1^*	<i>Hauteur initiale du ressaut classique</i>	[m]
h_2^*	<i>Hauteur finale du ressaut classique</i>	[m]
$\bar{h}$	<i>Profondeur du centre de gravité de la section mouillée</i>	[m]
H_1 et H_2	<i>Charges totales au pied et à la fin du ressaut</i>	[m]
ΔH	<i>Pertes de charge dues au ressaut</i>	[m]
h_{dev}	<i>Hauteur de la lame déversant</i>	[m]
K	<i>Coefficient du volume</i>	[-]
L_j	<i>Longueur du ressaut</i>	[m]
L_r	<i>Longueur du rouleau</i>	[m]
L_j^*	<i>Longueur relative du ressaut classique</i>	[m]
L_r^*	<i>Longueur relative du rouleau classique</i>	[m]
ΔP	<i>La variation dans la quantité de mouvement</i>	[kg.m.s ⁻¹]
P	<i>Pression</i>	[N/m ²]
P	<i>Périmètre du canal</i>	[m]
P_1	<i>Pression hydrostatique appliquée à la section amont du ressaut</i>	[Pa]
P_2	<i>Pression hydrostatique appliquée à la section aval du ressaut</i>	[Pa]
Q	<i>Débit volume</i>	[m ³ /s]
q	<i>Débit unitaire</i>	[m ² /s]
Re	<i>Nombre de Reynolds</i>	[-]
R_h	<i>Rayon hydraulique</i>	[m]
S	<i>Hauteur d'un seuil</i>	[m]
V	<i>Le volume du liquide</i>	[m ³]
v_1 et v_2	<i>Vitesses moyennes au pied et à la fin de ressaut</i>	[m/s]
ϖ	<i>Poids spécifique du liquide</i>	[N/m ³]
Y	<i>Rapport des hauteurs conjuguées</i>	[-]
Y^*	<i>Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut classique</i>	[-]
β	<i>Rapport de l'élargissement</i>	[-]
τ	<i>Rapport de aspect</i>	[-]
λ	<i>la longueur relative du ressaut</i>	[-]
η	<i>Rendement du ressaut</i>	[-]

η^*	<i>Rendement du ressaut Classique</i>	[-]
ε	<i>Rugosité absolue</i>	[mm]
Δt	<i>Le laps de temps</i>	[s]
ρ	<i>Masse volumique</i>	[Kg/m ³]

Introduction Générale

INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages hydrauliques, tels que les barrages, doivent évacuer de fortes crues pour garantir leur intégrité. L'écoulement libéré par l'évacuateur est de régime torrentiel, caractérisé par des forces tractrices fortement érosives. Pour protéger la vallée aval, il est essentiel de dissiper cette énergie avant de restituer l'eau à la rivière en régime fluvial. La solution la plus courante et économique pour réaliser cette transition est le ressaut hydraulique. Ce phénomène, qui marque le passage du régime torrentiel au régime fluvial, est au cœur de la conception des bassins de dissipation. Pour dimensionner ces ouvrages, il faut analyser les paramètres géométriques et hydrauliques du ressaut tels que les profondeurs conjuguées, le nombre de Froude initial, ainsi que les longueurs du ressaut et du rouleau de surface. Des recherches cherchent également à l'étude de la distribution des pressions et des vitesses au sein de ce phénomène turbulent.

Le premier à avoir décrit ce phénomène fut Léonard de Vinci, peintre et mathématicien de la Renaissance. Depuis le XVI^e siècle, son observation a suscité un intérêt constant chez les chercheurs et a alimenté le développement des sciences hydrauliques. Bien que plus de quatre siècles se soient écoulés depuis sa première description, l'étude du ressaut hydraulique et de ses effets associés continue de progresser considérablement. Au cours des soixante dernières années, l'évolution des connaissances et des méthodes d'analyse a permis de moderniser la compréhension de ce phénomène, qui demeure aujourd'hui un sujet d'actualité majeur, doté d'enjeux techniques et économiques importants (Hager & Li, 1992). En 1828, Belanger a lié les ressauts hydrauliques au principe de quantité de mouvement, une relation validée plus tard par des études expérimentales qui ont confirmé le rôle du principe dans la régularisation des ressauts hydrauliques (Chen-Feng Li, 1995).

Le ressaut hydraulique est un phénomène d'écoulement complexe, caractérisé par une discontinuité de surface qui se produit lors de la transition d'un régime supercritique vers un régime fluvial en canal à surface libre. Son apparition est fortement influencée par diverses structures hydrauliques telles que les seuils, déversoirs, vannes, piliers ou bassins de tranquillisation, qui modifient la profondeur d'écoulement et favorisent l'établissement du ressaut. Cette transition génère un écoulement turbulent, marqué par de larges structures tourbillonnaires, des ondes de surface, une forte dissipation d'énergie ainsi qu'un entraînement significatif d'air, conférant au ressaut des caractéristiques dissipatives majeures (Chanson, 2015).

La compréhension du ressaut hydraulique est déterminante pour de nombreuses applications à enjeux socio-économiques et environnementaux. Dans les barrages, son utilisation est particulièrement essentielle. Un déversoir conçu selon ses principes permet de dissiper jusqu'à 60 à 70 % de l'énergie. Cette dissipation réduit les risques de dégradation de la structure et du lit de la rivière. Elle contribue ainsi à limiter les coûts de maintenance et les impacts environnementaux (Kherouf Mazouz, 2023).

Pour gérer efficacement cette dissipation d'énergie, des ouvrages artificiels appelés bassins de dissipation sont couramment utilisés pour contenir et contrôler le ressaut hydraulique. Bien que la compréhension fondamentale des ressauts hydrauliques ait été établie pour des scénarios idéalisés, les systèmes hydrauliques réels impliquent souvent des géométries de canaux plus complexes, telles que les canaux rectangulaires composés, qui comportent un canal principal et des plaines inondables adjacentes (Riguet. F et al., 2020). Ces canaux composés présentent un comportement d'écoulement plus complexe que les canaux rectangulaires simples en raison de l'interaction entre les différentes zones d'écoulement (Benabdesselam, 2020).

Les ressauts hydrauliques sur surfaces inclinées jouent un rôle essentiel dans la dissipation de l'énergie excédentaire en aval des ouvrages hydrauliques, tels que les régulateurs, déversoirs, barrages et évacuateurs de crues. Leur mise en place permet de limiter les risques d'érosion, de cavitation et de déstabilisation structurelle, garantissant ainsi la sécurité et la durabilité des installations hydrauliques.

Au cours des dernières décennies, un nombre important de travaux expérimentaux et théoriques ont été consacrés à la compréhension des caractéristiques des ressauts hydrauliques évoluant sur des lits inclinés, notamment les travaux de (Bakhmeteff & Matzke, 1938), (Kindsvater, 1944) classifiât les ressauts à pente positive en quatre principaux types : le type A, type B, type C et type D, (Chow, 1959), (Bradley & Peterka, 1957), (USBR, 1958), (Rajaratnam, 1967), (Rajaratnam & Murahari, 1974), (Mikhalev & Hoang Ty An, 1976). Des contributions plus récentes, telles que celles de (Hager & Bretz, 1987), (Hager & Li, 1992) ainsi que (Ead & Rajaratnam, 2002), ont affiné l'analyse en intégrant des effets complexes liés à la pente du lit, à la rugosité et aux interactions des écoulements. L'ensemble de ces travaux constitue aujourd'hui une base scientifique solide pour la recherche scientifique, la modélisation et la conception des ressauts hydrauliques sur lits inclinés dans les ouvrages hydrauliques modernes.

De nombreuses études se sont intéressées à l'influence de la rugosité du lit dans des canaux rectangulaires simples et horizontaux, montrant que l'augmentation de la rugosité tend à diminuer les paramètres géométriques du ressaut tout en augmentant la dissipation d'énergie (Mahtabi et al., 2020); (Daneshfaraz et al., 2021) ; (Sayyadi et al., 2022). Parallèlement, l'influence de la pente a été analysé dans des canaux prismatiques (Debabeche et al., 2009); (Cherhabil, S., 2010); (Riguet, F., 2012); (Kateb et al., 2019). En revanche, les recherches sur les canaux composés demeurent encore limitées et portent principalement sur l'influence de la rugosité appliquée au lit majeur ou mineur en l'absence de pente. (Djamaa, W., 2022); (Lacheheb, S., 2023) ; (Ghomri et al., 2023). Or, la géométrie composée induit des interactions hydrauliques complexes entre le lit mineur et les zones de débordement, affectant les vitesses, les contraintes de cisaillement et la turbulence (Khattaoui & Achour, 2012). La combinaison de la rugosité appliquée au lit mineur ou majeur et de la pente dans les canaux composés reste peu explorée.

Des travaux récents, expérimentaux et numériques, ont commencé à étudier l'effet combiné de la rugosité et de la pente, principalement dans des canaux rectangulaires simples (Palermo & Pagliara, 2017); (Laishram et al., 2021); (Gupta, S. K. & Dwivedi, V. K., 2023, 2025). Ils montrent généralement qu'une augmentation simultanée de la rugosité du lit et de la pente réduit les caractéristiques du ressaut hydraulique. Cependant, l'interaction entre ces deux paramètres dans les canaux rectangulaires composés notamment lorsque la rugosité est appliquée au lit majeur reste peu documentée, ce qui justifie la nécessité d'investigations plus approfondies.

La présente thèse vise à analyser, aux plans expérimental et théorique, le ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire de section composée, caractérisé par un lit majeur rugueux et une pente positive. L'étude propose d'établir des approches fonctionnelles adimensionnelles permettant de relier les principales caractéristiques du ressaut et de mettre en évidence l'influence combinée de la rugosité du lit majeur et de la pente du canal sur son comportement hydraulique. Il est important de souligner que le ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire de section composée, muni d'un lit majeur rugueux et présentant une pente positive, n'a jamais fait l'objet d'investigations antérieures. Cette absence d'études dans la littérature constitue une lacune notable, qui a motivé le choix et l'orientation du présent sujet de recherche.

Notre thèse s'articule autour de deux parties essentielles :

- ❖ La première partie de ce travail est consacrée à une étude bibliographique regroupant les généralités et les notions fondamentales relatives au ressaut hydraulique, suivies d'une présentation des principaux travaux réalisés dans le domaine, notamment ceux portant sur le ressaut en canal rectangulaire de section composée, avec lit majeur rugueux, ainsi que sur les configurations à fond rugueux incliné. Cette synthèse permettra de situer le contexte scientifique de l'étude et de dégager les limites des recherches antérieures.
- ❖ La seconde partie est consacrée à notre contribution personnelle, portant sur l'analyse du ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire de section composée, caractérisé par un lit majeur rugueux et une pente positive. Cette contribution s'appuie à la fois sur une investigation théorique et sur une étude expérimentale approfondie. Une comparaison détaillée entre les données expérimentales et les approches théoriques proposées sera également menée, afin d'en optimiser leurs utilisations et d'améliorer leurs fiabilités.

Première Partie

Synthèse bibliographique

INTRODUCTION DE LA PREMIERE PARTIE :

La première partie de notre étude bibliographique est consacrée à la présentation et à l'analyse des travaux antérieurs les plus appropriés portant sur le phénomène du ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques, notamment les canaux rectangulaires simples et composés, à fond horizontal ou incliné et présentant le paramètre rugosité. Ce phénomène, d'un grand intérêt pour les ingénieurs hydrauliciens, a fait l'objet de nombreuses recherches expérimentales visant à mieux comprendre son comportement et à optimiser la conception des bassins d'amortissement. Ces études ont permis de proposer des solutions efficaces pour limiter les effets néfastes tels que l'érosion des lits et la dégradation des ouvrages hydrauliques. Afin d'assurer une organisation claire et méthodique de cette synthèse, cette première partie a été scindée en trois chapitres principaux, chacun abordant un aspect particulier du ressaut hydraulique dans les différents types de canaux.

- ❖ **Le premier chapitre** sera consacré à la présentation des généralités et des notions fondamentales relatives au ressaut hydraulique. Il abordera les principes théoriques essentiels permettant de comprendre ce phénomène complexe, notamment ses conditions d'apparition, ses caractéristiques hydrauliques, ainsi que les principaux paramètres influençant sa formation et son évolution dans les canaux prismatiques.
- ❖ **Le deuxième chapitre** traitera des travaux de (Lacheheb, S., 2023), portant sur l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince, se développant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux. Ce chapitre analysera de manière approfondie les méthodologies expérimentales et les approches analytiques adoptées par l'auteur, ainsi que les résultats obtenus concernant l'influence du seuil et de la rugosité du lit sur les caractéristiques du ressaut.
- ❖ **Le troisième et dernier chapitre** sera destiné à l'examen des travaux de (Nouacer, B., 2023), relatifs à l'étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux. Il mettra en évidence les apports scientifiques de cette recherche, notamment l'effet de la pente et de la rugosité sur la stabilité et les dimensions du ressaut, ainsi que les corrélations établies entre les résultats expérimentaux et les modèles théoriques proposés.

Chapitre I

Notions fondamentales sur le ressaut hydraulique

I.1. INTRODUCTION :

L'hydraulique, est fondamentale dans la vie et au développement des sociétés, car elle permet la maîtrise et l'utilisation de la force des liquides pour accomplir des tâches essentielles. Elle s'intéresse notamment aux écoulements à surface libre, observés dans les canaux naturels et artificiels, dont la surface est soumise à la pression atmosphérique

Ce chapitre propose une vue d'ensemble sur les différents types de canaux, leurs caractéristiques et la classification des écoulements à surface libre, en introduisant les notions fondamentales nécessaires à leur compréhension. Cette base théorique servira ensuite à aborder plus spécifiquement certains phénomènes hydrauliques, tels que le ressaut hydraulique, en définissant les termes clés liés à ce sujet et en retraçant brièvement l'historique des recherches menées, afin de mieux cerner les résultats attendus par les hydrauliciens travaillant dans ce domaine.

I.2. DEFINITION DE L'ÉCOULEMENT A SURFACE LIBRE :

Un écoulement à surface libre est l'écoulement d'un fluide, généralement de l'eau, dans un espace ouvert en contact direct avec l'atmosphère, présentant une surface libre soumise à la pression atmosphérique. Ce type d'écoulement, que l'on retrouve dans les rivières, oueds, canaux ou autres zones humides, se caractérise par la présence de deux milieux non miscibles - un volume d'eau en partie inférieure et un volume d'air au-dessus - séparés par une interface bien définie. Sa dynamique est principalement gouvernée par la gravité, la pente du fond et la résistance des parois, et ses paramètres essentiels incluent la forme, la position et la vitesse de l'écoulement (Subramanya, 2009).

I.3. TYPE DES CANAUX :

I.3.1. Canaux prismatiques et non prismatiques :

Un canal prismatique possède une section transversale et une pente de fond constantes. Typique des ouvrages artificiels, il adopte des formes géométriques standardisées (rectangulaire, trapézoïdale, triangulaire, circulaire).

Un canal non prismatique présente des variations spatiales de forme, dimensions et pente, caractéristiques des milieux naturels soumis à des processus morpho dynamiques.

Cette distinction influence directement la modélisation des écoulements à surface libre, les hypothèses de simplification, et les équations de Saint-Venant utilisées pour la simulation hydraulique.

I.3.2. Canaux à limites rigides et mobiles :

Les canaux à ciel ouvert se classent selon la nature de leurs parois en deux catégories :

Canaux à limites rigides : géométrie constante, pas d'érosion ni de dépôt, un seul degré de liberté (variation du niveau d'eau).

Canaux à limites mobiles : géométrie variable, soumis à l'érosion et au transport de sédiments, quatre degrés de liberté (niveau d'eau, largeur, pente, profil).

I.4. CLASSIFICATION DES ECOULEMENTS :

I.4.1. Écoulements stationnaires et non stationnaires :

Un écoulement est qualifié de stationnaire lorsque ses paramètres hydrauliques - tels que la profondeur ou le débit en une section donnée - restent constants au cours du temps. À l'inverse, toute variation temporelle de ces paramètres définit un écoulement non stationnaire.

I.4.2. Écoulements uniformes et non uniformes :

Un écoulement est dit uniforme lorsque ses paramètres hydrauliques - tels que la profondeur d'eau, la vitesse ou le débit - restent constants le long d'un canal à section ouverte. Dans ce cas, la surface libre est parallèle au fond du canal et la section transversale reste identique sur toute la longueur.

En pratique, un écoulement uniforme instationnaire est quasiment inexistant ; ainsi, l'expression « écoulement uniforme » désigne généralement un régime uniforme stationnaire.

À l'inverse, un écoulement non uniforme (variable) se caractérise par des variations de ses paramètres. Cela peut se produire dans un canal à section variable ou dans un canal à section constante lorsque la vitesse change le long du parcours. Un écoulement non uniforme peut être

soit stationnaire (paramètres constants dans le temps mais variables dans l'espace), soit non stationnaire (paramètres variables dans le temps et dans l'espace).

I.4.3. Écoulements à variation progressive et à variation rapide :

Un écoulement à variation progressive présente une variation lente de la profondeur, avec une courbure modérée des lignes de courant. Les frottements y jouent un rôle majeur. Exemples : relèvement du niveau d'eau en amont d'un barrage ou baisse progressive après rupture de berge (stationnaire) ; propagation d'une crue (non stationnaire).

Un écoulement à variation rapide se caractérise par des variations importantes de profondeur sur de courtes distances et une forte courbure des lignes de courant. Les frottements y sont négligeables et le phénomène est localisé. Exemples : ressaut hydraulique en aval d'un déversoir.

I.4.4. Écoulement à débit variable spatialement :

Les écoulements à débit variable généralisé (GVF) et régulier (RVF) supposent aucun apport ni retrait d'eau, le volume restant constant. En RVF, le débit est uniforme sur toute la longueur.

Si un apport ou un retrait se produit, on parle d'écoulement à débit variable spatialement (SVF), pouvant être :

- *Stationnaire* : débit variant dans l'espace mais constant dans le temps (ex. : surverse d'un barrage latéral).

- *Non stationnaire* : débit variant dans l'espace et le temps (ex. : ruissellement de pluie).

I.5. REGIMES D'ÉCOULEMENT :

L'écoulement d'un fluide réel en canal ouvert résulte de l'action combinée des forces d'inertie, de gravité et de frottement (viscosité et rugosité).

L'analyse de cet écoulement repose sur des équations de mouvement réduites qui introduisent des coefficients et nombres adimensionnels :

I.5.1. Le nombre de Froude :

Est un nombre sans dimension qui caractérise, dans un écoulement, l'importance relative des forces d'inertie par rapport aux forces de gravité. Il s'exprime comme le rapport entre une vitesse caractéristique du fluide et la vitesse de propagation des ondes de gravité sur la surface libre (Graf et al., 2000).

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gh}} \quad \text{ou :} \quad \begin{array}{l} V : \text{vitesse moyenne du fluide (m/s), } g : \text{accélération de la pesanteur } (\approx 9,81 \text{ m/s}^2), \\ h : \text{la profondeur hydraulique en écoulement à surface libre} \end{array}$$

Le nombre de Froude permet de distinguer trois états fondamentaux de l'écoulement à surface libre

- *Subcritique (fluvial) ($Fr < 1$)*
- *Critique ($Fr = 1$)*
- *Supercritique (torrentiel) ($Fr > 1$)*

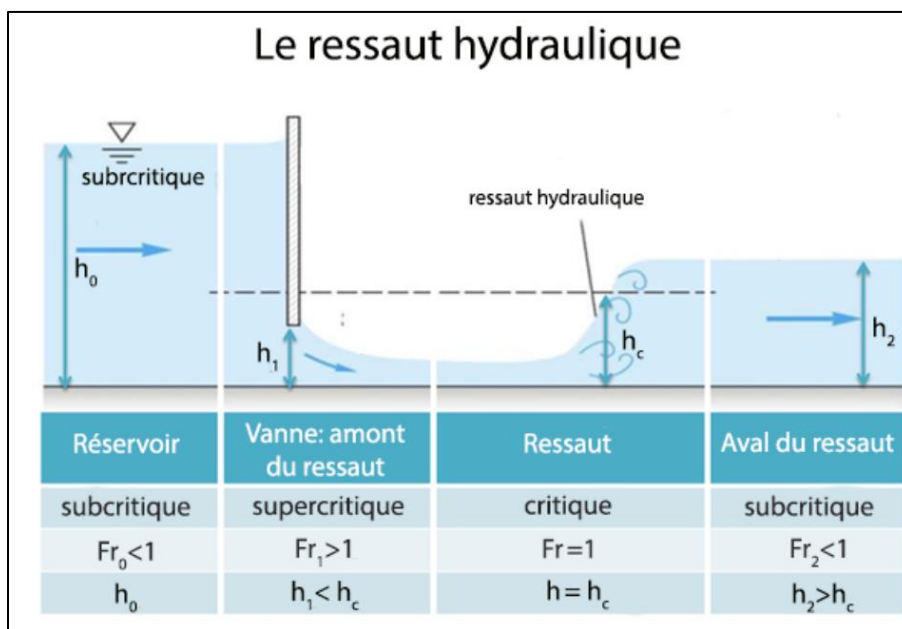


Figure I.1 : Schéma d'un ressaut hydraulique

I.5.2. Le nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimension qui exprime le rapport des forces d'inertie aux forces visqueuses dans un fluide en mouvement.

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu} = \frac{V L}{\nu}$$

ou : ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3) , V : vitesse moyenne de l'écoulement (m/s),

L : longueur caractéristique (m) , μ : viscosité dynamique ($\text{Pa}\cdot\text{s}$), $\nu = \mu/\rho$: viscosité cinématique (m^2/s)

Selon la valeur de Re , on distingue trois régimes d'écoulement :

- *Laminaire : $Re < 2\,000$ (effets visqueux dominants)*
- *Transitoire : $2\,000 \leq Re \leq 4\,000$ (instabilités croissantes)*
- *Turbulent : $Re > 4\,000$ (effets inertiels dominants).*

I.6. LE RESSAUT HYDRAULIQUE

I.6.1. Définition :

Un ressaut hydraulique est un phénomène d'écoulement complexe et une discontinuité de surface qui se produit lors du passage d'un écoulement supercritique à un écoulement subcritique en canal ouvert. Son apparition est influencée par de nombreuses structures hydrauliques, notamment les seuils, les déversoirs, les vannes, les piliers ou les bassins de tranquillisation. Ces structures augmentent la profondeur d'écoulement et permettent la transition de l'écoulement à travers le ressaut hydraulique. Cette transition implique un écoulement hautement turbulent, marqué par des turbulences à grande échelle, des ondes de surface, une dissipation d'énergie et un entraînement d'air, avec des caractéristiques dissipatives importantes (Chanson, 2015).

Le ressaut hydraulique est décrit dans la littérature comme un phénomène qui se produit au moment de la transition entre un écoulement torrentiel et un écoulement fluvial. Il se produit lors d'une élévation abrupte du niveau de l'eau dans une petite région ou lors d'une perte importante de charge hydraulique localisée (Hager & Li, 1992).



Photo I.1 : le ressaut hydraulique dans la nature



Photo I.2 : le ressaut hydraulique dans le laboratoire

I.6.2. Ressaut hydraulique classique

Le ressaut hydraulique est dit classique celui qui se forme dans un canal rectangulaire à section droite, présentant une pente nulle ou très faible. Ce type de ressaut constitue le profil de référence ayant servi de base aux études théoriques et expérimentales du phénomène.

Il se caractérise par : L_r : longueur du rouleau, L_j : longueur totale du ressaut, h_1 et h_2 : hauteurs conjuguées en amont et en aval.

Le rendement de dissipation d'énergie est évalué à partir du rapport entre la perte de charge provoquée par le ressaut et l'énergie initiale de l'écoulement.

Après sa formation, la torrentialité de l'écoulement en amont est définie par un nombre de Froude F_1 supérieur à 1, dépendant du débit et de la première hauteur conjuguée initiale h_1 .

Le comportement du ressaut hydraulique est régi par l'équation de la quantité de mouvement, utilisée pour établir la relation : $Y=h_2/h_1$ entre les hauteurs conjuguées, ainsi que le lien avec le nombre de Froude F_1 (Debabeche, M., 2003)

I.6.3. Classification de ressaut :

Le critère principal de classification est le nombre de Froude F_1 , déterminé à partir des conditions de l'amont. Ce nombre correspond au rapport entre la vitesse de l'écoulement et la vitesse de propagation des ondes ou perturbations dans cet écoulement.

Pour $F_1 \leq 1$: le régime est lent ou critique, et aucun ressaut ne se forme.

Pour $1 < F_1 \leq 1.7$ d'après (Andersen, 1978) : la différence entre les profondeurs conjuguées en amont et en aval est très faible. Le ressaut se manifeste par de légères rides à la surface libre, visuellement proches de celles du régime critique. On parle alors de (figure I.2 a).

Selon la classification de (Bradley & Peterka, 1957), pour des valeurs de $F_1 > 1.7$, on distingue quatre formes classiques de ressaut :

Pré-ressaut ($1.7 < F_1 < 2.5$)

- ✓ Phénomène similaire au ressaut ondulé mais plus marqué.
- ✓ Apparition de petits tourbillons en surface.
- ✓ Surface libre globalement plane, distribution des vitesses régulière.
- ✓ Rendement énergétique très faible. (Figure I.2 b)

Ressaut oscillant ($2.5 < F_1 < 4.5$)

- ✓ Écoulement pulsatoire.
- ✓ Turbulence maximale localisée soit près du fond, soit à la surface. (Figure I.2 c)

Ressaut stable ($4.5 < F_1 < 9$)

- ✓ Ressaut bien formé et localisé.
- ✓ Souvent utilisé dans les bassins de dissipation d'énergie pour son rendement élevé (45 % à 70 %). (Figure I.2 d)

Ressaut agité ou clapoteux ($F_1 > 9$)

- ✓ Présence de masses d'eau qui roulent sous la surface au début du ressaut, retombant ensuite sur le courant rapide amont.
- ✓ Mouvement intermittent provoquant de nouvelles ondulations en aval.
- ✓ Surface libre très irrégulière. (Figure I.2 e)

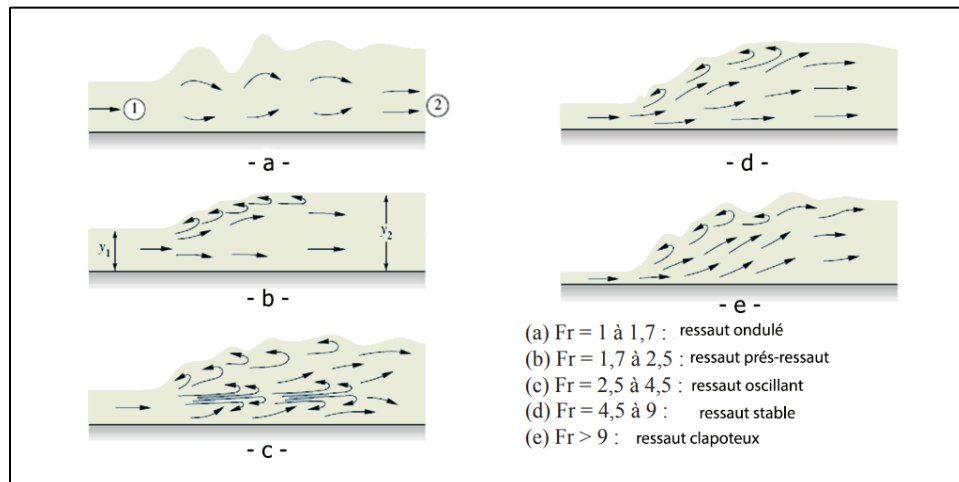


Figure I.2 : Classification des ressauts

I.6.4. Les paramètres hydrauliques du ressaut :

I.6.4.1. Les hauteurs conjuguées du ressaut :

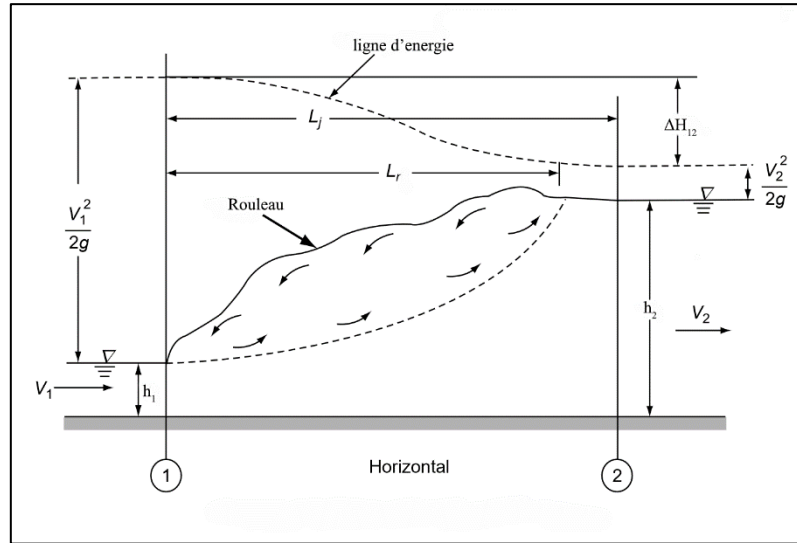


Figure I.3: Ressaut hydraulique classique

Les hauteurs conjuguées désignent les hauteurs d'eau h_1 et h_2 , mesurées respectivement en amont et en aval d'un ressaut hydraulique (figure I.3).

Pour un canal rectangulaire, la relation entre ces deux hauteurs s'établit en appliquant l'équation de la quantité de mouvement à un volume de contrôle compris entre les sections 1 et 2 (figure I.3).

Cette démarche conduit à l'expression, qui permet de déterminer l'une des hauteurs conjuguées (h_1 ou h_2) dès lors que l'autre est connue.

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

Et sachant que $V_1 = Q/A_1$ et $A_1 = bh_1$

L'équation de (Belanger, 1828) liant le rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut au nombre de Froude F_1

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

(Hager et al., 1990) , (Hager & Sinniger, 1985) ont proposé une formule approchée qui s'applique lorsque le nombre de Froude F_1 est supérieur à 2

$$Y^* = \frac{h_2}{h_1} = \sqrt{2} \cdot F_1 - \frac{1}{2}$$

I.6.4.2. Longueurs caractéristiques du ressaut

Les dimensions caractéristiques du ressaut hydraulique, sont la longueur du rouleau (L_r) et son extension totale (L_j), ne peuvent être quantifiées que de manière expérimentale.

I.6.4.2.1. Longueur du rouleau

Le rouleau correspond à une zone de recirculation du fluide, caractérisée en surface par un écoulement vers l'amont. Par conséquent, son extrémité aval est définie par le point où la vitesse horizontale de surface s'annule (Hager et al., 1990). La loi expérimentale suivante, déduite de leurs mesures, permet de calculer la longueur L_r :

$$\lambda_r^* = -12 + 160 \tanh\left(\frac{F_1}{20}\right) \quad \text{pour } w = \frac{h_1}{b} < 0.1$$

$$\lambda_r^* = -12 + 100 \tanh\left(\frac{F_1}{12,5}\right) \quad \text{pour } 0.1 < w = \frac{h_1}{b} < 0.7$$

- $\lambda_r^* = \frac{L_r^*}{h_1}$: longueur relative du rouleau dépend du nombre de Froude F_1
- $w = \frac{h_1}{b}$: rapport d'aspect
- $\tanh$: désigne la tangente hyperbolique.

Les auteurs ont proposé une relation plus simple pour le nombre de Froude compris entre 2,5 et 8 :

$$\frac{L_r^*}{h_1} = 8F_1 - 12 \quad \text{pour } 2,5 < F_1 < 8$$

I.6.4.2.2. Longueur du ressaut

La seconde longueur caractéristique est celle du ressaut, L_j . Plusieurs formules existent pour localiser sa section finale, dont une relation proposée par (Hager et al., 1990) pour l'évaluer.

$$\frac{L_j^*}{h_1} = 220 \tanh\left[\frac{(F_1-1)}{22}\right]$$

Selon (Hager et al., 1990), la longueur relative moyenne L_j/h_2 prend une valeur constante de 6 pour la gamme pratique $4 < Fr_1 < 12$, comme l'indique sa variation en fonction du nombre de Froude amont (Fr_1). Cette valeur reste admise de nos jours.

$$\frac{L_j^*}{h_2} = 6$$

I.7 HISTORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE :

L'étude du ressaut hydraulique, un phénomène fondamental en mécanique des fluides, s'est développée sur plusieurs siècles. Son histoire peut être divisée en grandes périodes.

I.7.1 Les Pionniers (XVe – XIXe Siècle) :

Les premières observations et analyses sont le fait de grands noms des sciences :

- Léonard de Vinci (1452-1519) : Premier à décrire et esquisser le phénomène de manière expérimentale (De Padova & Mossa, 2021).
- Giovanni Battista Venturi (1746-1822) : Observe l'utilité du ressaut pour récupérer de la charge hydraulique en irrigation (Venturi, 1797).
- George Bidone (1781-1839) : Considéré comme le « père » de l'étude systématique du ressaut. Il fut le premier à l'analyser de manière détaillée en laboratoire (Bidone, G, 1819).
- Jean-Baptiste Belanger (1789-1874) : Applique le principe de la quantité de mouvement et établit la première formulation théorique pour le calcul des hauteurs conjuguées (équation de Bélanger), (Belanger, 1828).
- Jacques Antoine Charles Bresse (1822-1883) : Élabore la théorie de la dissipation d'énergie à travers le ressaut (Bresse, 1860).
- Mansfield Merriman (1848-1925) : Établit une des premières expressions empiriques pour les hauteurs conjuguées basée sur des essais en laboratoire (De Padova & Mossa, 2021).

I.7.2 Fondements Modernes (Début du XXe Siècle – Seconde Guerre Mondiale) :

Cette période voit la quantification des paramètres du ressaut (longueur, hauteurs, dissipation) et l'introduction du nombre de Froude comme paramètre maître.

- Gibson : Détermine expérimentalement les hauteurs conjuguées et un facteur de correction de vitesse pour des nombres de Froude allant jusqu'à 8,6 (Hager & Castro-Organ, 2020).
- Kennison : Utilise l'équation de l'énergie pour présenter les hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude sur un diagramme adimensionnel, une première (De Padova & Mossa, 2021).
- (Stevens, J. C., 1925) : Décrit la dissipation d'énergie.
- Safranez (1927-1933) : Meneur européen qui réalise de nombreuses études. Il propose des diagrammes adimensionnels, une relation empirique pour un large gamme de Fr , et une formule pour la puissance dissipée et la longueur du rouleau (Safranez, K., 1927).
- (Bakhmeteff & Matzke, 1936) : Intègrent le carré du nombre de Froude (facteur d'écoulement cinétique) dans une théorie cohérente du ressaut.
- (Citrini, D., 1939) : Synthétise dans sa thèse l'ensemble des connaissances sur le ressaut à la veille de la guerre.

I.7.3 L'Âge d'Or et la Classification (Années 1950-1980) :

Les recherches se diversifient avec l'étude des bassins de dissipation, des ressauts forcés et de l'influence de la géométrie.

- (Bradley & Peterka, 1957) : Leurs travaux de l'USBR permettent de déterminer la longueur du ressaut et de classer ses formes (ressaut oscillant, etc.) pour le dimensionnement des bassins.
- (Chow, 1959) : Dans son ouvrage fondamental "Open-Channel Hydraulics", il consacre un chapitre complet et clair au ressaut hydraulique.
- (Rajaratnam, 1965) : Un des grands contributeurs modernes. Il étudie le ressaut sur fond rugueux, trace de nouveaux diagrammes adimensionnels pour le profil de surface et analyse divers types de ressauts.
- Analyse des écoulements : Les études se penchent sur la turbulence (Resch & Leutheusser, 1971), les pressions dynamiques (Abdul Khader & Elango, 1974).

Études sur les configurations spécifiques :

- Ressaut contrôlé par une marche (positive ou négative) : (Forster & Skrinde, 1950) initient les études, suivis par (Moore & Morgan, 1959), (Sharp, J. J., 1974), et enfin (Hager et al, 1985, 1986, 1987) qui analysent de manière exhaustive le ressaut dans ces configurations et dans des canaux triangulaires.
- Ressaut forcé par des blocs et seuils dentés : Les études (Harleman, D.R.F., 1959), (Pillai, N. S., & Unny, T. E., 1964), (Rand, 1965), (Basco, D. R., 1971) visent à optimiser la forme et la position des blocs pour maximiser la dissipation et minimiser l'érosion.
- Ressaut forcé par un seuil continu : (Forster & Skrinde, 1950), (Shukry, 1957), et surtout Rand (années 1960-70) qui classifie le phénomène. Les travaux se poursuivent sur la répartition des vitesses (Rajaratnam & Murahari, 1971), les pressions (Narayanan & Schizas, 1980).

I.7.4 Recherches Contemporaines (récents) :

Les recherches récentes se focalisent sur des géométries complexes et des effets spécifiques.

- (Achour et al., 2002) : Ressaut sur seuil mince en canal rectangulaire lisse (deux configurations).

- (Debabeche & Achour, 2007): Influence des seuils sur ressaut en canal triangulaire.
- (Kateb, S., 2006) : Ressaut en canal triangulaire rugueux.
- (Ghomri, A., 2012) : Effet de la rugosité du fond en canal profilé en « U ».
- (Riguet, F., 2021) : Ressaut en canal rectangulaire de forme composée.
- (Djamaa, W., 2022) : Ressaut en canal rectangulaire de forme composée lit mineur rugueux.
- (Lacheheb, S., 2023) : Ressaut en canal rectangulaire de forme composée lit majeur rugueux.
- (Nouacer, B., 2023) : Ressaut en canal rectangulaire rugueux avec pente.
- (Brahimi, A., 2024) : Effet de la rugosité du fond en canal rectangulaire.

I.8 CONCLUSION :

Ce chapitre a présenté une introduction aux généralités de l'écoulement à surface libre. La définition du ressaut hydraulique et ses caractéristiques fondamentales, à savoir : la hauteur initiale, la hauteur finale, la longueur totale et la longueur du rouleau de surface. Il a ensuite été établi que le ressaut hydraulique obéit à l'équation de la quantité de mouvement appliquée entre ses sections amont et aval, en négligeant toutes les pertes de charge autres que celles engendrées par le ressaut lui-même, en s'appuyant sur les fondements théoriques établis par Bélanger. Enfin, un historique bref a retracé les origines de son étude et mis en lumière les contributions de ses principaux pionniers.

Chapitre II

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composée avec lit majeur rugueux

II.1 INTRODUCTION :

Ce chapitre s'examinera sur l'étude réalisée par (Lacheheb, S., 2023) concernant le phénomène de ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à section composée avec un lit majeur rugueux, abordée à la fois d'un point de vue théorique et expérimental. L'approche théorique est basée sur la fonction $f(Y, F_1, Cr, \beta, \tau)$, dans laquelle F_1 désigne le nombre de Froude incident, Cr le coefficient de frottement, β le rapport d'élargissement, τ le rapport d'aspect et Y le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique. Par ailleurs, une étude expérimentale a été entreprise afin de confirmer la validité de l'approche semi-théorique développée.

II.2 ÉLABORATION DE L'APPROCHE THEORIQUE :

II.2.1 Analyse théorique :

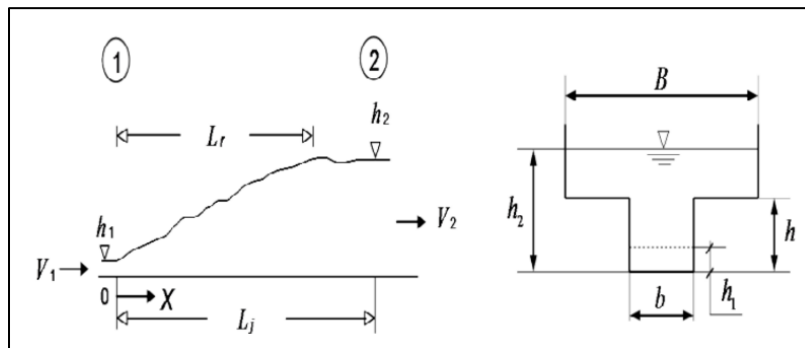


Figure II.1 : Schématisation du ressaut généré par une paroi mince dans un canal rectangulaire de forme composée avec un fond lisse. (Lacheheb, S., 2023)

Le schéma ci-dessus illustre la transition de l'écoulement en régime torrentiel à l'écoulement en régime fluvial dans un canal rectangulaire composé rugueux. Cette étude met également en évidence les profondeurs en amont et en aval de cet écoulement établi. Pour élaborer l'approche théorique régissant ce type d'écoulement, il est essentiel de respecter rigoureusement les conditions d'application des théories d'Euler. Ces conditions permettent de simplifier la résolution mathématique et de développer une relation empirique adimensionnelle.

II.2.2 L'établissement de la relation adimensionnelle selon Euler :

La formulation des écoulements développés est établie en appliquant la théorie d'Euler à un système précisément défini pendant une période donnée Δt . Cette relation correspond aux forces hydrostatiques appliquées à la masse d'eau.

$$\Delta P = \sum F_{\text{ext}} \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

ΔP : est la variation engendrée par la quantité de mouvement appliquée (kg.m. s^{-1})

$\sum F_{\text{ext}}$: les différentes forces hydrostatiques appliquées aux sections déterminées (N) .

Δt : Le laps du temps (s)

L'équation (2.1) devient :
$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \sum F_{ext} \quad (2.2)$$

Sachant que :
$$P = \rho \cdot V \cdot v \quad (2.3)$$

ρ : Masse spécifique (kg/m³)

V : volume du liquide (m³)

v : vitesse d'écoulement (m/s)

P : La quantité de mouvement (N)

L'expression de la variation de la quantité de mouvement d'Euler entre les deux sections du ressaut hydraulique est la suivante :
$$\Delta P = \Delta P_2 - \Delta P_1 \quad (2.4)$$

Avec
$$\Delta P_1 = \rho v_1 \Delta V \quad (2.5)$$

$$\Delta P_2 = \rho v_2 \Delta V \quad (2.6)$$

v_1 et v_2 : vitesses d'écoulement au niveau des deux sections d'écoulement, L'expression (2.4) divisée par Δt , on aura ce qui suit :

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} v_2 - \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} v_1 \quad (2.7)$$

Le débit volumique est d'expression suivante :
$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.8)$$

Donc

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \rho Q v_2 - \rho Q v_1 \quad (2.9)$$

En suit en remplaçant en relation (2.2) on aura :

$$\rho Q v_2 - \rho Q v_1 = \sum F_{ext} \quad (2.10)$$

L'équation (2.10) dérivée représente la formulation générale de la théorie d'Euler applicable aux écoulements à travers des sections de passage brusquement variées.

Ainsi, la relation d'Euler peut être utilisée entre deux sections d'un ressaut développé de la manière suivante :

$$\rho Q (P_2 V_2 - P_1 V_1) = f_1 - f_2 \quad (2.11)$$

En injectant la force de résistance f_R dans (2.11), on aura :

$$\rho \cdot Q^2 \cdot (1/A_2 - 1/A_1) = f_1 - f_2 - f_R \quad (2.12)$$

A_1 et A_2 sont données respectivement par :

$$A_1 = bh_1 \quad (2.13)$$

$$A_2 = B(h_2 - h) + bh \quad (2.14)$$

Les forces f_1 et f_2 sont données respectivement par :

$$f_1 = \bar{\omega} \cdot \left(\frac{h_1}{2}\right) \cdot b \cdot h_1 \text{ et } f_2 = \bar{\omega} \cdot \left(h_2 - \frac{h}{2}\right) \cdot b \cdot h + \bar{\omega} \cdot \left[\frac{(h_2 - h)}{2}\right] \cdot B \cdot (h_2 - h) \quad (2.15)$$

La formule de l'impulsion de frottement, résultant du facteur de rugosité observé sur le banc d'essai, s'exprime ainsi :

$$f_R = C\rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g}\right) \cdot p \quad (2.16)$$

Où :

- g : L'accélération gravitationnelle (m/s²) ;
- L_j : La longueur du ressaut hydraulique (m) ;
- C : Le coefficient dû à la rugosité imposé () ;
- p : Le périmètre mouillé rugueux du canal ($p=B+b$)(m) ;
- ρ : La masse spécifique de l'eau (Kg/m³),
- Q : Le débit spécifique (m³/s).

En remplaçant les surfaces et les forces par leurs expressions, l'équation (2.13) s'écrit comme suit :

$$\rho \cdot Q^2 \cdot \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh}\right) = \bar{\omega} \cdot \left(h_2 - \frac{h}{2}\right) \cdot b \cdot h + \bar{\omega} \cdot \left[\frac{(h_2 - h)}{2}\right] \cdot B \cdot (h_2 - h) - \bar{\omega} \cdot \left(\frac{h_1}{2}\right) \cdot b \cdot h_1 + C\rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g}\right) \cdot p \quad (2.13)$$

On multiplie les deux membres de l'équation (2.13) par $(1/\bar{\omega})$ on obtient ce qui suit :

$$\frac{Q^2}{g} \cdot \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh}\right) = \left(h_2 - \frac{h}{2}\right) \cdot b \cdot h + \left[\frac{(h_2 - h)}{2}\right] \cdot B \cdot (h_2 - h) - \left(\frac{h_1}{2}\right) \cdot b \cdot h_1 + g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g}\right) \cdot p \quad (2.14)$$

Les deux membres de l'équation (2.14) sont multipliés par $(1/bh_1^2)$ on déduit après le réarrangement ce qui suit :

$$2F_1^2 \left(1 - \left(\frac{1}{2} \cdot \frac{LjC}{h_1} \cdot \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)\right) - \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}}\right) = \frac{(2Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1 \quad (2.17)$$

$$\text{Où : } F_1 = Q/\sqrt{b^2 h_1^3 g} \quad \text{et} \quad C_r = \frac{LjC}{h_1}$$

En remplaçant l'expression $\left(\frac{1}{2} \cdot \frac{LjC}{h_1} \cdot \left(\frac{1}{\beta} - 1\right)\right)$ dans l'approche (2.17) on déduit ce qui suit :

$$2F_1^2 \left(1 - Cr - \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \right) = \frac{(2.Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1 \quad (2.18)$$

$$F_1^2 (1 - Cr) = \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} + \frac{\frac{(2.Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1}{2} \quad (2.19)$$

Il est à noter que cette approche est semi-théorique, car le paramètre Cr est déterminé indirectement à partir des mesures expérimentales. Par ailleurs, l'approche proposée par Khataoui et Achour (2012) est issue de l'équation (2.19) dans le cas où le paramètre Cr tend vers zéro. Cette dernière contrôle la transition entre les deux régimes d'écoulement dans un canal composé lisse.

$$2F_1^2 \left(1 - \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \right) = \frac{(2.Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1 \quad (2.20)$$

II.3. SYNTHESE DES RESULTATS :

II.3.1. Étude du paramètre Cr en fonction de $(\varepsilon/B-b)$:

La détermination du paramètre Cr est réalisée à partir des données mesurées en laboratoire, comme le montre l'illustration de la figure (2.2) relative à la fluctuation de l'expression :

$f(Y) = \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} + \frac{\frac{(2.Y-1/\tau)}{\tau} + \frac{(Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1}{2}$ en fonction de F_1^2 pour 04 rugosités réalisées : ε (mm) = 06 ; 08 ; 10 et 12.

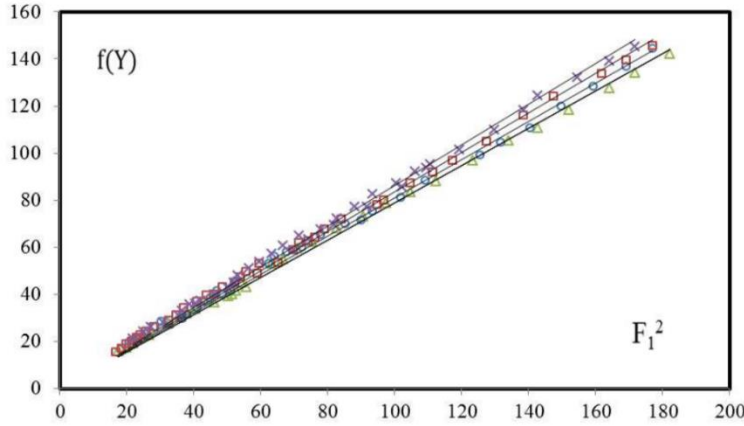


Figure II.2 : Variation $f(Y)$ en fonction de F_1^2

ε (mm) = (x)06, (□)08, (○)10 et (Δ)12 (Lacheheb, S., 2023)

La figure (II.2) présente quatre nuages distincts, chacun correspondant à un rapport $\varepsilon/(B-b)$. L'analyse des mesures expérimentales de cet écoulement de transition révèle que chaque allure pourrait être décrite par l'expression suivante :

$$\frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} + \frac{\frac{(2Y-1/\tau) + (Y-1/\tau)^2}{\tau} - 1}{2} = S F_1^2 \quad (2.21)$$

Le facteur "S" est défini comme le paramètre (1-Cr). Les résultats de l'analyse de Cr sont répertoriés dans le tableau 2.1.

Tableau II.1 : Récapitulation des coefficients Cr

$\varepsilon/(B-b)$	Cr	R ²
0,06	0,13	0,99
0,08	0,16	0,99
0,10	0,18	0,99
0,12	0,21	0,99

Les valeurs obtenues indiquent que le facteur Cr varie en fonction de l'importance du rapport ($\varepsilon/(B-b)$). La corrélation entre les couples de mesures ($\varepsilon/(B-b)$, Cr) nous amène à l'approche suivante :

$$\text{Cr} = 1,896 (\varepsilon/B-b).$$

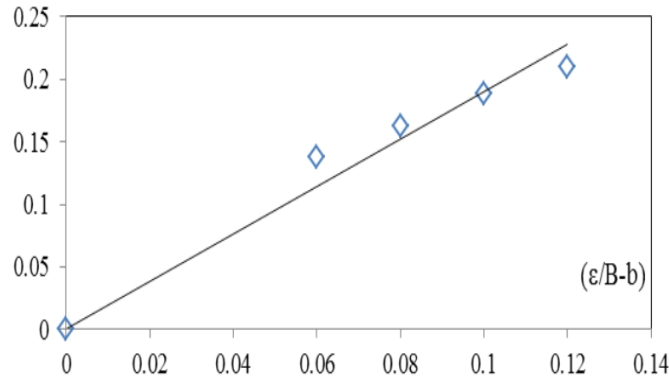


Figure II.3 : Evolution du paramètre Cr avec $\varepsilon/(B-b)$ (Lacheheb, S., 2023)

En faisant introduire l'expression de Cr dans l'expression (2.21) :

$$F_1^2 (1 - 1,896(\varepsilon/B - b)) = \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} + \frac{\frac{(2Y-1/\tau) + (Y-1/\tau)^2}{\tau} - 1}{2} \quad (2.22)$$

La figure (2.4) présente une comparaison entre les deux expressions suivantes : $f(y_1, y_2) = \xi(\varepsilon/(B-b), F_1)$. Cette illustration met en évidence que la plupart des données expérimentales sont en étroite corrélation avec la bissectrice, ce qui confirme leur fiabilité.

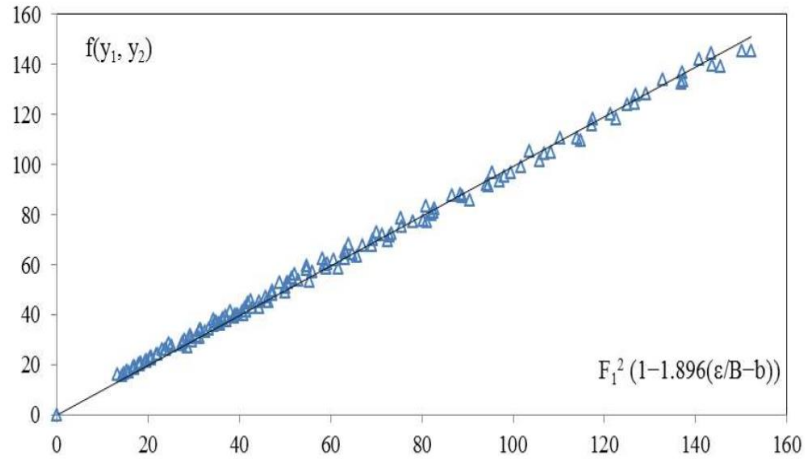


Figure II.4 : Illustration de $f(y_1, y_2)$ variant avec $F_1^2 (1 - 1.896 \varepsilon / (B - b))$

(Δ) mesures d'essai obtenues. (Lacheheb, S., 2023)

II.3.2. La variation du rapport $Y = h_2/h_1$ des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction des paramètres Cr et du nombre de Froude Fr :

L'approche (2.22) obtenue étant implicite, nous avons examiné les mesures expérimentales du rapport Y en lien avec l'expression qui intègre le coefficient de résistance Cr et le nombre de Froude Fr . Cette analyse a abouti à une approche explicite permettant de déterminer directement le rapport Y . La figure (2.5) illustre la corrélation des données expérimentales.

$$Y = 1.45 F_1^{0.957} (1 - Cr)^{0.478} \quad (2.23)$$

$$0,00 \leq \varepsilon/B - b \leq 0,12$$

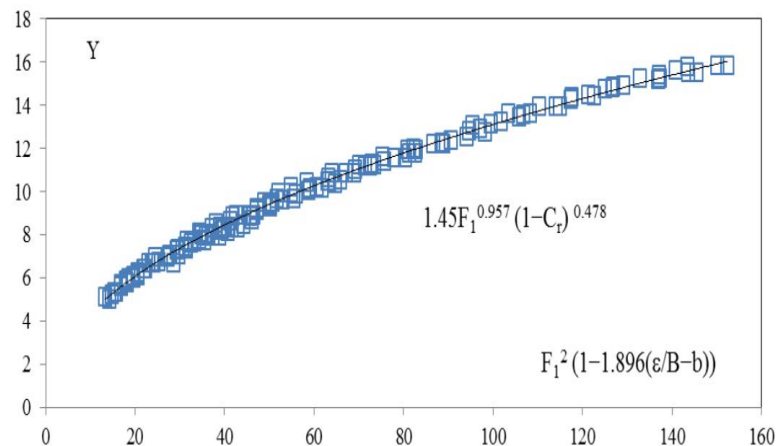


Figure II.5 : Illustration du Y avec de $F_1^2 (1 - Cr)$

(□) motifs d'essai. (Lacheheb, S., 2023)

L'illustration ci-dessous met en évidence la comparaison entre les deux expressions, à savoir le rapport Y expérimental et l'approche explicite. On observe que les résultats expérimentaux s'alignent étroitement autour de la bissectrice, confirmant ainsi la validité de cette dernière.

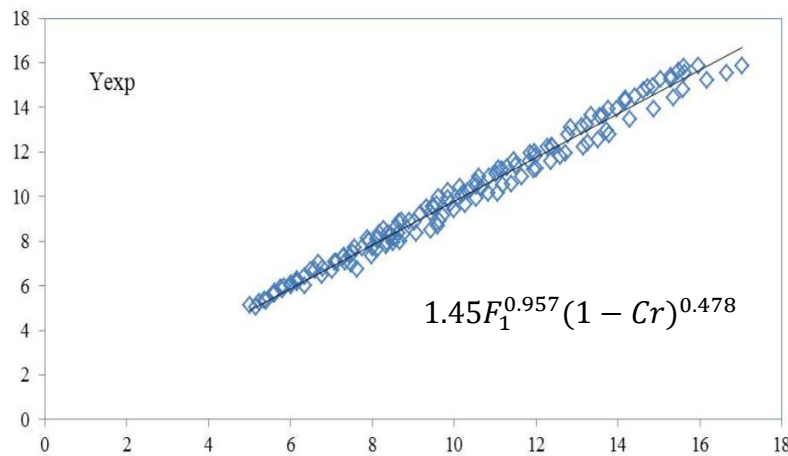


Figure II.6 : Illustration du Y avec l'approche (2.22)

(□) motifs d'essai. (Lacheheb, S., 2023)

II.4. CONCLUSION

Dans le cadre du deuxième axe, qui correspond au deuxième chapitre théorique, nous avons étudié l'impact du paramètre de rugosité sur les caractéristiques de l'écoulement. Tout d'abord, nous avons analysé expérimentalement l'approche semi-théorique afin de développer une approche explicite homologue pour le rapport Y . Cette nouvelle fonction explicite permet d'évaluer directement cette caractéristique d'écoulement, laquelle dépend du coefficient de résistance Cr et du nombre de Froude Fr , appliqués au lit majeur du canal rectangulaire composé. Par la suite, nous avons établi une corrélation entre tous les résultats expérimentaux du rapport Y et ceux provenant de l'approche empirique adimensionnelle développée, notée Y_{app} , qui dépend également de Fr et Cr . Cette corrélation a confirmé la validité de l'approche théorique obtenue ainsi que la fiabilité des mesures expérimentales réalisées en laboratoire. En conséquence, l'erreur relative entre les valeurs déduites des deux expressions reste majoritairement inférieure à 5 %.

II.5 ANALYSE EXPERIMENTALE :

Dans le cadre de cette première partie, qui correspond au deuxième chapitre entièrement expérimental, nous examinons les écoulements se produisant dans un canal rectangulaire à section composé avec un lit majeur rugueux. Cette approche empirique vise à établir des expressions fonctionnelles adimensionnelles qui peuvent être utilisées pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

II.5.1 Description de l'installation expérimentale :

Pour aborder la phase d'expérimentation, il est essentiel de présenter un aperçu explicatif du banc d'essai ainsi que de décrire les instruments et équipements utilisés au laboratoire.

Les essais ont été réalisés sur un banc de 10 m de long, 0,5 m de haut, avec parois en plexiglas. Il comporte deux sections superposées de 4 m de long, 0,20 m de haut, 0,15 m de large au lit mineur et 0,25 m au miroir.

Le prototype, conçu pour étudier les écoulements brusques, est équipé d'instruments permettant de mesurer les dimensions nécessaires aux calculs adimensionnels.

Le régime torrentiel est généré par des ouvertures calibrées dans une boîte sous pression. Des parois spécifiques assurent la transition entre écoulement rapide et calme. Le débit est fourni par une pompe dépassant 55 l/s.

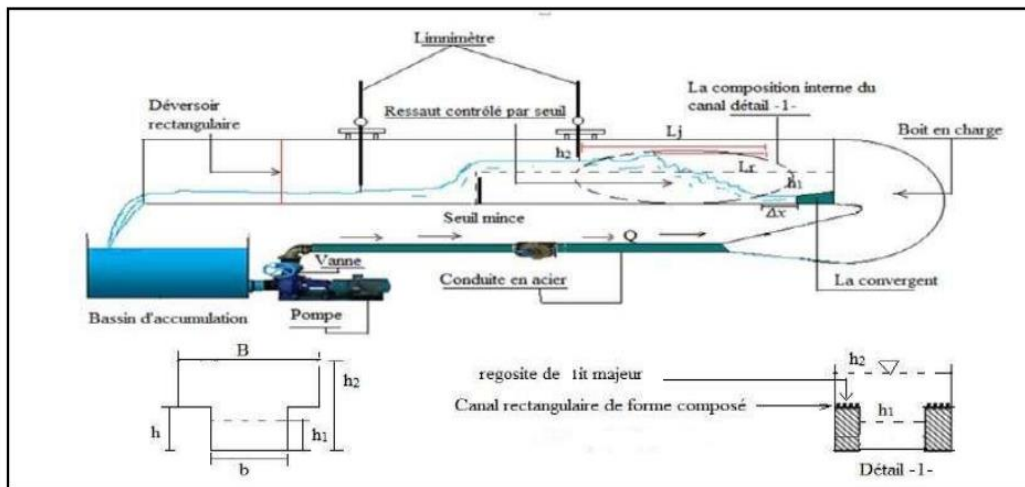


Figure II.7: vue du canal d'essai (Lacheheb, S., 2023)

II.5.2 Instruments utilisés aux mesures :

II.5.2.1 Mesure des débits volumiques :



Photo II.1 : dispositif de mesure des débits volumiques

Le dispositif de mesure des débits présente : largeur d'échancrure 11 cm, largeur au miroir 25 cm. Relié directement à l'aval du canal de forme composé rugueux, il a été validé par (Hachemi Rachedi, L., 2006) dans des conditions précises. Conçu pour mesurer les débits volumiques par une lame déversante et un limnimètre, la hauteur relevée est insérée dans la formule (2.24) pour obtenir la valeur du débit.

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g\beta}(1 + 0,16496\beta^{2,0716})^{3/2} h_{dev}^{3/2} \quad (2.24)$$

II.5.2.2 Instrument limnimétrique :



Photo II.2 : appareillage de lecture des profondeurs

II.5.2.3 Déroulement expérimental :

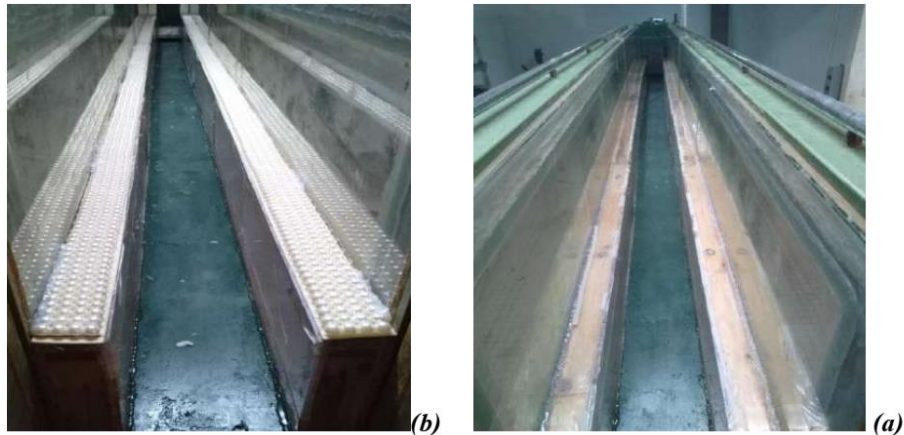


Photo II.3 : b) section composée rugueuse a) section composée lisse

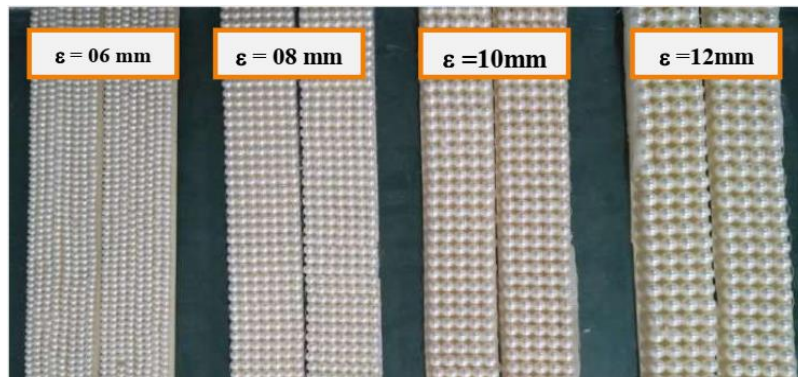


Photo II.3 : Les divers tapies rugueux

Les essais menés au laboratoire ont porté sur des écoulements brusques, générés et contrôlés au sein d'un banc d'expérimentation à section composée et lit majeur rugueux. Différentes ouvertures h_1 ont été testées.

Après la conception des seuils de contrôle, la formation des écoulements de transition entre les deux régimes dépend de l'emplacement de ces dispositifs minces, disposés en travers de l'écoulement, avec une hauteur et une position fixée.

Pour chaque formation de ressaut, les paramètres essentiels sont relevés :

- la longueur de l'écoulement,
- le nombre de Froude,
- le débit volumique pompé.

Ces données dimensionnelles permettent ensuite de calculer les rapports adimensionnels correspondants.

- Le nombre de Froude $F_1 = \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2h_1^3}}$
- $Y=h_2/h_1$ rapport des profondeurs ;
- $S = s/h_1$ rapport relatif du seuil ;
- L_j/h_1 rapport de longueur relative ;
- L_r/h_1 rapport de longueur du rouleau ;
- ε/B rapport de la rugosité relative.

II.5.4 Etude de variation des caractéristiques de l'écoulement

II.5.4.1 Analyse du rapport L_j/h_1 de la longueur relative du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude Fr :

La figure II.8 montre de manière évidente que le rapport L_j/h_1 de la longueur relative du ressaut évolue en fonction du paramètre F_1 pour les divers facteurs de résistance examinés : ε (mm) = 0,00 ; 6 ; 8 ; 10 et 12, appliqués au lit majeur.

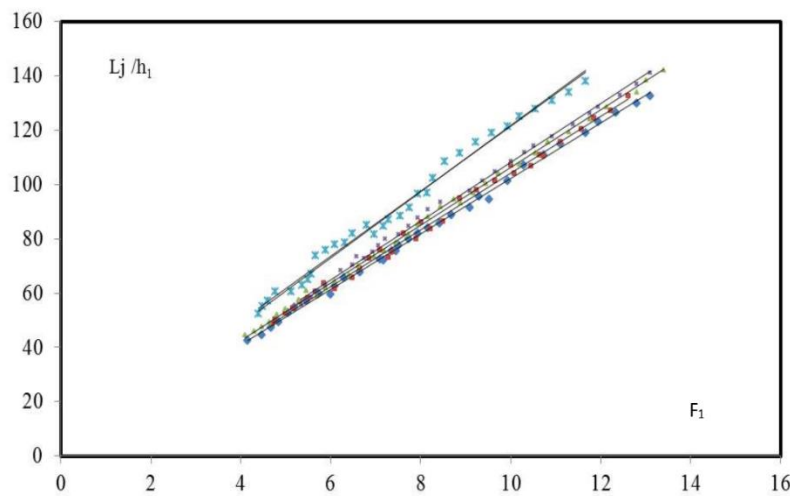


Figure II.8 : Illustration de L_j/h_1 variant avec Fr .

ε (mm) = (♦)06, (■)08, (▲)10 et (×)12 et (*)00

(—) Courbes de corrélation (Lacheheb, S., 2023)

Cette illustration met en évidence la variation du rapport L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude Fr , pour cinq valeurs de rugosité équivalente, chacun étant associé à une tendance distincte correspondant à une rugosité spécifique. L'analyse de ces données expérimentales aboutit à des courbes linéaires de la forme : $L_j/h_1 = a_1(F_1)$. On observe également que l'augmentation du rapport L_j/h_1 de la longueur relative du ressaut est liée à une augmentation du nombre de Froude. Pour un

F_r donné, la longueur caractéristique L_j de l'écoulement diminue à mesure que le facteur de rugosité ε augmente.

Les résultats de cette corrélation sont récapitulés dans le tableau II.2

Tableau II.2 : Facteur a_1 de corrélations

$\varepsilon/(B-b)$	a_1	R^2
0,12	10,23	0,99
0,10	10,43	0,99
0,08	10,62	0,99
0,06	10,81	0,99
0,00	12,18	0,99

L'analyse des mesures expérimentales des couples de valeurs $(\varepsilon/(B-b), a_1)$ conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_1 = -16.33(\varepsilon/(B-b)) + 12.033$

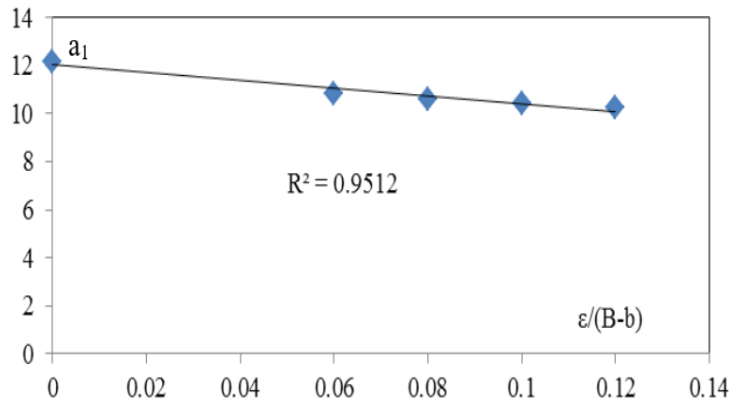


Figure II.9 : Corrélation du facteur a_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ (Lacheheb, S., 2023)

L'analyse de la corrélation entre le paramètre a_1 et le rapport $\varepsilon/(B-b)$ a permis d'établir une relation explicite de type linéaire : $a_1 = -16,33(\varepsilon/(B-b)) + 12,033$, avec un coefficient de détermination satisfaisant : $R^2 = 0,9512$. En définitive, la relation générale adimensionnelle reliant le paramètre F_1 et le rapport $\varepsilon/(B-b)$ s'exprime comme suit :

$$\frac{L_j}{h_1} = \left(-16.33 \cdot \frac{\varepsilon}{B-b} + 12.033 \right) \cdot F_1 \quad (2.25)$$

$$0,00 \leq \frac{\varepsilon}{B-b} \leq 0,12$$

La justification de la comparaison entre l'approche globale obtenue $L_j/h_{1 \text{ app}}$ avec $L_j/h_{1 \text{ exp}}$ est illustrée par la figure (II.10). Par conséquent, la première bissectrice confirme de manière satisfaisante les mesures expérimentales ayant conduit à cette approche fonctionnelle adimensionnelle.

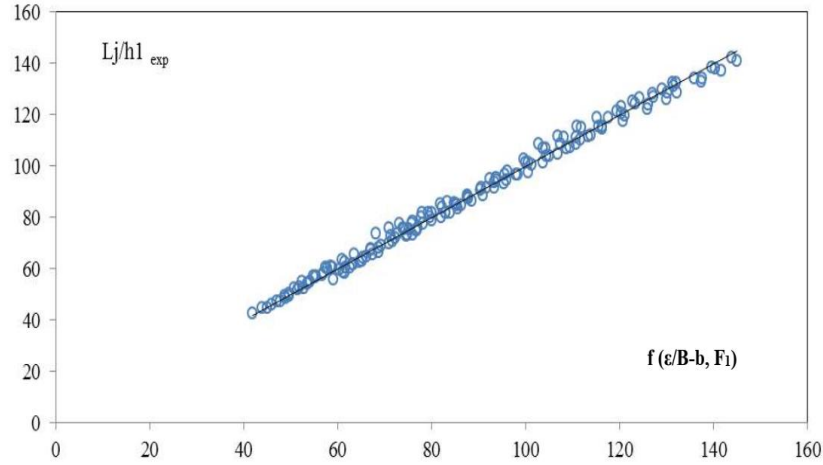


Figure II.10 : Comparaison entre Lj/h_1 expérimentale et l'approche globale $f(\varepsilon/(B-b), F_1)$ (Lacheheb, S., 2023)

II.5.4.2 Analyse de Lr/h_1 de la longueur relative du rouleau avec le facteur F_1 :

La figure (II.11) illustre clairement la corrélation entre le rapport Lr/h_1 et le paramètre F_1 pour différentes rugosités absolues : ε (mm) = 0,00 ; 6 ; 8 ; 10 et 12, appliquées au lit majeur. Elle met en évidence l'évolution du rapport Lr/h_1 en fonction du nombre de Froude Fr pour cinq rugosités absolues, avec cinq nuages de points distincts correspondant chacun à une rugosité spécifique. L'interprétation de ces mesures conduit à l'obtention de courbes linéaires exprimées sous la forme : $Lr/h_1 = a_2(F_1)$. On observe également que l'élévation du rapport Lr/h_1 provoque une augmentation du nombre de Froude. Ainsi, pour un paramètre de régime F_1 donné, la caractéristique Lr de l'écoulement s'abaisse avec l'importance du facteur rugosité ε .

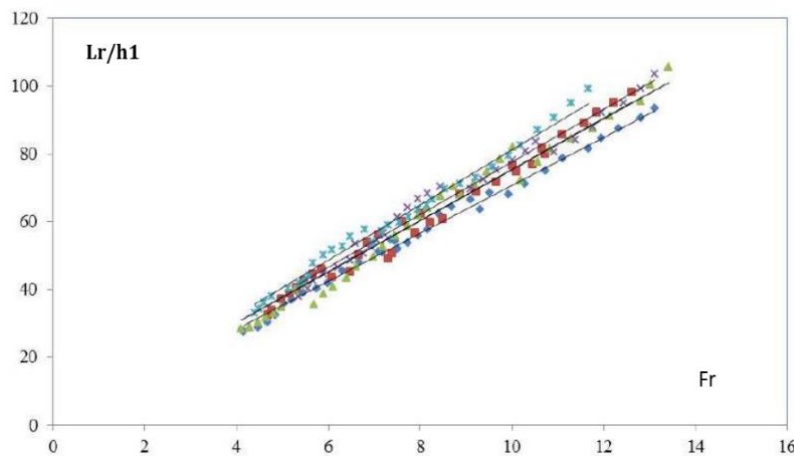


Figure II.11 : Illustration de Lj/h_1 variant avec Fr .

ε (mm) = (♦) 12, (■) 10, (▲) 08, (×) 06 et (*) 00
(—) Courbes de corrélation. (Lacheheb, S., 2023)

Les résultats de cette corrélation sont récapitulés dans le tableau (II.3)

Tableau II.3 : Facteur a_2 de corrélations

$\varepsilon/(B-b)$	a_2	R^2
0,12	7,07	0,99
0,10	7,53	0,98
0,08	7,53	0,98
0,06	7,75	0,99
0,00	8,12	0,99

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs $(\varepsilon/(B-b), a_2)$ conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_2 = -7.8875(\varepsilon/(B-b)) + 8.1684$ (3.2)

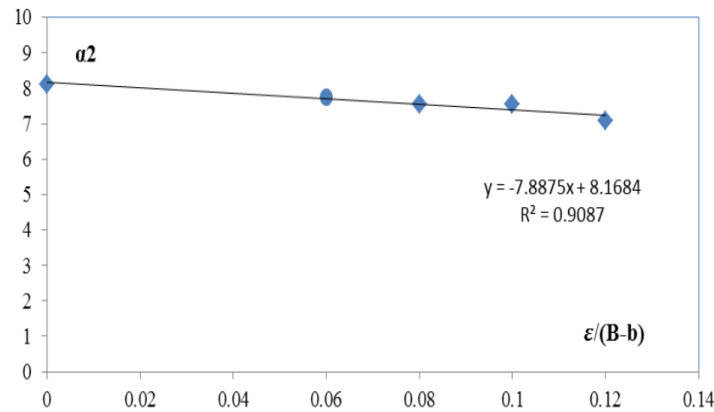


Figure II.12 : Corrélation du facteur a_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$ (Lacheheb, S., 2023)

L'analyse de la corrélation entre le paramètre a_2 et le rapport $\varepsilon/(B-b)$ a permis d'établir une relation explicite de type linéaire : $a_2 = -7.8875(\varepsilon/(B-b)) + 8.1684$, avec un coefficient de détermination satisfaisant : $R^2 = 0,9087$. Finalement, la relation générale adimensionnelle reliant le paramètre F_1 et le rapport $\varepsilon/(B-b)$ s'exprime comme suit :

$$\frac{Lr}{h_1} = \left(-7.8875 \cdot \frac{\varepsilon}{B-b} + 8.1684 \right) \cdot F_1 \quad (2.26)$$

$$0,00 \leq \frac{\varepsilon}{B-b} \leq 0,12$$

La comparaison entre l'approche globale obtenue Lr/h_{1app} et Lr/h_{1exp} est illustrée par la figure (II.13). Ainsi, la première bissectrice confirme de manière précise les mesures expérimentales obtenues au laboratoire. Cette approche fonctionnelle adimensionnelle à caractère générale.

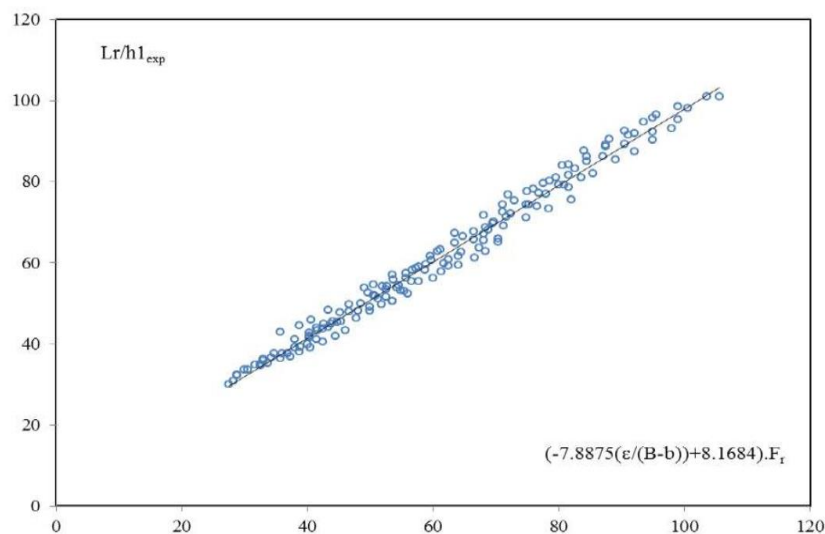


Figure II.13 : Comparaison entre Lr/h_1 expérimentale et l'approche empirique $f(e/(B-b), F_1)$ (Lacheheb, S., 2023)

II.5.4.3 Étude du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut Y en fonction du F_1 :

Cette figure II.14 illustre clairement la corrélation entre Y avec le facteur le nombre de Froude F_1 , pour diverses rugosités examinées, appliquées au lit majeur rugueux avec les profondeurs dépassant 20 cm jusqu'au 50cm.

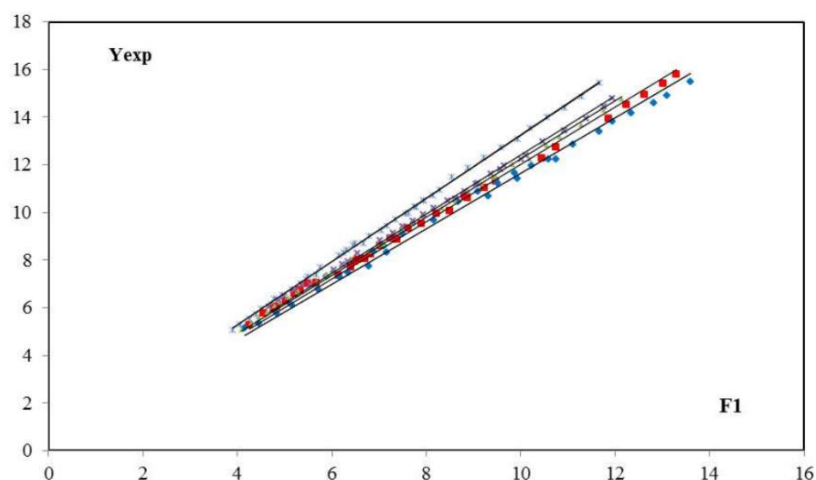


Figure II.14 : Illustration des mesures entre Y et F_1 pour cinq rugosités examinées :

ε (mm) = (♦)12, (■)10, (▲)08, (×)06 et (*)00 (Lacheheb, S., 2023)

Cette illustration met en évidence cinq tendances distinctes, chacune correspondant à une rugosité spécifique. La corrélation des mesures obtenues en laboratoire conduit à des approches de la forme $Y = a_3(F_1)$.

Les résultats de cette corrélation sont synthétisés dans le tableau II.4.

Tableau II.4 : Facteur a_3 de corrélations

$\varepsilon/(B-b)$	a_3	R^2
0,12	1,16	0,99
0,10	1,20	0,99
0,08	1,23	0,99
0,06	1,24	0,99
0,00	1,32	0,99

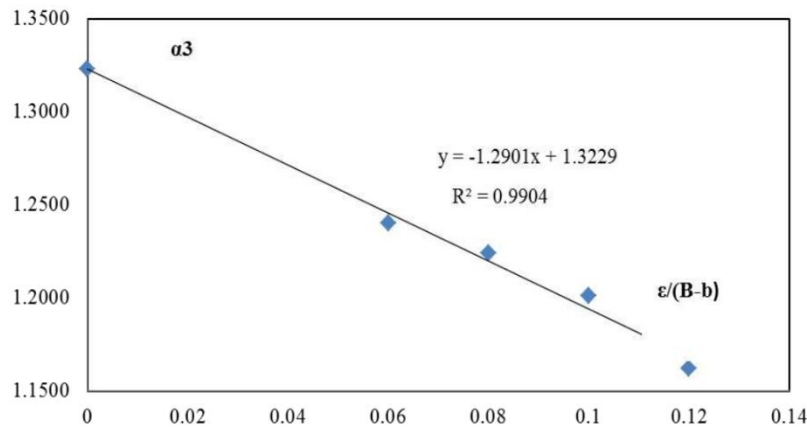


Figure II.15 : Corrélation du facteur a_3 avec $\varepsilon/(B-b)$ (Lacheheb, S., 2023)

L'analyse de la corrélation entre le paramètre a_3 et le rapport relatif $\varepsilon/(B-b)$ a permis d'établir une relation explicite de type linéaire : $a_3 = -1,290 (\varepsilon/(B-b)) + 1,322$, avec un coefficient de détermination satisfaisant : $R^2 = 0,990$. Par conséquent, la relation générale adimensionnelle reliant Y , le paramètre F_1 et le rapport $\varepsilon/(B-b)$ s'exprime comme suit :

$$Y = (-1,290 \cdot \varepsilon/(B-b) + 1,322) \cdot F_1 \quad (2.27)$$

$$0,00 \leq \frac{\varepsilon}{B-b} \leq 0,12$$

La comparaison entre l'approche globale obtenue Y_{app} et Y_{exp} est illustrée par la figure (II.16). Ainsi, la première bissectrice confirme de manière précise les mesures expérimentales obtenues au laboratoire qui ont sous-tendu cette approche fonctionnelle adimensionnelle à caractère générale.

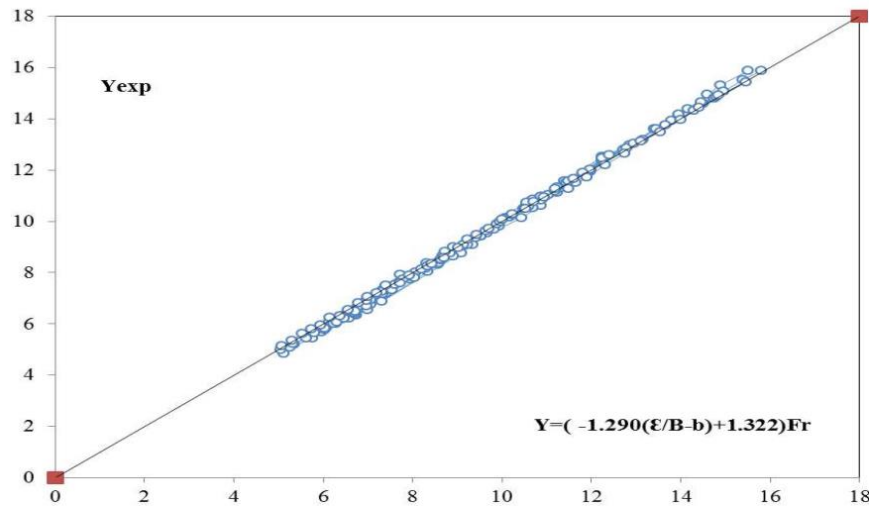


Figure II.16 : Rapport Y en fonction $f(\epsilon/(B-b), F_1)$.

(—) Premiers bissectrice. (Lacheheb, S., 2023)

II.5.4.4 Étude du rapport S/h_1 variant avec le paramètre F_1 :

L'ensemble des mesures expérimentales a conduit à l'établissement de relations adimensionnelles entre le seuil relatif s/h_1 et le nombre de Froude F_1 , représentés dans la figure (II.17). On observe principalement des nuages de points, chacun correspondant à une rugosité testée. De plus, il est noté que l'augmentation du rapport s/h_1 entraîne proportionnellement une augmentation du paramètre de régime F_1 .

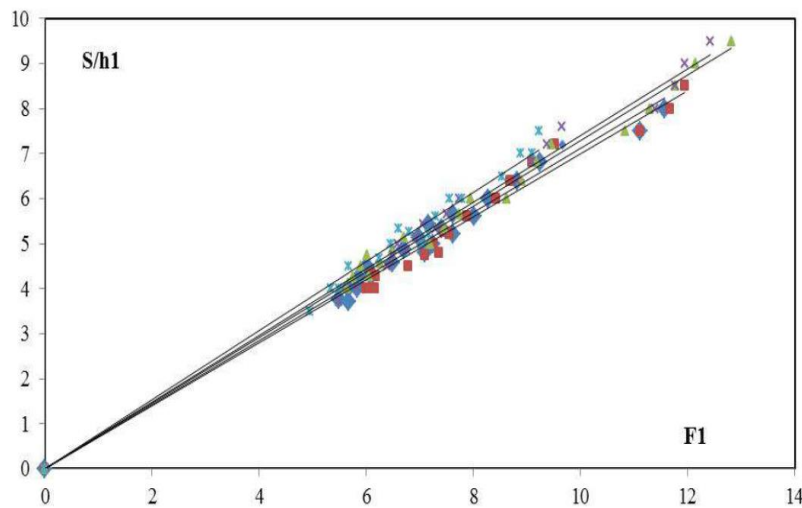


Figure II.17 : Présentation de s/h_1 avec le paramètre F_1 pour diverses rugosités absolues

ϵ (mm) = (♦)12, (■)10, (▲)08, (×)06 et (*)00 (Lacheheb, S., 2023)

L'analyse de corrélation entre les rapports de mesures du seuil relatif s/h_1 et du paramètre de Froude F_1 révèle des relations linéaires de la forme $s/h_1 = a_4(F_1)$ pour chaque niveau de rugosité étudié.

Les résultats des coefficients correspondant à leur rugosité relative sont présentés dans le tableau (II.5).

Tableau II.5 : Facteur a_4 de corrélations

$\varepsilon/(B-b)$	a_4	R^2
0,12	0,7688	0,984
0,10	0,7401	0,987
0,08	0,7298	0,990
0,06	0,7106	0,983
0,00	0,6990	0,982

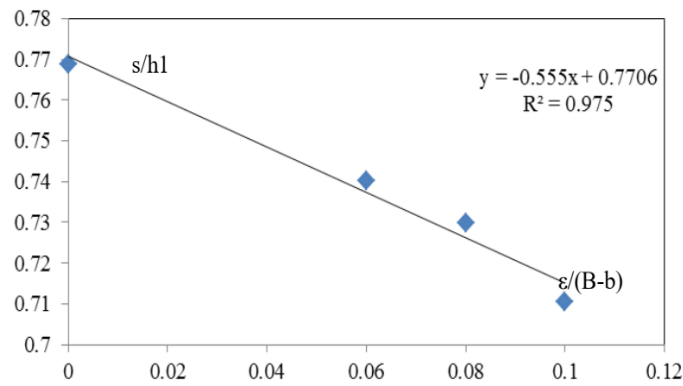


Figure II.18 : Représentation du facteur a_4 avec $\varepsilon/(B-b)$ (Lacheheb, S., 2023)

L'analyse de la corrélation entre le paramètre a_4 et le rapport relatif $\varepsilon/(B-b)$ a permis d'établir une relation explicite de type linéaire : $a_4 = -0,555(\varepsilon/(B-b)) + 0,7706$, avec un coefficient de détermination satisfaisant : $R^2 = 0,975$. Par conséquent, la relation générale adimensionnelle reliant du seuil relatif, le paramètre F_1 et le rapport $\varepsilon/(B-b)$ s'exprime comme suit :

$$s/h_1 = (-0,555(\varepsilon/(B-b)) + 0,77060) \cdot F_1 \quad (2.28)$$

$$0,00 \leq \frac{\varepsilon}{B-b} \leq 0,12$$

La comparaison entre l'approche globale obtenue $s/h_{1 \text{ app}}$ et $s/h_{1 \text{ exp}}$ est illustrée par la figure (II.19). Ainsi, la première bissectrice confirme de manière précise les mesures expérimentales obtenues au laboratoire qui ont sous-tendu cette approche fonctionnelle adimensionnelle à caractère générale.

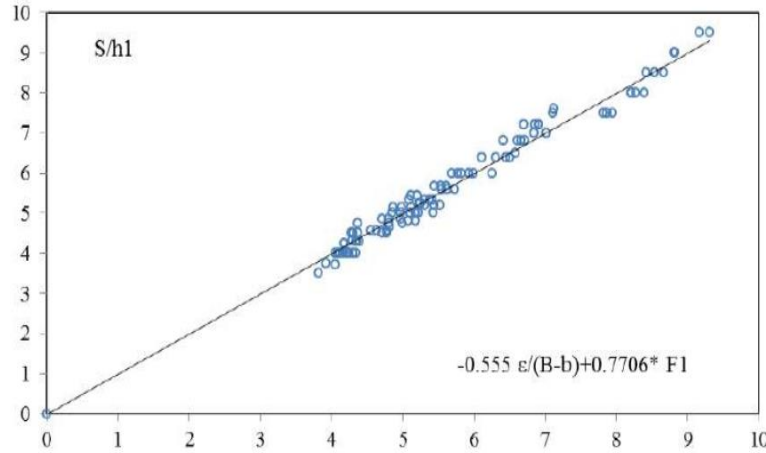


Figure II.19: Présentation S/h_1 avec $f(\epsilon/(B-b), F_1)$ (Lacheheb, S., 2023)

II.5.4.5 Développement de l'expression de la rentabilité

Les écoulements à variation brusque, servant de passage du régime torrentiel au régime fluvial, sont principalement caractérisés par le facteur de **rendement** η . Cette transition contribue de manière significative à la diminution de l'énergie produite par les forces érosives en aval des structures hydrauliques, ce qui favorise un écoulement de type fluvial. Dans ce contexte la théorie de référence s'exprime comme suit :

$$H_1 = h_1 + Q^2 / (2gA_1^2) = h_2 + Q^2 / (2gA_2^2) + \Delta H \quad (2.29)$$

L'expression du facteur η entre deux sections de l'écoulement de transition (ressaut) s'écrit comme suit :

$$\eta = \Delta H / H_1 ; \Delta H = H_1 - H_2 \quad (2.30)$$

Avec H_1 : La charge amont, H_2 : La charge aval

$$H_1 = \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_1, \quad H_2 = \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_2$$

Avec : $0 < \eta < 1$

En remplaçant H_1 et H_2 dans l'équation (2.31) :

$$\eta = 1 - \frac{\alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + h_2}{\alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} + h_1} \quad (2.32)$$

On injecte $V_1 = Q/A_1$, $V_2 = Q/A_2$ dans l'expression (2.33)

$$\eta = 1 - \frac{\alpha_2 \frac{Q^2}{2gA_2^2} + h_2}{\alpha_1 \frac{Q^2}{2gA_1^2} + h_1} \quad (2.34)$$

Sachant que : $A_1 = bh_1$; $A_2 = B(h_2 - h) + bh$ et $\alpha_1 = \alpha_2 = 1$

Le nombre de Froude $F_1 = Q/\sqrt{b^2 h_1^3 g}$ Le rendement devient :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2[Y/\beta - (1/\beta - 1)/\tau]^2}}{1 + F_1^2/2} \quad (2.35)$$

Les résultats obtenus permettent de représenter graphiquement les performances de l'approche théorique adimensionnelle globale η en fonction du nombre de Froude F_1 , pour une section rectangulaire composé présentant différentes rugosités appliquées au lit majeur.

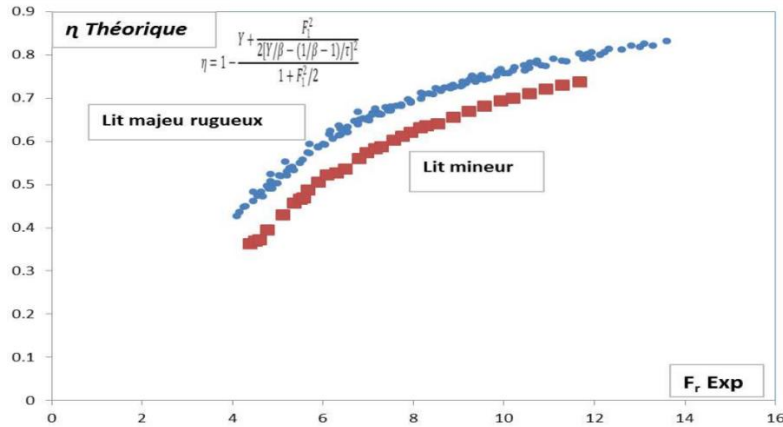


Figure II.20 : Présentation η avec F_r . (Lacheheb, S., 2023)

Le graphique II.20 montre que le rendement obtenu au lit majeur est supérieur à celui observé au lit mineur. En outre, il est constaté que, pour un facteur F_1 donné, la dissipation de l'énergie cinétique est plus significative dans le lit majeur que dans le lit mineur. Par ailleurs, une approche théorique permet d'évaluer le facteur de rentabilité η^* .

Cette approche, développée par Sinniger et Hager (1986), est présentée ci-dessous et s'applique pour $Fr > 2$: $\eta^* = [1 - \frac{\sqrt{2}}{F_1}]^2$

En procédant à l'analyse des mesures expérimentales en vue de calculer les rendements empiriques et globaux selon la méthode de Sinniger et Hager, les résultats sont illustrés dans la figure (II.21).

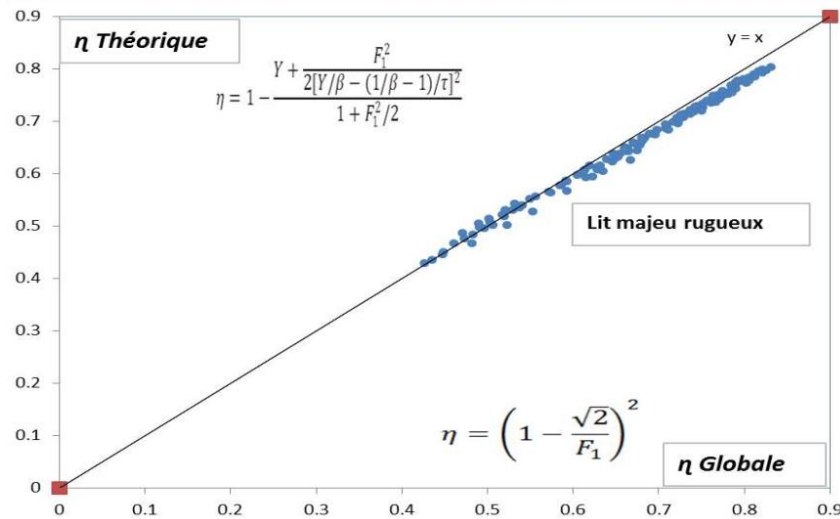


Figure II.21 : Présentation de η théorique et η globale. (Lacheheb, S., 2023)

II.5.3 Synthèse des résultats du deuxième chapitre.

Dans ce chapitre consacré à une approche semi théorique expérimentale, nous avons analysé les écoulements brusquement variés, en passant du régime torrentiel au régime fluvial, Cet écoulement principalement observés dans des canaux rectangulaires à section composée avec lit majeur rugueux. En utilisant l'ensemble des données expérimentales collectées en laboratoire, qui nous ont permis de développer des rapports adimensionnels qui ont servi de base pour l'élaboration d'approches fonctionnelles à caractères générales, résumées comme suit :

- ✓ Des approches sans dimension pour le rapport des longueurs relatives L_j/h_1 évoluent en fonction du paramètre F_1 et du facteur de rugosité relatif $\varepsilon/B-b$. L'effet de la rugosité est notable, se traduisant par une réduction significative de la longueur du ressaut.
- ✓ Ensuite, des approches fonctionnelles adimensionnelles ont été développées, reliant le rapport adimensionnel L_r/h_1 , le facteur de rugosité relative $\varepsilon/B-b$ et le paramètre F_1 . Cette approche linéaire actuelle a clairement démontré que la rugosité a un effet réducteur significatif sur les caractéristiques de l'écoulement.

- ✓ De plus, les corrélations des mesures obtenues ont permis de développer une approche empirique significative reliant le rapport Y , le paramètre de rugosité relative $\varepsilon/B-b$ et le nombre de Froude F_1 . La rugosité a eu un effet significatif sur les profondeurs d'écoulement, en les réduisant de manière notable.
- ✓ L'analyse des mesures du rapport s/h_1 , en lien avec la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$ et le facteur F_1 , a permis d'établir une relation adimensionnelle significative, facilitant la conception et le positionnement de la transition entre les régimes torrentiel et celui fluvial.
- ✓ En conclusion de cette analyse expérimentale, une approche remarquable du rendement η en fonction du facteur F_1 a été développée. Ce rendement met en évidence l'impact significatif de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$ appliquée au lit majeur du canal rectangulaire composé, ce qui explique la dissipation importante de l'énergie cinétique.

Chapitre III

Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire pente incliné à fond rugueux

III.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre s'examinera sur l'étude réalisée par (Nouacer, B., 2023) qui s'appuie à analyser, théoriquement et expérimentalement, l'impact de la rugosité sur les caractéristiques géométriques des ressauts hydrauliques se développant dans un canal rectangulaire incliné et rugueux, pour quatre valeurs de rugosité absolue du fond (ϵ (mm) = 6, 8, 10 et 12). Comme mentionné dans la revue bibliographique, peu d'études ont abordé le domaine des ressauts hydrauliques dans des canaux rectangulaires à fond rugueux, à l'exception des travaux de (Rajaratnam & Subramanya, 1968) et de (Ead & Rajaratnam, 2002) sur les ressauts hydrauliques dans des canaux à fond ondulé, ainsi que des recherches expérimentales de (Kateb, S., 2006) dans un canal rectangulaire à fond rugueux. Des propositions seront présentées à cet effet.

III.2. ANALYSE THEORIQUE DE DU RESSAUT HYDRAULIQUE CONTROLE PAR SEUIL DANS UN CANAL RECTANGULAIRE A PENTE INCLINE RUGUEUX

III.2.1. INTRODUCTION

Cette recherche vise à analyser théoriquement le phénomène du ressaut hydraulique se produisant dans un canal rectangulaire rugueux à pente variable. L'objectif principal est d'établir des relations fonctionnelles pratiques pour le dimensionnement des bassins de dissipation de l'énergie hydraulique en aval des barrages, ainsi que pour la conception des canaux d'irrigation. L'étude a été menée de façon théorique. Un développement théorique a permis d'obtenir une relation semi-théorique de la forme $f(Y, F_1, \alpha, Cr)$, où Y désigne le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut, F_1 représente le nombre de Froude incident, Cr le coefficient de résistance et α indique la pente du canal.

III.2.2. Analyse théorique :

La Figure (III.1) illustre un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil dans un canal rectangulaire rugueux à pente inclinée. Un seuil dénoyé est placé à l'extrémité aval du canal afin d'élever la ligne d'eau en aval. Les hauteurs conjuguées h_1 et h_2 correspondent respectivement aux sections initiale et finale du ressaut. L'écoulement est en régime torrentiel en amont et fluvial en aval.

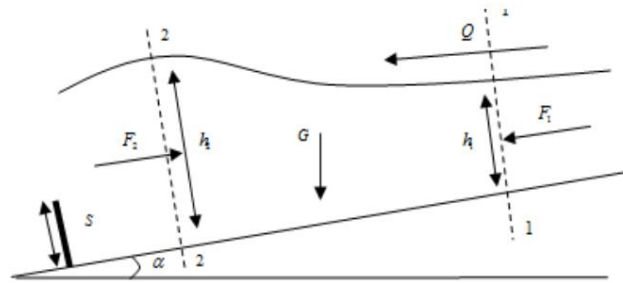


Figure III.1: Ressaut contrôlé par un seuil dans un canal rectangulaire rugueux incliné

En considérant les hypothèses simplificatrices suivantes :

- Distribution hydrostatique des pressions dans les sections amont et aval ;
- Frottements négligeables entre les particules d'eau et les parois du canal ;
- Pente variable du canal ;
- Résistance de l'air négligeable, avec un écoulement permanent.

L'équation de la quantité de mouvement peut être appliquée entre les sections initiale et finale du ressaut, en prenant en compte la force de résistance f_R due à la rugosité des parois du canal.

Cette équation s'exprime ainsi :

$$f_1 - f_2 - f_R + G \sin \alpha = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (3.1)$$

Où : f_1 et f_2 sont respectivement les forces de pression s'exerçant sur les sections amont et aval du ressaut : $f_1 = P_1 A_1$, $f_2 = P_2 A_2$

V_1 et V_2 sont respectivement les vitesses aux sections amont et aval du ressaut.

ρ : la masse volumique du liquide.

Q : le débit volume.

G : Le poids appliqué au centre de gravité du volume d'eau formé par le ressaut

f_R : La force de résistance due à la rugosité des parois du canal, dont l'expression suivante :

$$f_R = C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) \cdot p \quad (3.2)$$

Où :

g : L'accélération gravitationnelle (m/s^2) ;

L_j : La longueur du ressaut hydraulique (m) ;

C : Le coefficient dû à la rugosité imposé () ;

p : Le périmètre mouillé rugueux du canal (m) ;

ρ : La masse spécifique de l'eau (Kg/m³),

Q : Le débit spécifique (m³/s).

L'équation peut s'écrire alors sous la forme :

$$P_1 A_1 - P_2 A_2 - C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) \cdot p + G \sin \alpha = \rho Q V_2 - \rho Q V_1 \quad (3.3)$$

P étant la pression hydrostatique.

$$\frac{Q^2}{g A_1} + \bar{h}_1 A_1 + V \sin \alpha = \frac{Q^2}{g A_2} + \bar{h}_2 A_2 \quad (3.4)$$

Les expressions de $A_1, A_2, \bar{h}_1, \bar{h}_2$ puissent être déterminé géométriquement en se basant sur la figure (III.2)

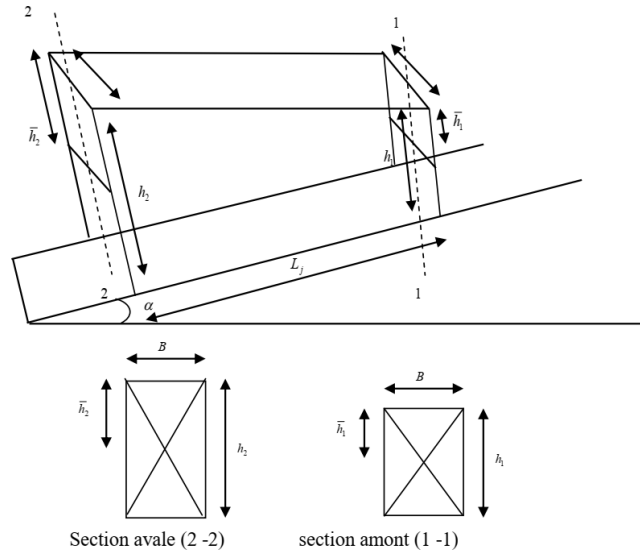


Figure III.2 : a) Représentation géométrique du volume d'eau engendré par le ressaut

b) Représentation géométrique des sections amont et aval (Nouacer, B., 2023)

D'où

$$A_1 = B h_1 \quad (3.5)$$

$$A_2 = B h_2 \quad (3.6)$$

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1^2}{6 \cos \alpha} \times \frac{3B}{A_1} \quad (3.7)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{h_2^2}{6 \cos \alpha} \times \frac{3B}{A_2} \quad (3.8)$$

III.2.3. Détermination du volume du ressaut :

III.2.3.1. Détermination analytique du volume du ressaut :

Soit un canal rectangulaire de largeur B et de longueur L_j et de hauteur initiale h_1 et de hauteur finale h_2

A_1 et A_2 représentent respectivement les sections amont et aval de ce canal.

Le volume moyen de ce canal est donné par la relation suivante :

$$V = \frac{1}{2}(A_1 + A_2) \times L_j \quad (3.9)$$

En tenant compte que :

$A_1 = Bh_1$ et $A_2 = Bh_2$, on aura alors

$$V = \frac{B}{2}(h_1 + h_2) \times L_j \quad (3.10)$$

III.2.3.2. Détermination géométrique du volume de ressaut :

Soit la section 1-1,2-2 représenté dans le profil de la figure (III.2), cette section peut être divisée en deux sections :

$$S = S_1 + S_2 \quad (3.11)$$

S_1 est donnée par la relation suivante : $S_1 = L_j h_1$ (3.12)

S_2 est calculée par l'intégral suivant : $S_2 = \int_0^{L_j} \frac{(h_2 - h_1)}{L_j} x dx$ (3.13)

$$\text{On obtient : } S_2 = (h_2 - h_1) \frac{L_j}{2} \quad (3.14)$$

En remplaçant dans la relation on obtient la relation suivante : $S = \frac{1}{2}(h_1 + h_2)L_j$ (3.15)

En multipliant cette section par la largeur du canal, on obtient le volume total déterminé précédemment : $V = \frac{B}{2}(h_1 + h_2)L_j$ (3.16)

Le rapport des hauteurs conjuguées est donné par la relation suivante : $Y = \frac{h_2}{h_1}$ (3.17)

En remplaçant par cette expression dans la relation (3.17), on aura : $V = \frac{B}{2}(Y + 1)h_1 L_j$ (3.18)

Y : le rapport des hauteurs conjuguées

La relation représente le volume calculé du ressaut hydraulique.

III.2.3.3. Le Facteur De Correction :

Le volume réel du ressaut hydraulique est très complexe à calculer théoriquement en raison de la perturbation de la surface libre de l'eau causée par le rouleau de surface. Pour cette raison, il est nécessaire de corriger ce volume en le multipliant par un coefficient K , appelé facteur de correction. La relation s'exprime alors comme suit : $V = \frac{KB}{2} (Y + 1) h_1 L_j$ (3.19)

Le coefficient K représente le rapport entre le volume réel et le volume calculé du ressaut. Sa détermination sera effectuée par une approche expérimentale.

$$\frac{Q^2}{gBh_1} + \frac{h_1^2}{6 \cos \alpha} \times \frac{3B}{Bh_1} Bh_1 + \frac{KB}{2} (Y + 1) h_1 L_j \sin \alpha = \frac{Q^2}{gBh_2} + \frac{h_2^2}{6 \cos \alpha} \times \frac{3B}{Bh_2} Bh_2 \quad (3.20)$$

En arrangeant cette relation, elle devient :

$$\frac{Q^2}{gBh_1} + \frac{Bh_1^2}{2 \cos \alpha} + \frac{h_1 B}{2} (Y + 1) K L_j \sin \alpha = \frac{Q^2}{gBh_2} + \frac{Bh_2^2}{2 \cos \alpha}$$

En divisant les deux membres de la relation (3.20) par Bh_1^2 , elle devient :

$$\frac{Q^2}{gB^2 h_1^3} + \frac{1}{2 \cos \alpha} + \frac{K}{2} (Y + 1) \frac{L_j}{h_1} \sin \alpha = \frac{Q^2}{gB^2 h_1^2 h_2} + \frac{h_2^2}{2 h_1^2 \cos \alpha}$$

La longueur relative du ressaut λ est donnée par la relation suivante : $\lambda = \frac{L_j}{h_1}$ (3.21)

III.2.3.4. Le nombre de Froude :

Le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident constitue l'un des paramètres les plus déterminants dans l'analyse du ressaut hydraulique. Ce paramètre, calculé au niveau de la section initiale (1-1) située au pied du ressaut, est défini par l'expression suivante :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (3.22)$$

Cette relation montre que le nombre de Froude F_1 est en fonction de :

- Le débit volume de l'écoulement Q (m^3/s) ;
- L'accélération de la pesanteur g (m/s^2) ;
- L'aire de la section transversale mouillée au pied de ressaut A_1 (m^2) ;

La dérivée partielle $\frac{\partial A_1}{\partial h_1}$ de l'aire de la section A_1 au pied de ressaut par rapport à la hauteur h_1

$$\frac{\partial A_1}{\partial h_1} = B \quad (3.23)$$

En raison de l'inclinaison du canal à un angle α par rapport à l'horizontal, la hauteur initiale doit être exprimée comme $h_1 \cos(\alpha)$. En tenant compte de ces observations, la relation s'écrit ainsi :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2h_1^3}$$

En remplaçant dans la relation elle devient :

$$(1 - Cr) F_1^2 + \frac{1}{2 \cos \alpha} + (Y + 1) \frac{K\lambda}{2} \sin \alpha = \frac{F_1^2}{Y} + \frac{Y^2}{2 \cos \alpha} \quad (3.24)$$

Cette relation est établie par application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval délimitant un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à pente positive variable. Elle indique que ce type de ressaut est influencé par :

- Le nombre de Froude F_1 caractérisant l'écoulement incident en amont
- Le rapport Y des hauteurs conjuguées h_1 (amont) et h_2 (aval)
- L'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontale
- La longueur relative λ du ressaut

La relation est réorganisée comme suit pour obtenir la forme finale de la formule :

$$(1 - Cr) F_1^2 = \frac{Y(Y+1)}{2} \left[\frac{1}{\cos \alpha} - \frac{K\lambda}{(Y-1)} \sin \alpha \right] \quad (3.25)$$

La relation exprime le nombre de Froude F_1 en fonction du rapport Y des hauteurs conjuguées, de l'angle d'inclinaison α du canal par rapport à l'horizontal et de la longueur relative $\lambda = \frac{L_j}{h_1}$ d'un ressaut hydraulique à pente positive variable évoluant dans un canal de section rectangulaire.

III.2.3.5 VALIDATION DE L'APPROCHE THEORIQUE PROPOSEE :

L'application de cette relation pour le cas particulier d'un ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire horizontal ($Cr = 0$) conduit à l'expression suivante :

$$F_1^2 = \frac{Y(Y+1)}{2} \quad (3.26)$$

Cette relation est dérivée de l'application de l'équation de quantité de mouvement entre les sections amont et aval d'un ressaut hydraulique se produisant dans un canal rectangulaire horizontal. Le rapport Y des hauteurs conjuguées peut être exprimé en fonction du nombre de Froude.

$$Y = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1 \right) \quad (3.27)$$

Cette relation, communément appelée équation de Bélanger, permet de déterminer le rapport Y des hauteurs conjuguées pour un ressaut hydraulique se formant dans un canal rectangulaire horizontal, en fonction du nombre de Froude F_1 .

Dans le cas particulier d'un canal rectangulaire horizontal ($\alpha = 0$ et $Cr = 0$), l'application de cette équation conduit à l'expression suivante :

$$Y = \frac{1}{2} \left(\sqrt{8F_1^2 + 1} - 1 \right) \quad (3.28)$$

Cette relation correspond à l'équation du rapport des hauteurs conjuguées dans un canal rectangulaire horizontal, initialement proposée par Bélanger. Pour évaluer expérimentalement le facteur de correction (K), la relation (3.25) peut être reformulée de la manière suivante :

$$K = \frac{Y-1}{\lambda \sin \alpha} \left[\frac{1}{\cos \alpha} - \frac{2(1-Cr) F_1^2}{Y(Y+1)} \right] \quad (3.29)$$

F_1 , le nombre de Froude de l'écoulement incident est calculé à travers la relation (3.26) et en remplaçant h_1 par $h_1 \cos \alpha$, on obtient :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gB^2[h_1 \cos \alpha]^3} \quad (3.30)$$

Q : Débit de l'écoulement mesuré par le déversoir rectangulaire selon la relation (m^3/s)

B : La largeur du canal (m)

h_1 : La hauteur du niveau d'eau à la section amont du ressaut (m)

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

Les valeurs de Y , λ et α sont déterminées expérimentalement.

Tableau III.1 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (0 mm) de la pente positive

Rugosité 0 mm								
tang (α) = 0 ,005			tang (α) = 0 ,010			tang (α) = 0 ,015		
F_1	Y	K	F_1	Y	K	F_1	Y	K
3,70	4,90	1,21	4,30	5,60	1,47	7,25	9,25	0,38
4,45	5,80	1,10	5,11	6,65	0,53	7,82	10,10	1,10
6,88	9,05	1,19	6,42	8,35	1,40	3,12	3,95	1,08
8,60	11,55	1,13	7,21	9,35	0,71	4,11	5,20	1,03
9,35	12,40	0,27	7,72	10,10	1,01	4,44	5,65	1,03
9,70	12,90	0,26	8,37	11,05	1,11	4,82	6,25	0,73
10,44	13,80	0,01	9,57	12,60	1,09	5,85	7,43	0,88
10,87	14,35	0,15	10,44	13,75	1,27	2,07	2,60	1,29
11,38	15,15	0,02	11,04	14,25	0,35	2,42	3,06	1,43
2,56	3,40	0,35	3,86	5,17	1,03	2,80	3,50	0,56
4,91	6,67	1,50	2,36	3,10	0,98	3,90	5,06	1,36
6,30	8,47	0,79	2,73	3,48	1,38	5,18	6,70	1,25
7,78	10,40	0,80	3,14	4,05	1,25			
2,10	2,85	0,73	3,53	4,63	1,17			
2,83	3,88	0,80	4,88	6,50	1,38			
3,06	4,25	1,15	5,64	7,50	1,01			
			6,07	8,00	0,20			

Tableau III.2 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (6 mm) de la pente positive

Rugosité 6 mm								
tang (α) = 0 ,005			tang (α) = 0 ,010			tang (α) = 0 ,015		
F ₁	Y	K	F ₁	Y	K	F ₁	Y	K
6,29	8,35	1,17	3,30	4,10	0,27	4,50	5,70	0,03
8,75	11,55	0,15	3,70	4,73	0,69	5,95	7,68	0,02
10,17	13,50	0,15	4,13	5,23	0,26	6,25	8,10	0,03
10,80	14,35	0,11	4,52	5,83	0,53	2,27	2,96	1,50
11,39	15,15	0,08	4,92	6,37	0,39	2,69	3,36	0,70
5,43	7,23	1,43	5,70	7,47	0,43	3,00	3,72	0,35
6,81	8,87	0,07	6,00	7,87	0,36	3,20	4,10	0,82
3,10	3,88	1,29	6,53	8,53	0,17	3,51	4,48	0,55
4,80	6,21	0,89	7,13	9,30	0,03	3,85	4,88	0,26
5,20	6,74	0,74	7,60	9,88	0,13	4,12	5,26	0,28
2,69	3,23	0,14	2,68	3,33	0,95	4,76	6,12	0,19
3,50	4,46	1,50	3,00	3,80	1,35	5,20	6,68	0,07
3,90	4,95	0,77				7,60	9,48	1,25
4,20	5,42	1,25						

Tableau III.3 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (8 mm) de la pente positive

Rugosité 8 mm								
tang (α) = 0 ,005			tang (α) = 0 ,010			tang (α) = 0 ,015		
F ₁	Y	K	F ₁	Y	K	F ₁	Y	K
6,03	7,90	1,31	3,04	4,00	1,21	6,22	8,00	1,02
6,73	8,50	0,27	5,35	7,05	0,02	6,81	8,73	1,20
7,27	9,45	0,41	6,68	8,50	0,02	7,37	9,47	1,47
8,07	10,10	1,41	8,12	10,00	0,05	7,85	9,80	0,28
8,91	11,20	1,50	8,94	11,00	0,05	3,50	4,38	0,24
10,31	13,20	1,44	9,15	11,70	0,03	4,33	5,35	1,36
2,80	4,20	1,52	9,93	12,76	0,02	5,10	6,55	1,13
3,73	5,30	1,85	11,20	13,99	0,14	5,51	6,95	1,47
4,71	6,47	0,74	11,66	14,33	1,26	2,49	3,22	0,94
5,13	7,10	1,05	2,57	3,03	1,39	2,75	3,48	0,59
5,72	7,57	1,49	3,60	4,80	0,75	2,93	3,82	1,24
6,22	8,20	1,40	4,06	5,40	0,11	3,25	4,16	1,19
6,49	8,67	0,53	4,49	6,00	0,09	3,90	4,98	0,55
7,21	9,43	1,36	5,96	8,00	0,67	4,77	5,78	1,50
7,45	9,83	1,23	7,48	9,70	0,22	5,27	6,26	1,35
7,70	10,27	1,34	8,36	10,77	0,47			
2,29	3,45	1,47	1,93	2,75	1,15			
2,72	3,85	1,25	4,91	6,50	1,33			
3,01	4,38	0,97	5,70	7,60	1,46			
3,43	4,90	1,50						
3,77	5,30	1,48						
4,14	5,68	1,33						

Tableau III.4 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (10 mm) de la pente positive

Rugosité 10 mm								
tang (α) = 0 ,005			tang (α) = 0 ,010			tang (α) = 0 ,015		
F ₁	Y	K	F ₁	Y	K	F ₁	Y	K
6,72	9,10	1,08	6,61	8,50	0,06	5,45	6,85	0,06
7,00	9,50	1,12	6,98	9,50	1,23	6,48	8,25	0,09
7,55	10,10	1,38	7,70	10,13	0,39	8,38	10,80	0,06
8,07	10,87	1,40	3,19	4,15	1,45	8,88	11,45	0,04
8,40	11,23	1,10	3,55	4,50	0,67	9,40	12,20	0,11
8,60	11,47	1,01	3,90	4,95	0,47	10,20	13,20	0,01
2,64	3,38	1,45	5,03	6,48	0,52	10,80	13,80	0,24
2,89	3,61	1,60	5,35	6,93	0,54	11,80	14,59	0,81
4,70	6,20	1,43	5,61	7,18	0,18	4,27	5,27	0,06
5,10	6,75	1,40	5,81	7,50	0,31	5,99	7,80	0,53
5,65	7,43	1,38	6,33	8,18	0,19	7,68	9,90	0,14
5,91	7,83	1,50	4,25	5,42	0,71	3,68	4,70	0,95
5,09	6,75	1,36	4,55	5,92	0,89	4,74	6,00	0,35
5,41	7,10	1,49				2,55	3,04	0,62
5,65	7,43	1,43				2,80	3,50	1,26
5,90	7,83	1,50				3,08	3,84	0,96
6,20	8,28	1,48						
3,40	4,40	1,02						
4,12	5,28	0,99						

Tableau III.5 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (12 mm) de la pente positive

Rugosité 12 mm								
tang (α) = 0 ,005			tang (α) = 0 ,010			tang (α) = 0 ,015		
F ₁	Y	K	F ₁	Y	K	F ₁	Y	K
3,70	4,80	1,26	3,20	4,23	1,41	7,91	10,23	0,44
3,95	5,60	1,46	5,45	7,30	1,34	8,43	10,77	0,13
4,73	6,55	1,48	6,16	8,05	1,33	8,82	11,20	0,10
5,98	8,35	1,47	6,83	9,00	1,40	9,35	11,53	0,51
6,72	9,20	3,85	7,92	10,35	0,87	4,20	5,38	1,10
7,35	9,95	1,23	8,60	11,20	0,69	4,37	5,70	1,41
7,87	10,70	1,33	10,32	13,23	0,06	4,81	6,18	0,98
8,95	12,20	1,40	10,50	13,73	0,59	5,17	6,58	0,58
9,45	12,95	1,49	11,00	14,33	0,43	5,35	7,00	1,08
10,28	13,90	1,23	2,04	3,00	1,51	6,18	7,75	0,11
10,58	14,30	1,32	2,36	3,33	1,37	6,54	8,15	1,08
11,00	14,90	1,50	2,81	3,85	1,08	1,78	2,06	1,02
2,60	3,67	1,48	3,45	4,80	1,27	2,13	2,72	1,99
3,00	4,10	1,50	3,85	5,00	0,60	2,49	3,08	1,19
			4,67	6,00	0,48	2,72	3,54	1,76
						3,12	3,94	1,09

Les tableaux III.1    III.5 démontrent clairement que le coefficient de correction k présente une valeur constante. Après élimination des valeurs illogiques, la moyenne arithmétique de l'ensemble des valeurs de k converge vers une constante de ($\pm 0,92$). Ces résultats ont été obtenus par intégration des données expérimentales dans la relation (3.29).

Pour valider l'équation semi-théorique (3.25), nous avons procédé à une comparaison systématique avec les valeurs du nombre de Froude expérimental, ce dernier étant déterminé à partir de la relation (3.30).

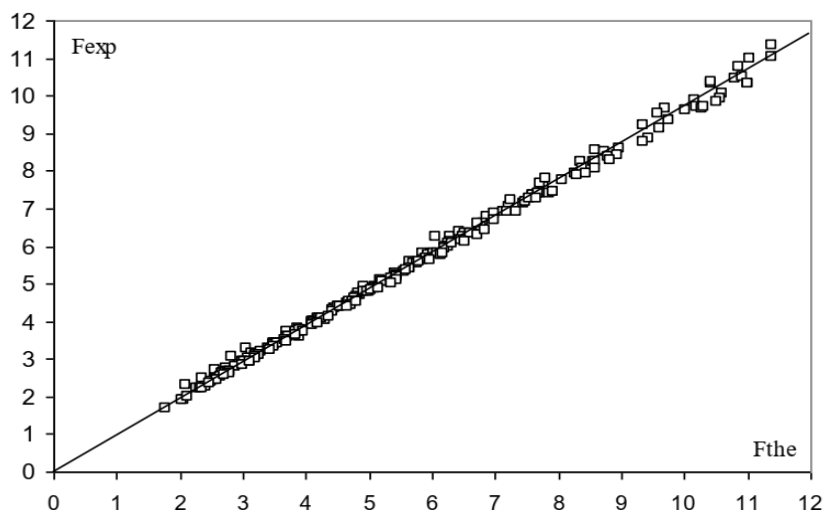


Figure III.3 : Variation du nombre de Froude expérimental F_{exp} en fonction du nombre de Froude théorique F_{the} calculée selon la relation (3.30) (Nouacer, B., 2023)

III.4 CONCLUSION :

Dans ce chapitre nous avons illustré le développement d'une approche visant à établir la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, Cr) = 0$ décrivant un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince dans un canal rectangulaire à pente positive variable. Cette analyse a permis d'obtenir une relation semi-théorique grâce à l'application de l'équation de conservation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut.

Pour $\alpha = 0$, $Cr=0$, la relation théorique (3.25) se réduit à la formulation classique (3.26) du ressaut hydraulique en canal rectangulaire, confirmant ainsi la validité du développement théorique démontré par l'auteur. L'analyse expérimentale a conduit à la détermination du coefficient de correction k (rapport volume réel/volume calculé), révélant une valeur moyenne cohérente de $k = 0,92$ pour les quatre pentes étudiées. La concordance entre les nombres de Froude théoriques et expérimentaux (  carts relatifs généralement inférieurs à 5%) valide la fiabilité de la relation (3.38) précédemment établie.

L'auteur a noté que la relation générale (3.24), de forme implicite quand au rapport Y des hauteurs conjuguées, nécessite une résolution itérative. Cette contrainte a amené l'auteur à proposer une relation explicite approchée (3.35), plus pratique pour le calcul de Y en fonction de F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal. La comparaison avec la relation théorique (3.24) montre que cette approximation génère des écarts relatifs majoritairement inférieurs à 5%.

III.3. RESULTATS EXPERIMENTAUX :

III.3.2. Ressaut hydraulique incliné rugueux :

III.3.2.1. Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison α du canal :

Les figures de (III.4)    (III.8) montrent de manière évidente la variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 , pour quatre angles d'inclinaison α distincts : $\tan(\alpha) = 0,00$; $0,005$; $0,010$; $0,015$ avec des divers facteurs de résistance examinés : ε (mm) = $0,00$; 6 ; 8 ; 10 et 12 .

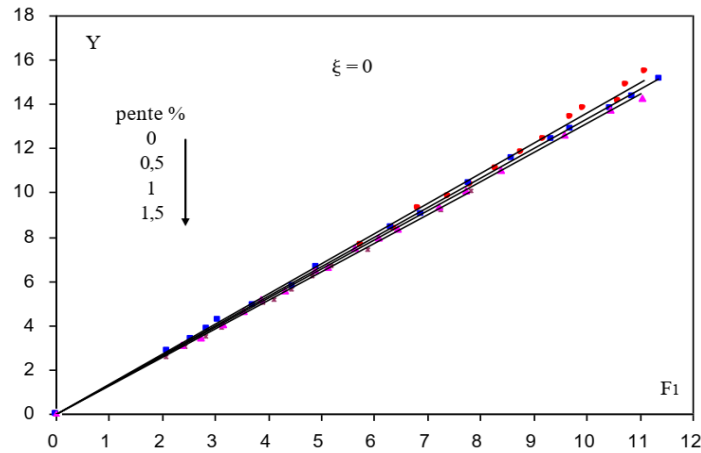


Figure III.4 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha) = 0,00$ (•) ; $\tan(\alpha) = 0,005$ (■) ; $\tan(\alpha) = 0,01$ (▲) ; $\tan(\alpha) = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement (Nouacer, B., 2023)

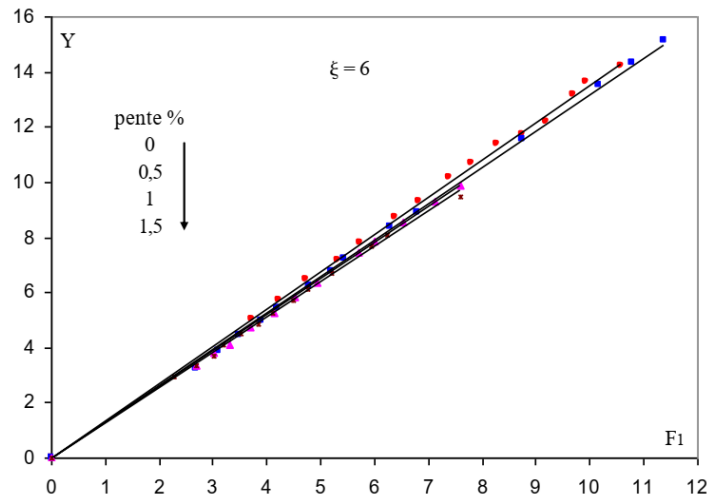


Figure III.5 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha) = 0,00$ (•) ; $\tan(\alpha) = 0,005$ (■) ; $\tan(\alpha) = 0,01$ (▲) ; $\tan(\alpha) = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement (Nouacer, B., 2023)

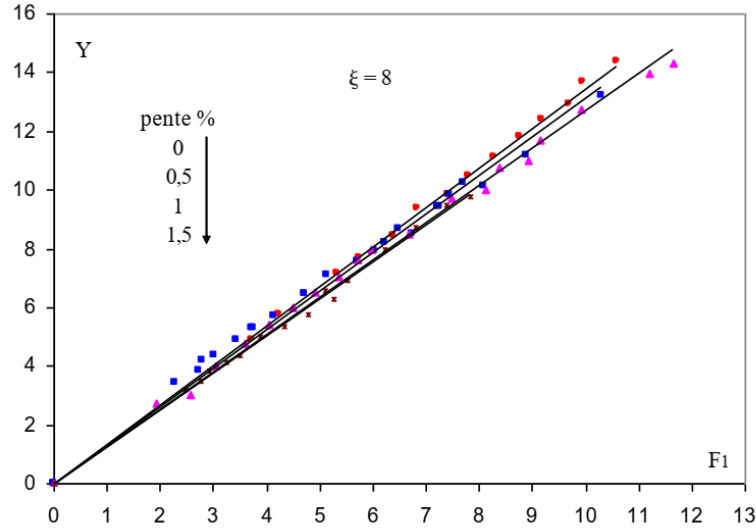


Figure III.6 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour tang (α) $\tan \alpha = 0,00$ ($\bullet$) ; $\tan \alpha = 0,005$ ($\blacksquare$) ; $\tan \alpha = 0,01$ ($\blacktriangle$) ; $\tan \alpha = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement (Nouacer, B., 2023)

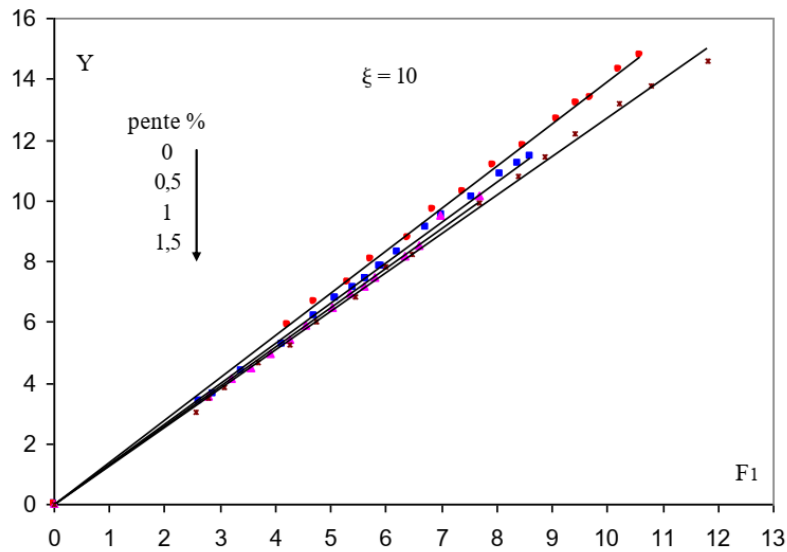


Figure III.7 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour tang (α) , $\tan \alpha = 0,00$ ($\bullet$) ; $\tan \alpha = 0,005$ ($\blacksquare$) ; $\tan \alpha = 0,01$ ($\blacktriangle$) ; $\tan \alpha = -0,015$ ($*$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement (Nouacer, B., 2023)

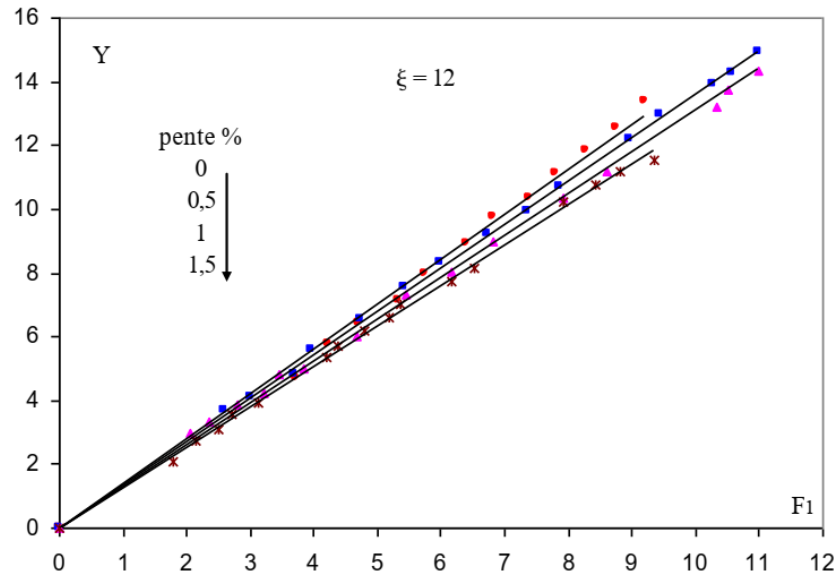


Figure III.8 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour $\tan(\alpha)$, $\tan\alpha = 0,00$ (●) ; $\tan\alpha = 0,005$ (■) ; $\tan\alpha = 0,01$ (▲) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement (Nouacer, B., 2023)

L'analyse des données expérimentales révèle que chaque ensemble de points suit une tendance caractéristique unique. Un traitement par régression linéaire des moindres carrés permet d'établir que cette tendance suit une loi de la forme : $Y = aF_1$

Tableau III.6 : Valeurs des paramètres a_1

Rugosité 00 mm		
Tang α	a_1	R^2
0	1,35	0,9964
0,005	1,33	0,9996
0,01	1,30	0,9995
0,015	1,28	0,9995

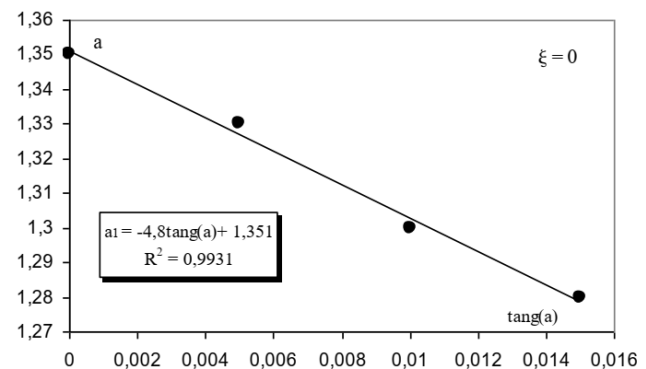
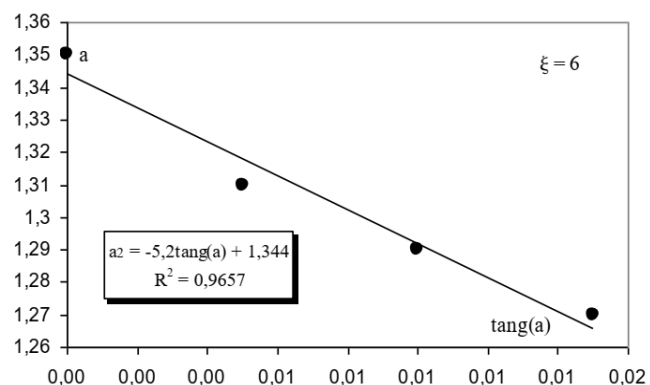


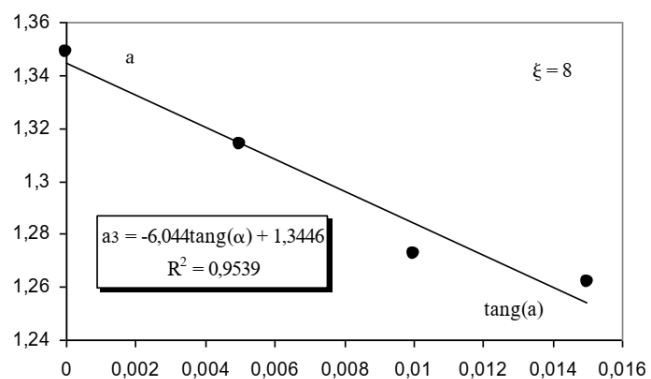
Figure III.9 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (0 mm).

Tableau III.7 : Valeurs des paramètres a_2

Rugosité 06 mm		
Tang α	a_2	R^2
0	1,35	0,9990
0,005	1,31	0,9989
0,01	1,29	0,9989
0,015	1,27	0,9987

**Figure III.10 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (6 mm).****Tableau III.8 : Valeurs des paramètres a_3**

Rugosité 08 mm		
Tang α	a_3	R^2
0	1,33	0,9982
0,005	1,31	0,9850
0,01	1,27	0,9961
0,015	1,26	0,9946

**Figure III.11 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (8 mm).****Tableau III.9 : Valeurs des paramètres a_4**

Rugosité 10 mm		
Tang α	a_4	R^2
0	1,39	0,9995
0,005	1,33	0,9985
0,01	1,30	0,9971
0,015	1,27	0,9984

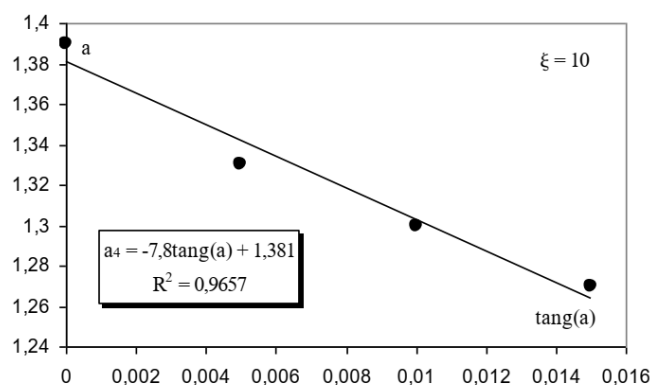
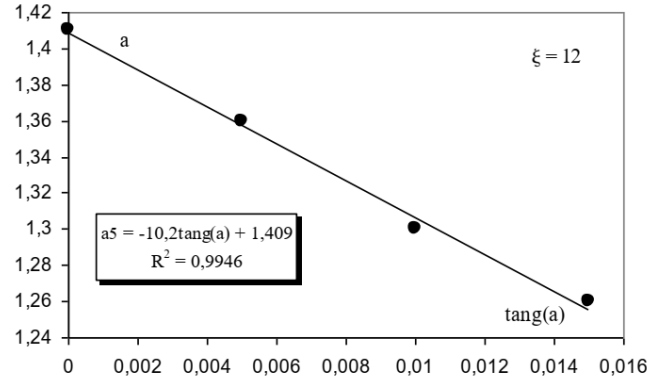
**Figure III.12 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (10 mm).**

Tableau III.10 : Valeurs des paramètres a_5

Rugosité 12 mm		
Tang α	a_5	R^2
0	1,41	0,9949
0,005	1,36	0,9991
0,01	1,30	0,9985
0,015	1,26	0,9984

**Figure III.13 : Variation du paramètre a en fonction de $\tan(\alpha)$ dans la rugosité (12 mm).**

Les figure (III.9    III.13) montrent clairement que la variation de « a » en fonction de la pente du canal $\tan(\alpha)$ suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

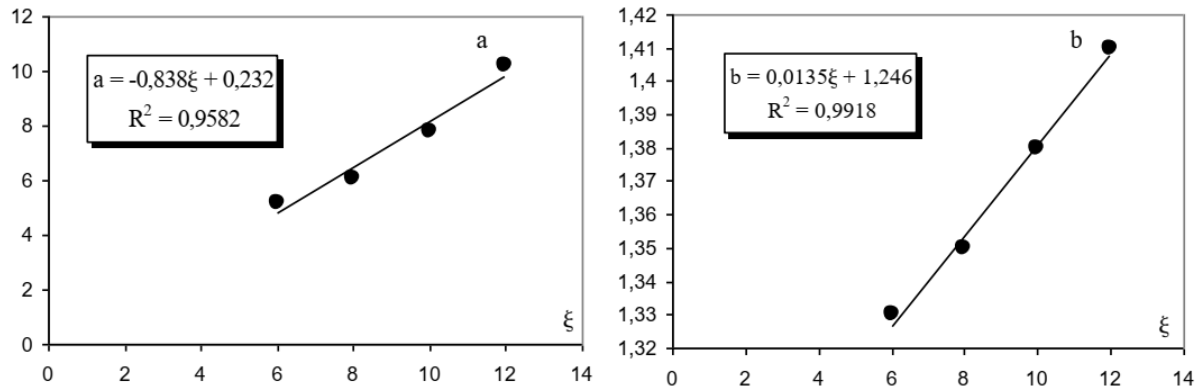
$$\begin{aligned}
 a_1 &= -4,8 \tan(\alpha) + 1,351 & R^2 &= 0,9931 & ; \varepsilon &= 00mm \\
 a_2 &= -5,2 \tan(\alpha) + 1,3536 & R^2 &= 0,9657 & ; \varepsilon &= 06mm \\
 a_3 &= -6,04 \tan(\alpha) + 1,3346 & R^2 &= 0,9539 & ; \varepsilon &= 08mm \\
 a_4 &= -7,8 \tan(\alpha) + 1,381 & R^2 &= 0,9657 & ; \varepsilon &= 10mm \\
 a_5 &= -10,20 \tan(\alpha) + 1,409 & R^2 &= 0,9946 & ; \varepsilon &= 12mm
 \end{aligned} \tag{3.31}$$

Rempla  ant les expressions de " a " par leurs expressions respectives dans la relation $Y = a F_1$, on aura :

$$\begin{aligned}
 Y &= [-4,8 \tan(\alpha) + 1,351] F_1 & ; \varepsilon &= 00mm \\
 Y &= [-5,2 \tan(\alpha) + 1,3536] F_1 & ; \varepsilon &= 06mm \\
 Y &= [-6,04 \tan(\alpha) + 1,3346] F_1 & ; \varepsilon &= 08mm \\
 Y &= [-7,8 \tan(\alpha) + 1,381] F_1 & ; \varepsilon &= 10mm \\
 Y &= [-10,20 \tan(\alpha) + 1,409] F_1 & ; \varepsilon &= 12mm
 \end{aligned} \tag{3.32}$$

Tableau III.11 : Valeurs des paramètres a et b

Tang(α)	0 ; 0,005 ; 0,01 ; 0,015		
Rugosité (ε)	A	b	R ²
0	-4,8	1,35	0,9931
6	-5,2	1,33	0,9657
8	-6,04	1,35	0,9539
10	-7,8	1,38	0,9657
12	-10,20	1,41	0,9646

**Figure III.14 : Variation du paramètre 'a' et 'b' en fonction de Rugosité (ε) (Nouacer, B., 2023)**

$$a^* = -0.838(\varepsilon) + 0.232 \quad R^2=0.9582 \quad (\varepsilon=0;6;8;10;12) \quad (3.33)$$

$$b^* = -0.0135(\varepsilon) + 1.246 \quad R^2=0.9918 \quad (\varepsilon=0;6;8;10;12) \quad (3.34)$$

Il serait utile de regrouper les cinq relations en une équation globale, exprimée sous une forme approximative comme suit :

$$Y^* = [(-0.838(\varepsilon) + 0.232)\tan \alpha + (-0.0135(\varepsilon) + 1.246)]F_1 \quad (3.35)$$

La relation approximative (3.35), étant explicite dans (Y), offre une méthode simple et pratique pour calculer le rapport des hauteurs conjuguées (Y), en tenant compte du nombre de Froude incident (F_1), de l'angle d'inclinaison du canal (α), et du coefficient de rugosité absolue (ε). Cette équation est applicable pour des nombres de Froude (F_1) compris entre 2 et 14.

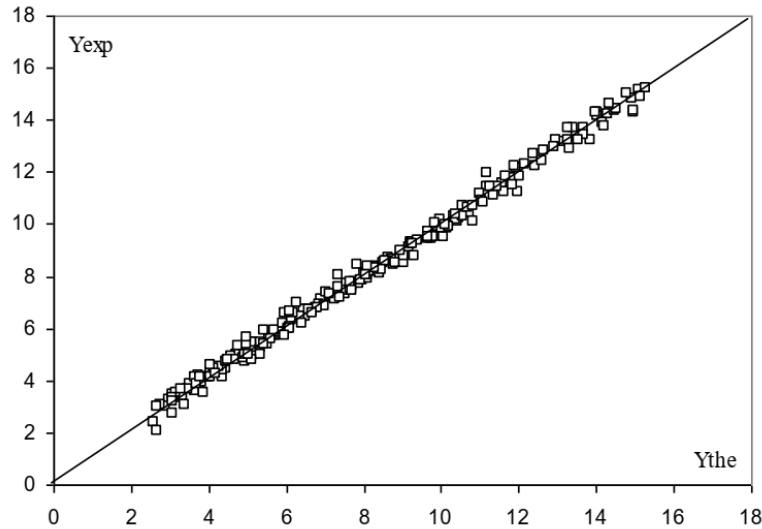


Figure III.15 : Variation de rapport des hauteurs conjuguées expérimentales Y_{exp} en fonction du rapport des hauteurs conjuguées théorique Y_{the} calculée selon la relation (3.35).

(—) Première bissectrice d'équation : $Y_{exp} = Y_{the}$. (Nouacer, B., 2023)

III.3.2.2. Longueurs caractéristiques du ressaut :

III.3.2.2.1 Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1 :

La longueur du ressaut hydraulique L_j a été définie comme la distance entre la section initiale (amont) et la section finale (aval) où la hauteur conjuguée h_2 est mesurée. L'objectif principal de cette étude était de caractériser la longueur relative L_j/h_1 pour différentes pentes de canal.

L'analyse de la relation $L_j/h_1 = f(F_1)$ révèle que la pente du canal n'exerce pas d'influence significative sur la longueur relative du ressaut. Cette observation est confirmée par les Figures III.16 à III.20, qui présentent l'évolution de L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident.

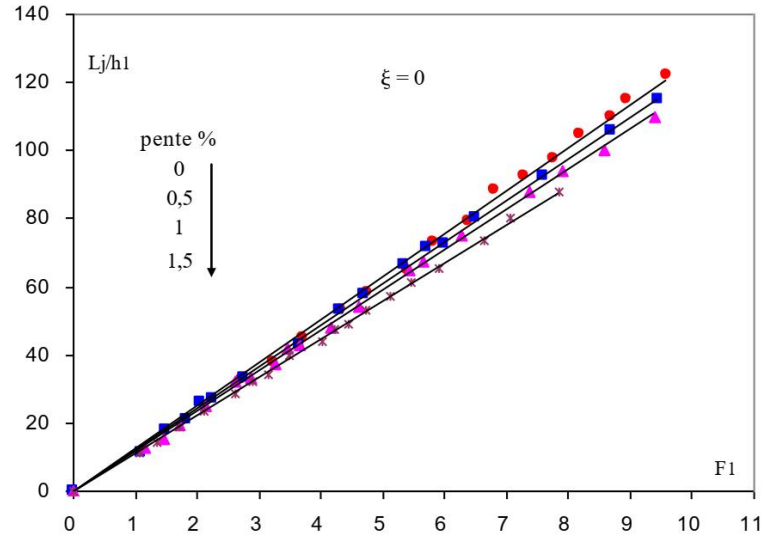


Figure III.16 : Variation de la longueur relative Lj/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (●) ; $\text{tana} = 0,005$ (■) ; $\text{tana} = 0,01$ (▲) ; $\text{tana} = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement. (Nouacer, B., 2023)

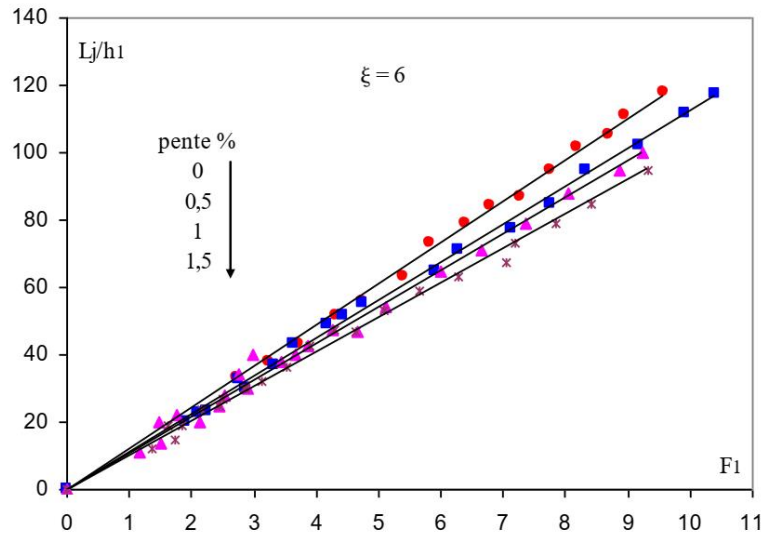


Figure III.17 : Variation de la longueur relative Lj/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (●) ; $\text{tana} = 0,005$ (■) ; $\text{tana} = 0,01$ (▲) ; $\text{tana} = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement. (Nouacer, B., 2023)

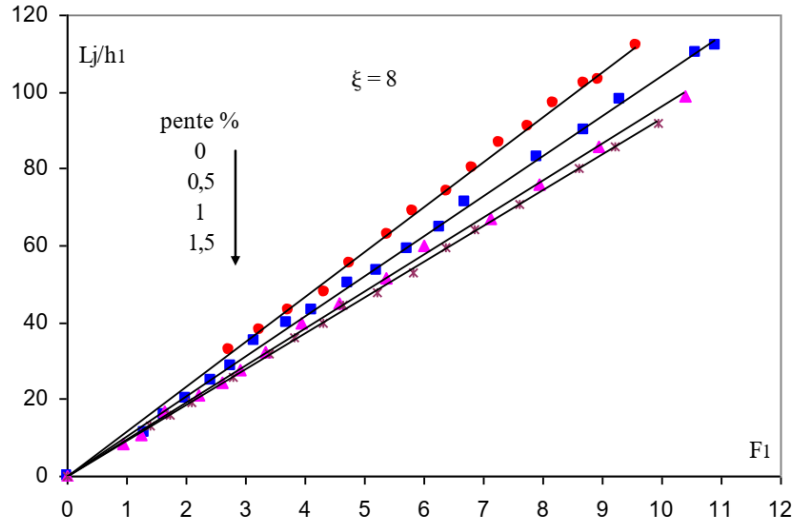


Figure III.18 : Variation de la longueur relative Lj/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (●) ; $\text{tana} = 0,005$ (■) ; $\text{tana} = 0,01$ (▲) ; $\text{tana} = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement. (Nouacer, B., 2023)

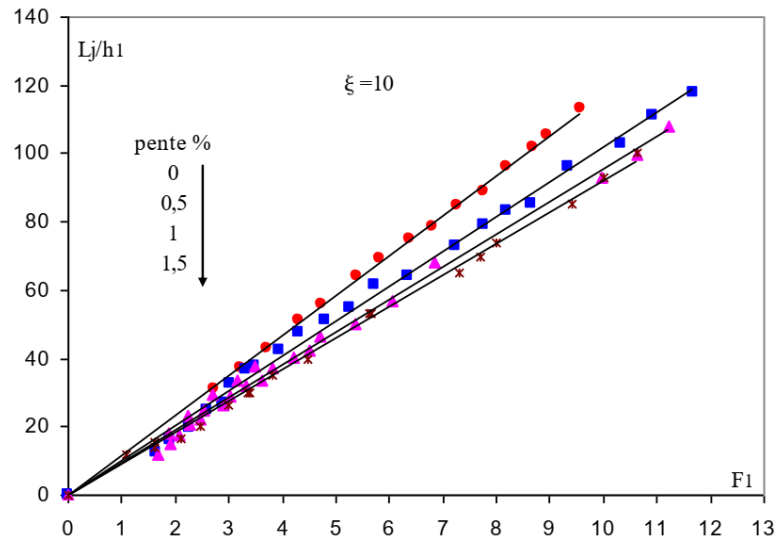


Figure 3.19 : Variation de la longueur relative Lj/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ (●) ; $\text{tana} = 0,005$ (■) ; $\text{tana} = 0,01$ (▲) ; $\text{tana} = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement. (Nouacer, B., 2023)

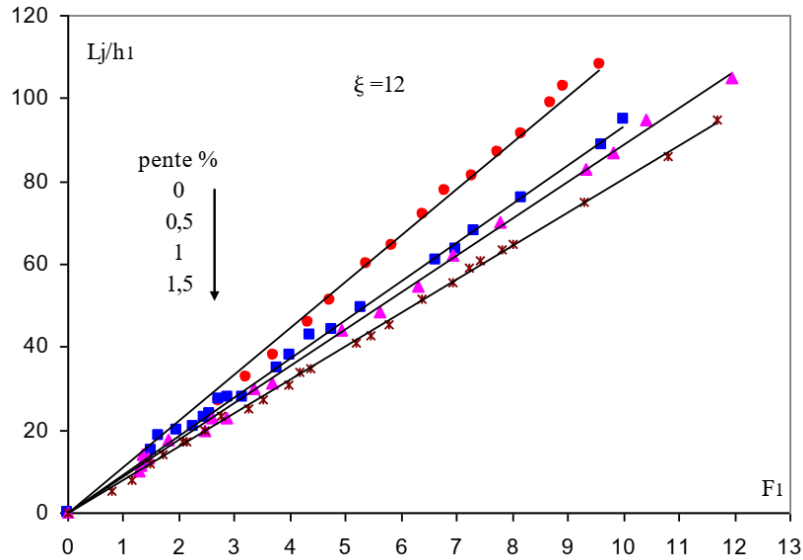


Figure III.20 : Variation de la longueur relative Lj/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\tan(\alpha)$
 $\tan\alpha = 0,00$ (●) ; $\tan\alpha = 0,005$ (■) ; $\tan\alpha = 0,01$ (▲) ; $\tan\alpha = -0,015$ (*) points expérimentaux. (—)
 Courbes d'ajustement. (Nouacer, B., 2023)

D'après les figures (III.16)    (III.20), l'ajustement des données expérimentales a révélé que la variation du rapport Lj/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident suit une relation linéaire de la forme $Lj/h_1 = a \cdot F_1$.

où le coefficient 'a' a été déterminé pour chacune des quatre pentes étudiées, comme présenté dans les Tableaux (III.12)    (III.16) .

Tableau III.12 : Valeurs des paramètres a_1

<i>Rugosité 00 mm</i>		
Tang α	a_1	R^2
0	12,62	0,9811
0,005	12,21	0,9872
0,01	11,79	0,9990
0,015	11,16	0,9992

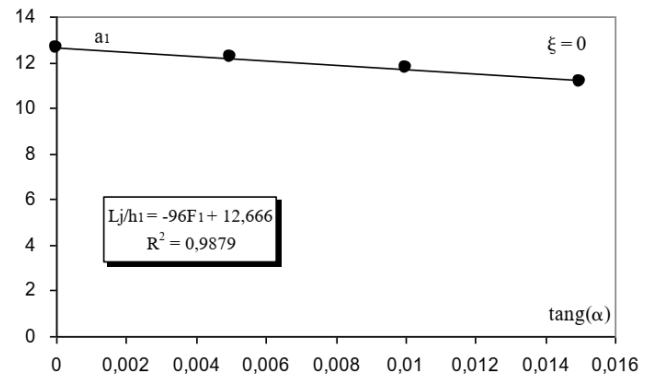
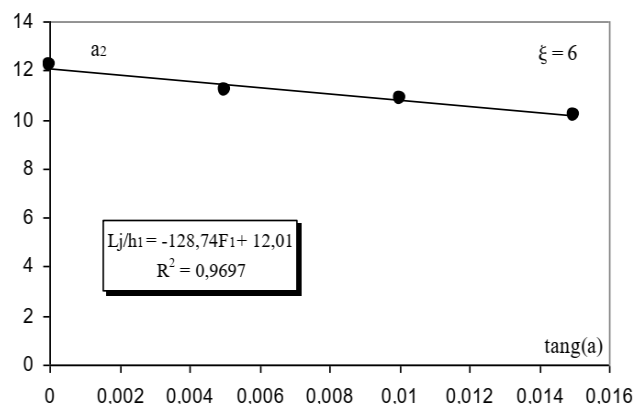


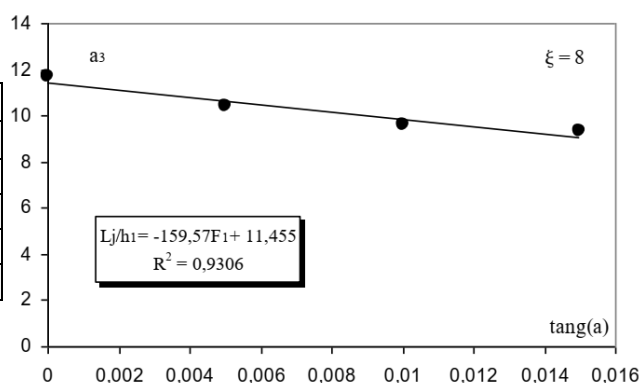
Figure III.21 : Variation du paramètre a_1
 en fonction de $\tan(\alpha)$.

Tableau III.13 : Valeurs des paramètres a_2

Rugosité 06 mm		
Tang α	a_2	R^2
0	12,209	0,9977
0,005	11,225	0,9976
0,01	10,827	0,9913
0,015	10,196	0,9950

**Figure III.22 : Variation du paramètre ' a ' en fonction de $\tan(\alpha)$.****Tableau III.14 : Valeurs des paramètres a_3**

Rugosité 08 mm		
Tang α	a_3	R^2
0	11,701	0,9989
0,005	10,408	0,9989
0,01	9,6221	0,9988
0,015	9,3034	0,9996

**Figure III.23 : Variation du paramètre ' a ' en fonction de $\tan(\alpha)$.****Tableau III.15 : Valeurs des paramètres a_4**

Rugosité 10 mm		
Tang α	a_4	R^2
0	11,7	0,9993
0,005	10,157	0,9951
0,01	9,536	0,994
0,015	9,1774	0,9972

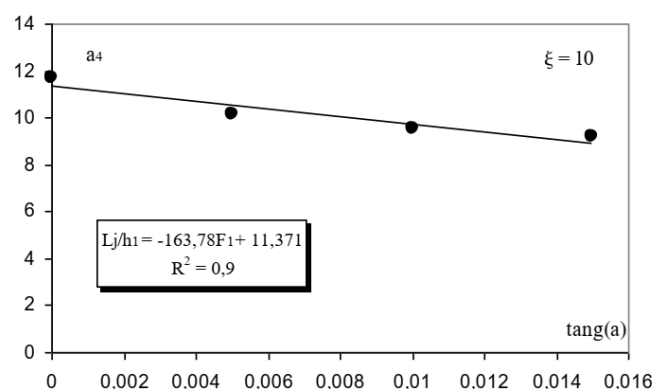
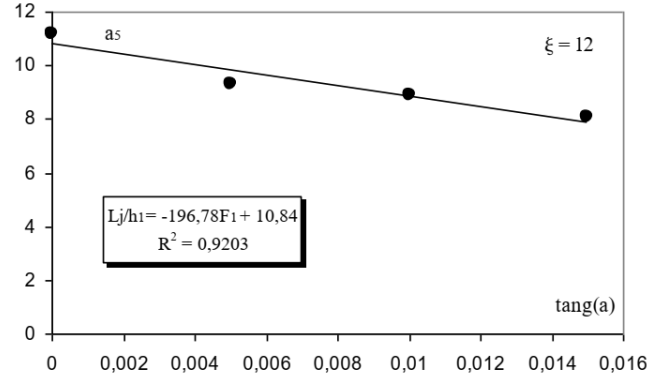
**Figure III.24 : Variation du paramètre ' a ' en fonction de $\tan(\alpha)$.**

Tableau III.16 : Valeurs des paramètres a_5

Rugosité 12 mm		
Tang α	a_5	R^2
0	11,185	0,9955
0,005	9,3351	0,9974
0,01	8,8793	0,9984
0,015	8,0572	0,9992

**Figure III.25 : Variation du paramètre ' a ' en fonction de $\tan(\alpha)$.**

Les figures (III.21)    (III.25) montrent clairement que la variation de ' a ' en fonction de la pente du canal $\tan(\alpha)$ suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 a_1 &= -96 \tan(\alpha) + 12.666 & R^2 &= 0.9879 & ; \varepsilon &= 00mm \\
 a_2 &= -128,7 \tan(\alpha) + 12.01 & R^2 &= 0.9677 & ; \varepsilon &= 06mm \\
 a_3 &= -159,57 \tan(\alpha) + 11.45 & R^2 &= 0.9306 & ; \varepsilon &= 08mm \\
 a_4 &= -163,78 \tan(\alpha) + 11.37 & R^2 &= 0.90 & ; \varepsilon &= 10mm \\
 a_5 &= -196,78 \tan(\alpha) + 10.84 & R^2 &= 0.9203 & ; \varepsilon &= 12mm
 \end{aligned} \tag{3.36}$$

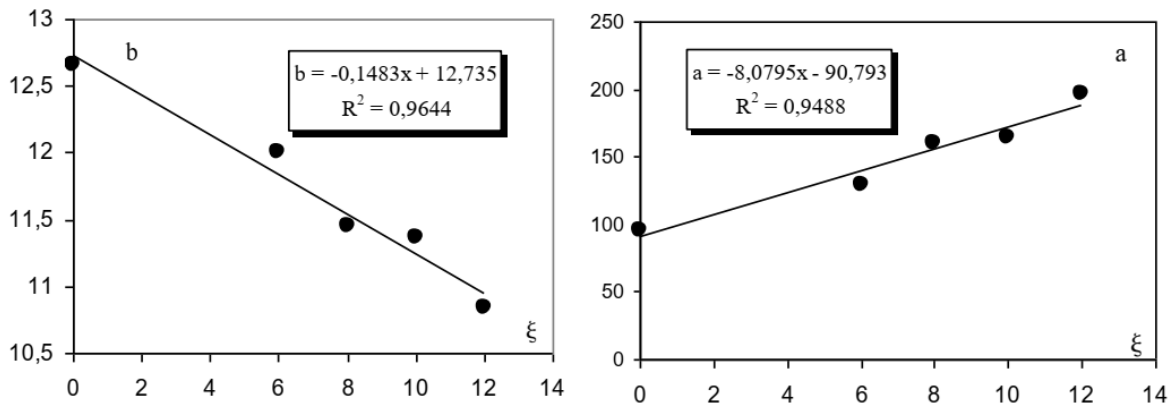
Rempla  ant les paramètres a par leurs expressions respectives dans la relation $Lj/h_1 = a F_1$, on aura :

$$\begin{aligned}
 Lj/h_1 &= [-96 \tan(\alpha) + 12,666] F_1 & ; \varepsilon &= 00mm \\
 Lj/h_1 &= [-128,7 \tan(\alpha) + 12,01] F_1 & ; \varepsilon &= 06mm \\
 Lj/h_1 &= [-159,57 \tan(\alpha) + 11,45] F_1 & ; \varepsilon &= 08mm \\
 Lj/h_1 &= [-163,78 \tan(\alpha) + 11,37] F_1 & ; \varepsilon &= 10mm \\
 Lj/h_1 &= [-196,78 \tan(\alpha) + 10,84] F_1 & ; \varepsilon &= 12mm
 \end{aligned} \tag{3.37}$$

Le tableau représente les valeurs " a " et " b " du coefficient de rugosité avec l'angle d'inclinaison du canal

Tableau III.17 : Valeurs des paramètres a et b

Tang(α)	0 ; 0,005 ; 0,01 ; 0,015		
Rugosité (ϵ)	a	b	R ²
0	-96	12,666	0,9879
6	-128,7	12,01	0,9697
8	-159,57	11,45	0,9306
10	-163,78	11,37	0,9000
12	-196,78	10,84	0,9203

**Figure III.26 : Variation du paramètre 'a' et 'b' en fonction de Rugosité (ϵ)**

La figure (3.23) montre clairement que la variation de 'a' et 'b' en fonction de la Rugosité (ϵ) suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$a^* = -8,0795(\epsilon) - 90,793 \quad R^2=0,9488 \quad (0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12) \quad (3.38)$$

$$b^* = -0,1478(\epsilon) + 12,73 \quad R^2=0,9637 \quad (0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12) \quad (3.39)$$

Il serait utile de regrouper les cinq relations en une équation globale, exprimée sous une forme approximative comme suit :

$$Lj/h_1^* = [(-8,0795(\epsilon) - 90,793)\tan \alpha + (-0,1478(\epsilon) + 12,73)]F_1 \quad (3.40)$$

La figure (3.27) démontre que la relation (3.40) présente un excellent accord avec les données expérimentales. Les points mesurés suivent précisément la première bissectrice, confirmant ainsi la validité de l'approche développée.

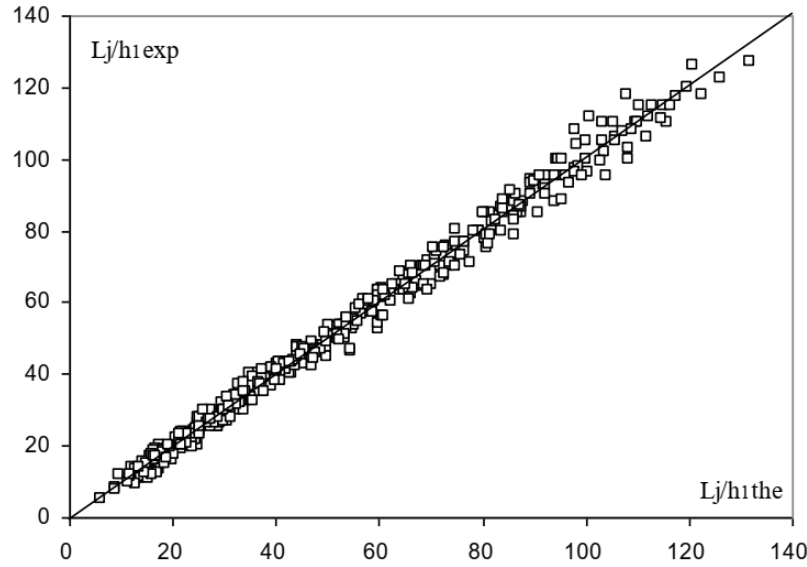


Figure III.27 : Variation de la relation $f(F_1, \alpha)$ en fonction de la hauteur relative L_j/h_1 du seuil. ($\square$) Points expérimentaux. (—) Première bissectrice d'équation : $f(F_1, \alpha) = L_j/h_1$. (Nouacer, B., 2023)

III.3.2.2.2. Variation de la hauteur relative du seuil S/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 :

Les figures III.28    III.32 illustrent graphiquement la variation de la hauteur relative du seuil (s/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1). Cette analyse est menée pour quatre angles d'inclinaison (α) distincts, où $\tan(\alpha)$ est égal à 0,00, 0,005, 0,01 et 0,015. L'étude intègre également différentes valeurs de rugosité absolue (ϵ mm) : 0 , 6 , 8 , 10 et 12.

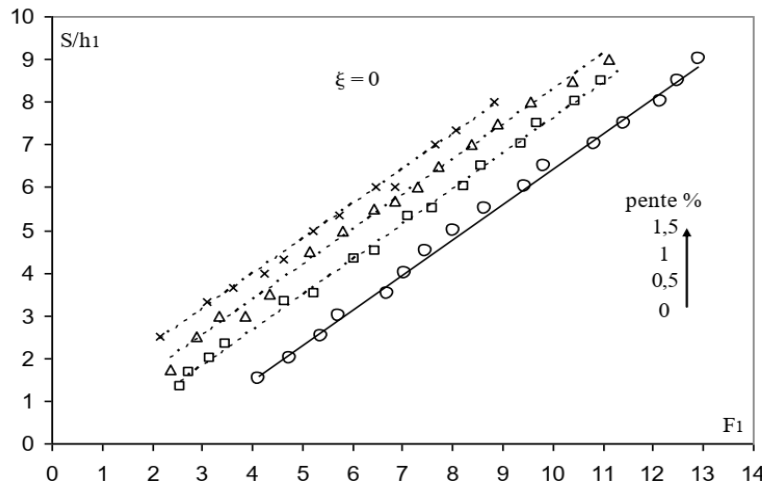


Figure III.28 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\tan \alpha = 0,00$ ($\circ$) ; $\tan \alpha = 0,005$ ($\square$) ; $\tan \alpha = 0,01$ (Δ) ; $\tan \alpha = 0,015$ ($\times$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement (Nouacer, B., 2023)

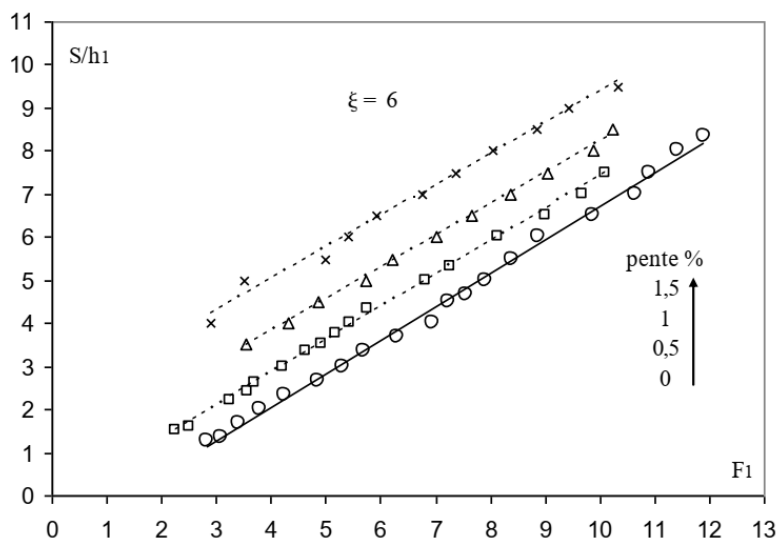


Figure III.29 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ ($\circ$) ; $\text{tana} = 0,005$ ($\square$) ; $\text{tana} = 0,01$ ($\triangle$) ; $\text{tana} = -0,015$ ($\times$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement (Nouacer, B., 2023)

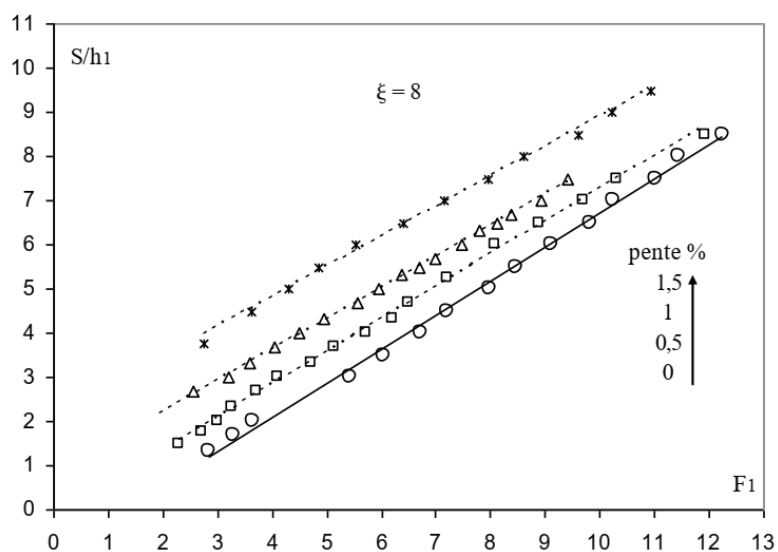


Figure III.30 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ ($\circ$) ; $\text{tana} = 0,005$ ($\square$) ; $\text{tana} = 0,01$ ($\triangle$) ; $\text{tana} = -0,015$ ($\times$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement (Nouacer, B., 2023)

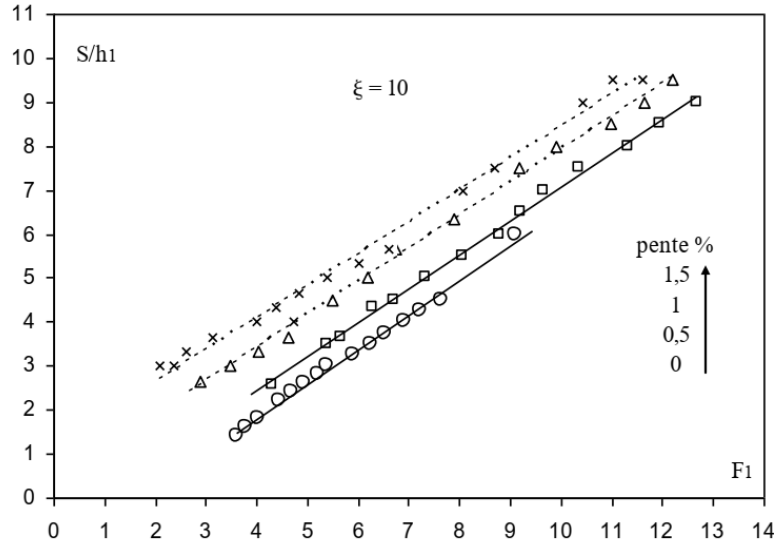


Figure III.31 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ ($\bigcirc$) ; $\text{tana} = 0,005$ ($\square$) ; $\text{tana} = 0,01$ ($\triangle$) ; $\text{tana} = -0,015$ ($\times$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement (Nouacer, B., 2023)

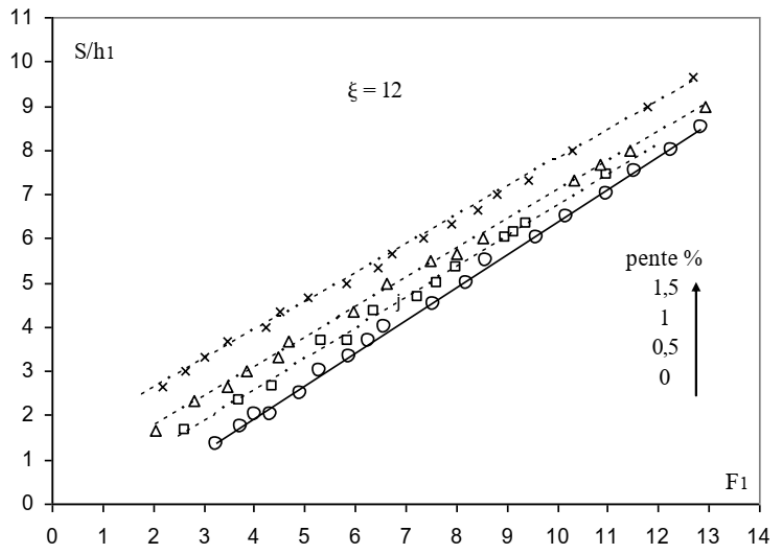


Figure III.32 : Variation de la hauteur relative s/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour $\text{Tang } \alpha = 0,00$ ($\bigcirc$) ; $\text{tana} = 0,005$ ($\square$) ; $\text{tana} = 0,01$ ($\triangle$) ; $\text{tana} = -0,015$ ($\times$) points expérimentaux. (—) Courbes d'ajustement (Nouacer, B., 2023)

L'analyse des résultats indique que la hauteur relative s/h_1 croît proportionnellement à l'augmentation du nombre de Froude F_1 , et ce pour toutes les valeurs de rugosité testées. Par ailleurs, une augmentation de la rugosité absolue (ε) entraîne une réduction de la hauteur relative s/h_1 . Ce phénomène est attribué à la rugosité du fond du canal, qui favorise une plus grande compacité du ressaut hydraulique.

Les figures (III.28)    (III.32), illustrent que l'ajustement des mesures expérimentales de la variation du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , suit une loi de type linéaire de la forme : $S/h_1 = a F_1 + b$

Les tableaux (III.18)    (III.22) représentent le paramètre 'a' pour les quatre valeurs de pentes considérées.

Tableau III.18 : Valeurs des paramètres a et b_1

Rugosité 00 mm			
Tang α	a	b	R²
0	0,8304	-1,86	0,9968
0,005	0,8273	-0,67	0,9974
0,01	0,8222	0,06	0,9984
0,015	0,8175	0,67	0,9992
	$a \approx 0,8243$		

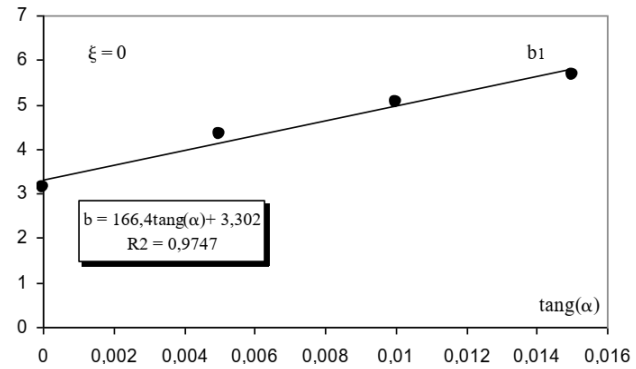


Figure III.33 : Variation du paramètre 'b' en fonction de $\tan(\alpha)$.

Tableau III.19 : Valeurs des paramètres a et b_2

Rugosité 06 mm			
Tang α	a	b	R²
0	0,7774	-1,0807	0,9962
0,005	0,7588	-0,2128	0,9982
0,01	0,7328	0,88	0,9983
0,015	0,7241	2,117	0,992
	$a \approx 0,7482$		

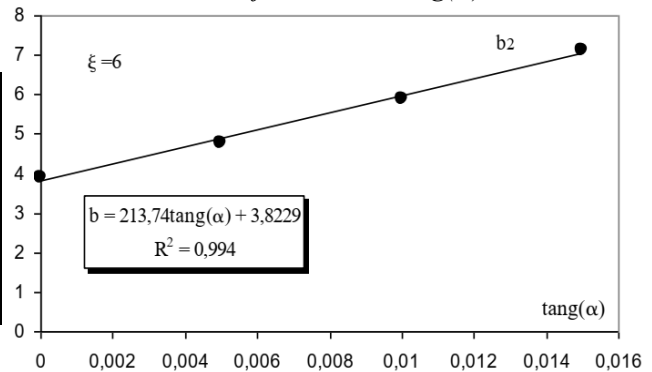


Figure III.34 : Variation du paramètre 'b' en fonction de $\tan(\alpha)$.

Tableau III.20 : Valeurs des paramètres a et b_3

Rugosité 08 mm			
Tang α	a	b	R²
0	0,7699	-1,0002	0,9968
0,005	0,7389	-0,1479	0,9983
0,01	0,7000	0,8238	0,9988
0,015	0,6811	2,0817	0,9975
	$a \approx 0,72247$		

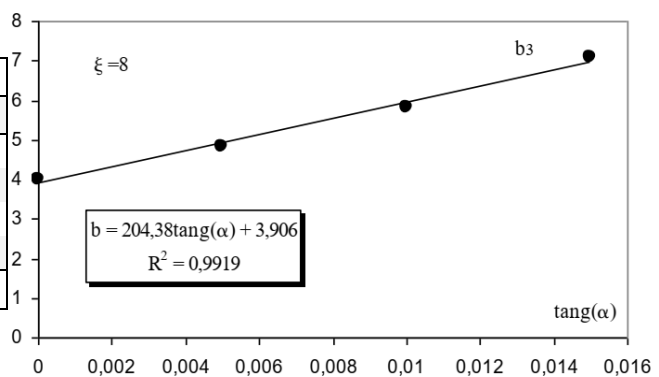
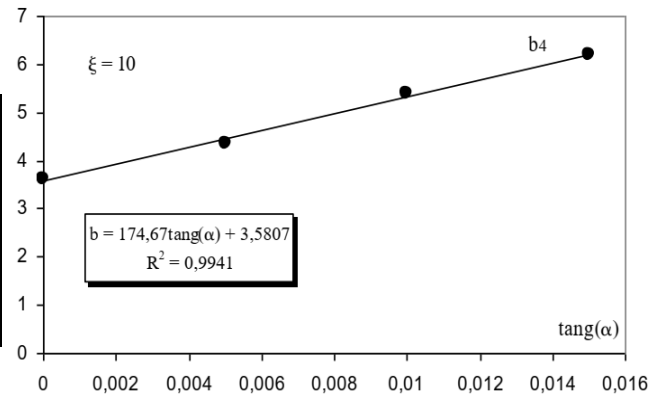


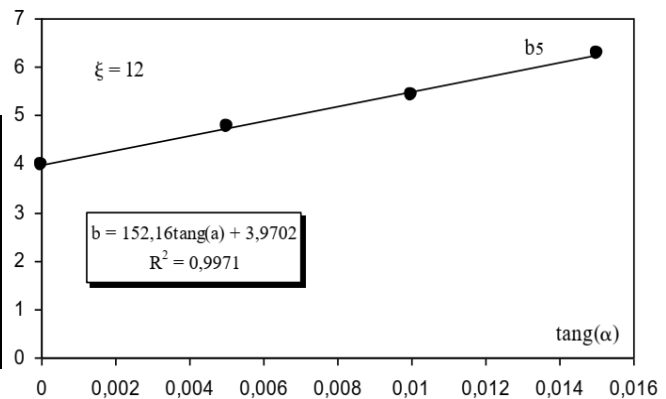
Figure III.35 : Variation du paramètre 'b' en fonction de $\tan(\alpha)$.

Tableau III.21 : Valeurs des paramètres a et b₄

Rugosité 10 mm			
Tang à	a	b	R²
0	0,7888	-1,3679	0,9968
0,005	0,7715	-0,6623	0,9983
0,01	0,7498	0,4058	0,9988
0,015	0,7250	1,1872	0,9975
	<i>a</i> ��0,7587		

**Figure III.36 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang (  )****Tableau III.22 : Valeurs des paramètres a et b₅**

Rugosité 12 mm			
Tang à	a	b	R²
0	0,7378	-1,0202	0,9984
0,005	0,6959	-0,245	0,9966
0,01	0,6667	0,4151	0,9966
0,015	0,6486	1,2957	0,9982
	<i>a</i> ��0,6872		

**Figure III.37 : Variation du paramètre 'b' en fonction de tang(  )**

Les figures (III.33)    (III.37) montrent clairement que la variation de 'b' en fonction de la pente du canal $\tan(\alpha)$ suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$\begin{aligned}
 b_1 &= 166,4 \tan(\alpha) - 1,698 & R^2 &= 0,9747 & ; \varepsilon &= 00\text{mm} \\
 b_2 &= 213,74 \tan(\alpha) - 1,1771 & R^2 &= 0,9994 & ; \varepsilon &= 06\text{mm} \\
 b_3 &= 204,38 \tan(\alpha) - 1,094 & R^2 &= 0,9919 & ; \varepsilon &= 08\text{mm} \\
 b_4 &= 174,67 \tan(\alpha) - 1,4193 & R^2 &= 0,9747 & ; \varepsilon &= 10\text{mm} \\
 b_5 &= 152,16 \tan(\alpha) - 1,0298 & R^2 &= 0,9971 & ; \varepsilon &= 12\text{mm}
 \end{aligned} \tag{3.41}$$

Remplaçant les paramètres a par leurs expressions respectives dans la relation $s/h_1 = a F_1 + b$, on aura :

$$\begin{aligned}
s/h_1 &= [-0,0117(\varepsilon) + 0,8163] F_1 + [166,4 \tan(\alpha) - 1,698] & ; \varepsilon = 00\text{mm} \\
s/h_1 &= [-0,0117(\varepsilon) + 0,8163] F_1 + [213,74 \tan(\alpha) - 1,1771] & ; \varepsilon = 06\text{mm} \\
s/h_1 &= [-0,0117(\varepsilon) + 0,8163] F_1 + [204,38 \tan(\alpha) - 1,094] & ; \varepsilon = 08\text{mm} \\
s/h_1 &= [-0,0117(\varepsilon) + 0,8163] F_1 + [174,67 \tan(\alpha) - 1,4193] & ; \varepsilon = 10\text{mm} \\
s/h_1 &= [-0,0117(\varepsilon) + 0,8163] F_1 + [152,16 \tan(\alpha) - 1,0298] & ; \varepsilon = 12\text{mm}
\end{aligned} \tag{3.42}$$

Le tableau représente les valeurs $\bar{b}$ du coefficient de rugosité avec l'angle d'inclinaison du canal

Tableau III.23 : Valeurs des paramètres $\bar{b}$

Rugosité (ε)	$\bar{b}$	R^2
0	166,4	0,9747
6	213,74	0,994
8	204,38	0,9919
10	174,67	0,9941
12	152,16	0,9971

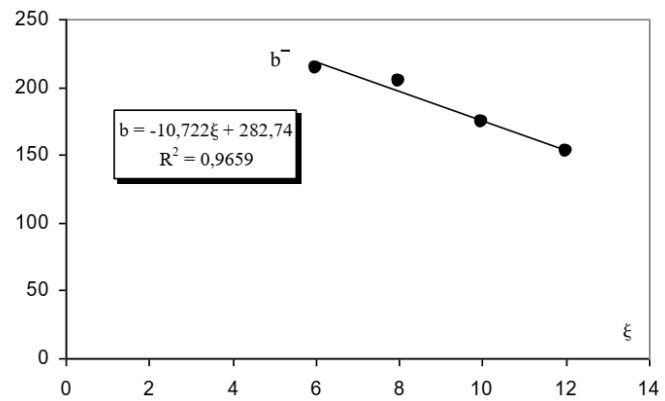


Figure III.38 : Variation du paramètre ' $\bar{b}$ '

en fonction de Rugosité (ε)

La figure (III.38) montre clairement que la variation de $\bar{b}$ en fonction de la rugosité (ε) suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$\bar{b} = -10,722(\varepsilon) + 282,74 \quad R^2 = 0,9659 \quad \varepsilon = (0; 6; 8; 10; 12) \tag{3.43}$$

Il serait pratique de reformuler les cinq relations en une équation inclusive sous la forme suivante :

$$S/h_1^* = [(-0,0117(\varepsilon) + 0,8163)]F_1 + [(-10,722(\varepsilon) + 282,74)]\tan(\alpha) - 1,18 \tag{3.44}$$

III.3.3 Conclusion

Ce chapitre présente les résultats expérimentaux et l'étude semi-théorique du ressaut hydraulique évoluant en canal rectangulaire incliné à fond rugueux.

Nous avons exposé une relation d'approximation pour remplacer l'expression semi-théorique implicite en Y , permettant de relier le rapport des hauteurs conjuguées Y au coefficient de résistance Cr et au nombre de Froude incident F_1 . La relation entre Cr et la rugosité absolue ε conduit à la forme $f(Y, F_1, \alpha, \varepsilon)$.

Les mesures expérimentales du rapport h_2/h_1 pour cinq rugosités montrent qu'il croît avec F_1 et décroît avec la rugosité. Un ajustement linéaire fournit une équation reliant Y, F_1, α et ε .

L'étude de la longueur relative Lj/h_1 en fonction de F_1 révèle une relation linéaire, et un ajustement de type puissance est également possible. Enfin, nous avons exposé selon l'auteur la variation de la hauteur relative du seuil S/h_1 variant en fonction du nombre de Froude incident F_1 .

CONCLUSION DE LA PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

La phase initiale de cette étude a été consacrée à une revue systématique de la littérature concernant le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques. Structurée en trois chapitres, cette analyse présente une synthèse détaillée des connaissances fondamentales sur le ressaut hydraulique, puis s'intéresse spécifiquement aux ressauts inclinés et horizontaux dans deux profils principaux : le canal rectangulaire à fond rugueux et le canal rectangulaire composé avec le lit majeur rugueux.

Le premier chapitre introduit les bases essentielles pour comprendre la dynamique des écoulements à surface libre, en définissant les types de canaux et la classification des écoulements. Il présente le nombre de Froude comme paramètre clé pour distinguer les régimes fluvial et torrentiel, et anticiper les conditions d'apparition de phénomènes complexes tels que le ressaut hydraulique, ce qui est défini comme la transition brutale entre ces deux régimes, un phénomène caractérisé par ses hauteurs conjuguées et ses longueurs caractéristiques. Enfin, le chapitre expose l'historique des recherches, comme Bidone et Bélanger aux études contemporaines sur les géométries complexes.

Le second chapitre a eu pour but d'examiner les principaux travaux concernant le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux, réalisés par Lacheheb. S (2023) dans laquelle il a mené une analyse semi-théorique et expérimentale du ressaut hydraulique. Dans un premier temps, l'approche semi-théorique a été analysée expérimentalement afin d'établir une expression explicite du rapport Y , permettant d'évaluer directement cette grandeur en fonction de Cr et du nombre de Froude imposé au lit majeur du canal composé. Dans un second temps, les valeurs expérimentales de Y ont été comparées à celles issues de l'approche empirique adimensionnelle développée (Y_{appr}), dépendante de Fr et Cr . Cette comparaison a confirmé la cohérence de l'approche théorique et la qualité des mesures expérimentales. Les écarts relevés entre les deux expressions demeurent en majorités inférieurs à 5 %, attestant de la fiabilité du modèle et de la validité des essais réalisés. Aussi l'étude expérimentale a permis de quantifier l'impact de la rugosité du lit majeur sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé. Les approches adimensionnelles développées démontrent systématiquement que cette rugosité réduit significativement la longueur du ressaut (L_j), la longueur du rouleau de surface (L_r) et le rapport

des hauteurs conjuguées (Y). Enfin, l'analyse confirme son rôle prépondérant dans l'augmentation du rendement énergétique (η), optimisant ainsi la dissipation de l'énergie cinétique.

Pour le troisième chapitre concernant les travaux réalisés par Nouacer. B (2023) sur le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux, il a développé une approche visant à établir la relation fonctionnelle générale $f(F_1, Y, Cr) = 0$ pour décrire le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince dans un canal rectangulaire à pente positive variable. Pour $\alpha = 0$, cette relation se réduit à la formulation classique, confirmant la validité du modèle. L'analyse expérimentale a permis d'obtenir un coefficient de correction de volume $k = 0,92$, garantissant une bonne concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales du nombre de Froude (écarts $< 5\%$). La relation implicite en Y a nécessité une résolution itérative, ce qui a motivé la proposition d'une expression explicite approchée, présentant des écarts généralement inférieurs à 5% . Les mesures du rapport h_2/h_1 montrent qu'il augmente avec F_1 et diminue avec la rugosité, une loi linéaire ayant été ajustée. L'évolution de la longueur relative L_j/h_1 avec F_1 suit également une tendance linéaire. Enfin, la variation du rapport s/h_1 selon F_1 a été analysée pour compléter la caractérisation du ressaut hydrauliques pour différentes sections géométriques. On recommanderait pour ce type de ressaut évoluant en canal rectangulaire rugueux et avec pente positive de réexaminer expérimentalement pour bien mené les différentes approches expérimentales permettant de dimensionner les ouvrages hydrauliques notamment les bassins d'amortissement.

Deuxième Partie

Etude expérimentale

INTRODUCTION DE LA DEUXIEME PARTIE

La deuxième partie de notre étude est consacrée à l'analyse expérimentale du ressaut hydraulique contrôlé se développant dans un canal rectangulaire composé avec lit majeur rugueux et pente positive. L'objectif principal de cette investigation est d'évaluer l'influence conjointe de la rugosité du lit majeur et de la pente du canal sur les caractéristiques hydrauliques du ressaut, telles que la longueur, les hauteurs conjuguées et la dissipation d'énergie.

L'étude expérimentale a été réalisée pour quatre hauteurs initiales d'écoulement : $h_1 = 2,5$ cm ; 3 cm ; 3,5 cm et 4 cm. Pour chaque hauteur considérée, le canal a été soumis avec quatre valeurs de pente positive, correspondant à des angles d'inclinaison égales à 0,5 %, 1 % et 1,5 %, ainsi pour cinq tapis rugueux testés imposés au lit majeur du canal d'essai, définis par des hauteurs de rugosité $\varepsilon = 0$ mm ; 6 mm ; 8 mm ; 10 mm et 12 mm. Cette configuration expérimentale a permis d'explorer une large gamme de nombres de Froude incident, comprise entre $2 \leq F_1 \leq 8$, représentative des conditions typiques de ressauts hydrauliques contrôlés.

Afin de structurer l'analyse et de présenter de manière cohérente les résultats obtenus, cette deuxième partie est subdivisée en trois chapitres, chacun abordant un aspect spécifique du dispositif expérimental, de la méthodologie de mesure et de l'interprétation des résultats.

- ❖ **Le premier chapitre** de cette seconde partie sera consacré à la description détaillée du dispositif expérimental ayant servi de support à l'étude du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé avec pente positive. Ce chapitre présentera les caractéristiques géométriques du canal, les conditions aux limites, les dispositifs de mesure, ainsi que les procédures expérimentales adoptées pour bien mener l'expérimentation avec précision et la production des résultats.
- ❖ **Le deuxième chapitre** concernant le développement de l'approche théorique visant à modéliser et caractériser le comportement de l'écoulement dans ce type de canal. Une attention particulière sera accordée à l'évaluation de l'efficacité de cette approche pour les écoulements brusquement variés, que ceux observés au sein des ouvrages hydrauliques notamment développé au sein des bassins d'amortissement.

- ❖ **Enfin, le troisième et dernier chapitre** sera dédié à l'exploitation et à l'analyse des résultats expérimentaux recueillis. Cette partie mettra en évidence les relations expérimentales établies à partir des mesures, permettant de caractériser ces écoulements réalisés dans les canaux rectangulaires de section composée avec lit majeur rugueux et avec pente positive. L'objectif fondamental sera de présenter des différentes approches pratiques adimensionnelles à caractères général, susceptibles de contribuer à une meilleure modélisation et conception des ouvrages hydrauliques notamment les bassins d'amortissement.

Chapitre I

Description et fonctionnement du modèle expérimental

I.1. INTRODUCTION :

Ce chapitre vise à exposer tous les instruments et le Protocole expérimental qui gèrent les caractéristiques du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux et pente positive. On va présenter essentiellement le protocole expérimental, incluant la description du canal rectangulaire à section composée, ainsi que des appareils et instruments utilisés pour mesurer les caractéristiques du ressaut hydraulique.

I.2. POSITION DU PROBLEME

La problématique étudiée consiste à analyser les conditions d'apparition et de stabilité du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire à section composée avec une pente positive. L'augmentation du débit tend à déplacer le ressaut vers l'aval, ce qui nécessite une adaptation des dispositifs de contrôle, notamment par la modification de la hauteur du seuil. Cette intervention entraîne une variation de la hauteur finale h_2 , influençant directement les caractéristiques de l'écoulement.

Dans ce contexte, l'écoulement se développe lorsque le niveau d'eau dépasse la partie rectangulaire du canal et s'établit dans la section composée, où la condition $h_2 \geq h$ est vérifiée. L'enjeu principal est de déterminer l'effet de la partie élargie et rugueuse du lit majeur et l'inclinaison du canal sur les paramètres hydrauliques, tels que les hauteurs conjuguées, sa longueur L_j et longueur de rouleau L_r et la dissipation d'énergie.

I.3. LE PROTOCOLE EXPERIMENTAL :

Au laboratoire EVRNZA de l'université d'Ouargla, des expériences ont été menées dans un canal rectangulaire à section composée, doté d'un lit majeur rugueux et d'une pente positive, dans le but d'étudier les ressauts hydrauliques. Toutes les expériences ont été réalisées dans un canal à surface libre. Les dimensions de ce canal sont de 10 mètres de longueur, 0,5 mètre de hauteur, et ses parois latérales sont en plexiglas (figure I.1).

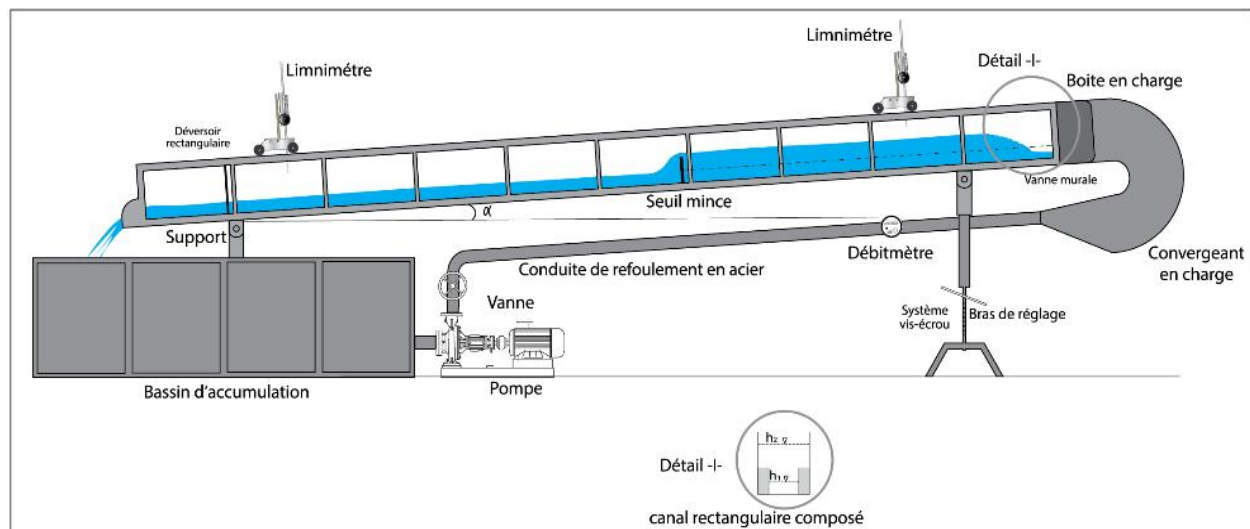


Figure I.1. Schéma simplifié du canal de mesure de section rectangulaire composée avec pente positive variable, ayant servi à l'expérimentation

Les expérimentations ont été réalisées sur une partie du canal d'une longueur de 4 m et d'une hauteur $h = 15,5$ cm, avec un lit mineur de largeur $b = 14,4$ cm et un lit majeur $B = 25$ cm (Figure I.2), formant une section rectangulaire composée. La partie amont du canal est montée sur un mécanisme à vis-écrou, permettant des ajustements d'élévation par un bras métallique qui actionne la vis, modifiant ainsi les valeurs de pente.



Photo I.1. Ressaut hydraulique évoluant dans canal rectangulaire composé.



Photo I.2. La section composée du canal avec lit majeur rugueux

Le canal est relié au bassin d'alimentation par une conduite circulaire de 150 mm de diamètre, aboutissant à une boîte métallique étanche. Une ouverture est pratiquée dans une paroi métallique plane d'une largeur spécifique, créant une entrée dans le canal. Cette paroi est conçue pour générer un écoulement torrentiel avec une section de sortie variable afin d'assurer un régime torrentiel. La hauteur de cet écoulement correspondra à la hauteur initiale h_1 ($h_1 = 2,5 \text{ cm} ; 3 \text{ cm} ; 3,5 \text{ cm} ; 4 \text{ cm}$), choisie pour atteindre des gammes pratiques de nombre de Froude ($Fr \approx 2 - 8$) adéquates pour des scénarios réels. Une vanne réglable permet de contrôler les débits volumiques.

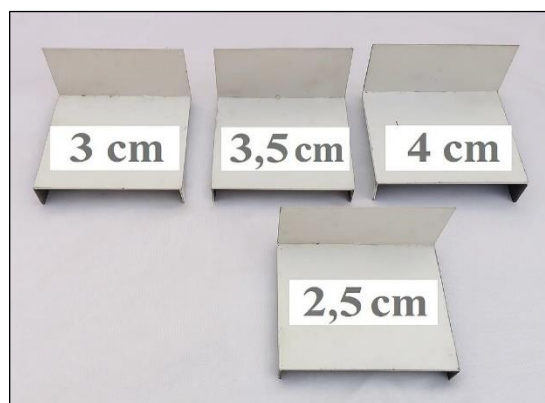


Photo I.3. Les ouvertures amont h_1 (cm) : 2,5 ; 3 ; 3,5 ; 4

Avec un débit arrivant à 55 l/s, le canal est alimenté par une pompe axiale. Quatre tapis rugueux ont été testées de valeurs différentes suivantes ($\epsilon = 6 \text{ mm}$, 8 mm, 10 mm, 12 mm) pour simuler des conditions naturelles, en assurant une homogénéité de l'écoulement.



Photo I.4. Pompe axiale



Photo I.5. Vanne de régulation du débit.

Des granulés plastiques perforés ont été fixés comme éléments de rugosité le long du lit majeur du canal à l'aide de fil de pêche et de colle résistante pour assurer leur durabilité face à l'écoulement torrentiel. Ces éléments ont été préférés à d'autres matériaux (papier, verre, tôle métallique ou gravier) en raison de leur rigidité et de leur résistance aux conditions de fort débit, comme c'est illustré dans la Figure I.6.

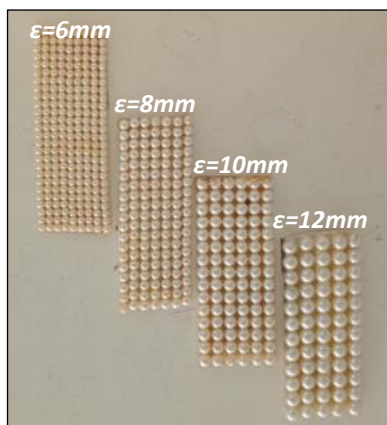


Photo I.6. Les divers tapis rugueux et leur préparation

I.4. INSTRUMENTS DE MESURE

I.4.1. Mesure du débit volumique

Le banc d'essai, constitué d'un canal à section composée avec un lit majeur rugueux sur une longueur de 4 m, est connecté en aval à un canal rectangulaire intégrant un déversoir de section rectangulaire, doté d'une contraction latérale et sans hauteur de pelle. Ce déversoir a été conçu et testé par (Hachemi Rachedi, L., 2006), permettant la mesure directe des débits d'écoulement.



Photo I.7. Déversoir de section rectangulaire pour mesurer des débits volumiques.

Lors du passage du débit (Q) à travers les deux parois du débitmètre, la hauteur de la lame d'eau (h_{dev}) traversant le déversoir est relevée à l'aide d'un limnimètre positionné au-dessus de celui-ci. Ainsi, le débit spécifique est calculé en insérant la hauteur (h_{dev}) dans l'équation (1.1) du déversoir.

$$Q = 0,3794B\sqrt{2g}\beta(1 + 0,16496\beta^{2,0716})^{3/2} h_{dev}^{3/2} \quad (1.1)$$

Avec :

Q : le débit en (m^3/s);

B : la largeur du canal en (m), $B=25cm$;

b : largeur de l'échancrure, $b=11cm$;

β : Rapport de forme, $\beta = b/B = 11/25 = 0.44$;

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

h_{dev} : la hauteur de la lame d'eau (m).

I. 4.2. Limnimétrie

À l'exception de la hauteur initiale du ressaut, qui correspond à la hauteur générée par la section de sortie du convergent en charge, les profondeurs d'eau dans le canal de mesure ont été déterminées à l'aide d'un limnimètre. Cet instrument est composé d'une règle métallique mobile, équipée à son extrémité inférieure d'une pointe verticale (pointe limnimétrique) destinée à affleurer la surface de l'eau (Photo I.8).

La lecture sur le limnimètre se déroule en deux étapes : On relève d'abord la graduation sur la règle située juste au-dessus du zéro du vernier. Ensuite, on note le nombre de cinquantièmes correspondant à la division la plus proche ou coïncidant avec une division de la règle.

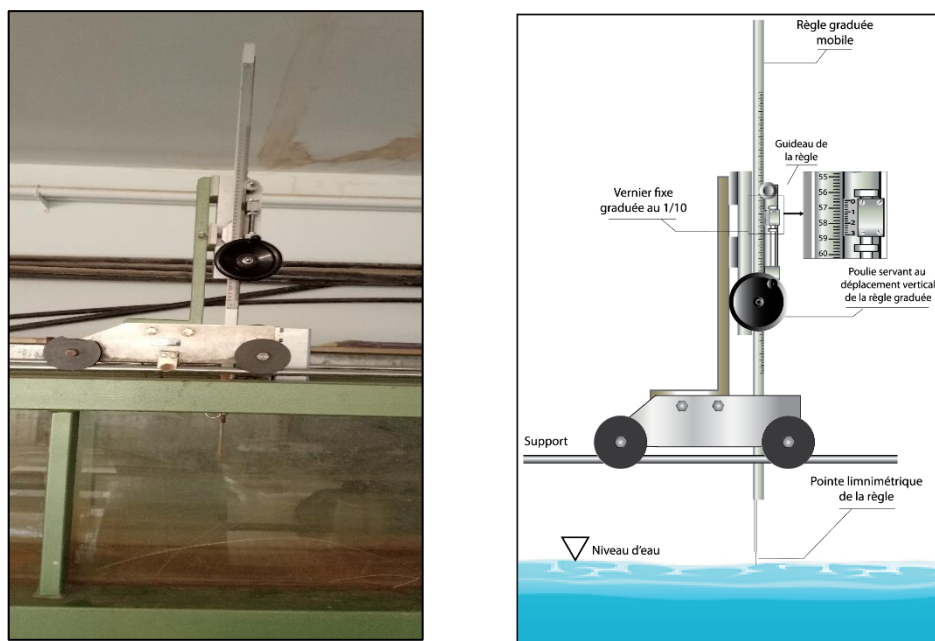


Photo I.8. Instrument de mesure de la profondeur d'eau par pointe limnimétrique de la règle.

I. 4.3. Les seuils minces

Une série de 26 seuils de forme rectangulaire (figure I.9) utilisés dans notre dispositif expérimental, dans le but de contrôler et former le ressaut hydraulique, de différentes hauteurs : s (cm) = 2.5 ; 3 ; 4 ; 4.5 ; 5 ; 5.5 ; 6 ; 6.5 ; 7 ; 7.5 ; 8 ; 8.5 ; 9 ; 9.5 ; 10 ; 11 ; 12 ; 13 ; 14 ; 15 ; 16 ; 17 ; 18 ; 19 ; 20 et 21, fixé à l'aval du canal rectangulaire composé.

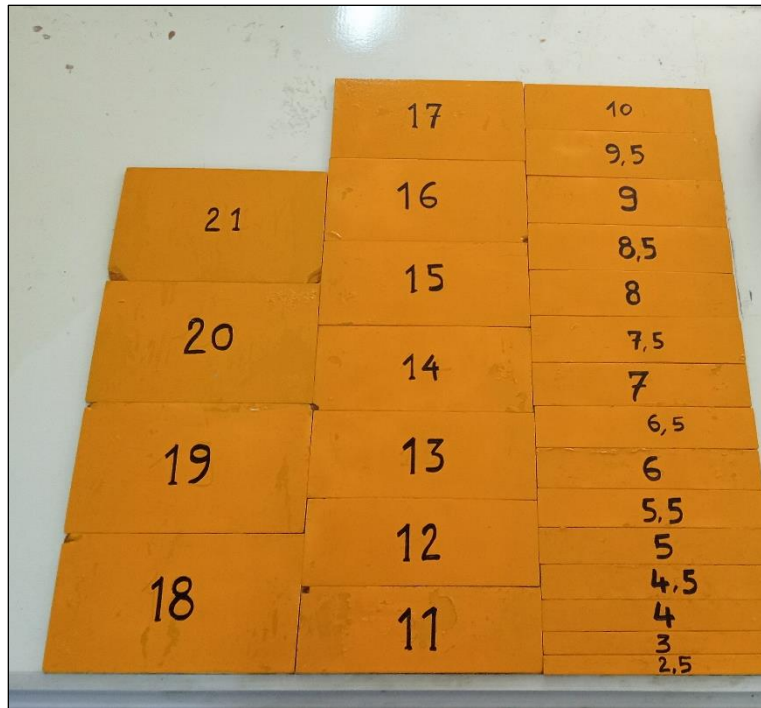


Photo I.9. Les parois minces (seuils) pour contrôler la formation du ressaut hydraulique.

Suite à la conception des parois de contrôle, la formation des écoulements pour les deux régimes dépend de l'emplacement de ces dispositifs minces placés perpendiculairement à l'écoulement, pour une hauteur et une position prédéfinie de la paroi (seuil). Pour chaque formation de ressaut, il est nécessaire de recenser les caractéristiques suivantes : les longueurs de l'écoulement h_1 , h_2 , L_j , L_r , le nombre de Froude et le débit volumique pompé. Ces résultats dimensionnels permettront de générer les rapports adimensionnels suivants :

F_1 : le nombre de Froude $F_1 = \sqrt{\frac{Q^2}{gb^2h_1^3}}$

$Y = h_2/h_1$: le rapport des hauteurs conjuguées

L_j/h_1 : le rapport de longueur relative de ressaut

L_r/h_1 : le rapport de longueur relative de rouleau

$\varepsilon/(B-b)$: La rugosité relative du lit majeur.

I.4.4 Mesure de l'angle d'inclinaison

La détermination et la mesure précise de la pente du canal sont indispensables pour l'étude du ressaut hydraulique, car elles conditionnent directement les caractéristiques de l'écoulement et les mécanismes de dissipation d'énergie. L'installation expérimentale est équipée d'un système vis-écrou (Photo I.10) permettant d'ajuster l'angle du canal avec précision. Ce dispositif, activé par un bras métallique rotatif, assure des variations d'inclinaison uniformes. Par ailleurs, un niveau topographique de haute précision est utilisé pour contrôler et mesurer l'angle d'inclinaison, réduisant ainsi les incertitudes liées aux mesures.



Photo I.10. vue d'ensemble du canal d'essai et le mécanisme à vis-écrou

La présente étude se consacre à l'examen approfondi des ressauts hydrauliques se produisant dans un canal rectangulaire à section composée, caractérisé par la présence d'un lit majeur rugueux et par l'introduction de pentes longitudinales positives, sous différentes conditions hydrauliques et géométriques. Quatre valeurs de pente ont été retenues, définies par $\tan(\alpha)=0$; 0,005; 0,01 et 0,015, de manière à couvrir une apparition allant d'un canal horizontal à des configurations assez inclinées. Ces valeurs ont été choisies en raison de leur faisabilité expérimentale en laboratoire et de leur pertinence pour l'élaboration de relations empiriques adimensionnelles applicables aux ouvrages hydrauliques réels.

La précision des réglages de pente est assurée par le système vis-écrou, dont la fiabilité a été confirmée par des mesures topographiques. Cette combinaison garantit des erreurs relatives minimales, permettant ainsi de limiter les incertitudes expérimentales et de répondre aux contraintes inhérentes à la mise en œuvre des essais.

Chapitre II

Etude théorique

II.1 INTRODUCTION

Ce chapitre de notre étude est principalement consacré à un développement théorique visant à établir une relation semi-théorique de la forme $F_1 = f(Y, Cr, \lambda, \beta, \tau, \alpha)$, où : F_1 est le nombre de Froude de l'écoulement incident, $Y = h_2/h_1$ est le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique, $\lambda = L_j/h_1$ est la longueur relative du ressaut, β est le rapport de l'élargissement, τ est le rapport d'aspect, α est l'angle d'inclinaison du canal par rapport à l'horizontale.

Ensuite, ce chapitre se concentrera sur l'estimation du coefficient de correction k , afin d'ajuster la relation obtenue à partir du développement théorique, k étant le rapport entre le volume réel et le volume calculé du ressaut.

Enfin, les données expérimentales nous permettront d'analyser empiriquement la relation obtenue pour déterminer une approche explicite de la fonction $f(F_1, Y, Cr, \lambda, \beta, \tau, \alpha) = 0$.

II.2 ANALYSE THEORIQUE

II.2.1 Equation de la quantité de mouvement

L'équation du ressaut est établie en appliquant la théorie d'Euler, qui stipule que la variation de la quantité de mouvement d'un système matériel sur un intervalle de temps Δt est égale à l'impulsion des forces extérieures agissant sur la masse liquide en mouvement.

$$\Delta P = \sum F_{\text{ext}} \cdot \Delta t \quad (2.1)$$

- ΔP : la variation engendrée par la quantité de mouvement appliquée (kg.m. s^{-1})
- $\sum F_{\text{ext}}$: les différentes forces hydrostatiques appliquées aux sections déterminées (N) .
- Δt : la variation du temps (s).

L'application de cette loi repose sur quatre hypothèses simplificatrices :

- La répartition des pressions dans les sections amont et aval est supposée hydrostatique ;
- La distribution des vitesses est considérée uniforme ;
- Les pertes de charge par frottement sont supposées négligeables ;
- La résistance de l'air est également négligée.

Dans le cas des canaux composés - comme celui étudié ici - une autre hypothèse est ajoutée : on néglige l'interaction entre le lit mineur et le lit majeur. Cette interaction, liée au transfert de masse et de la quantité de mouvement à l'interface entre les deux lits, génère une turbulence responsable d'une dissipation énergétique supplémentaire.

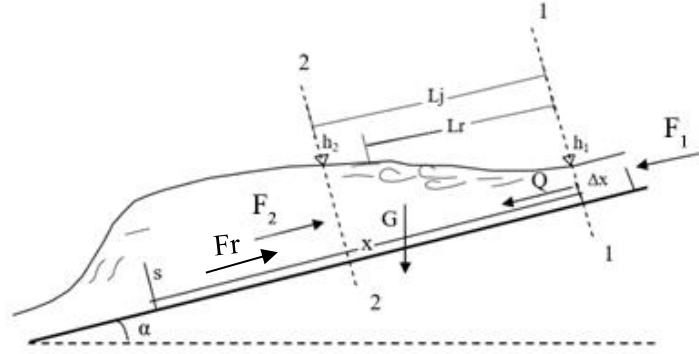


Figure II.1 : ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé incliné à pente positive

L'équation (2.1) devient :
$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \sum F_{ext} \quad (2.2)$$

Sachant que :
$$P = \rho \cdot V \cdot v \quad (2.3)$$

- ρ : Masse spécifique (kg/m^3)
- V : volume du liquide (m^3)
- v : vitesse d'écoulement (m/s)
- P : La quantité de mouvement (N)

La variation dans la quantité de mouvement entre les deux sections amont et aval du ressaut hydraulique est la suivante :
$$\Delta P = \Delta P_2 - \Delta P_1 \quad (2.4)$$

Avec
$$\Delta P_1 = \rho v_1 \Delta V \quad (2.5)$$

$$\Delta P_2 = \rho v_2 \Delta V \quad (2.6)$$

v_1 et v_2 : vitesses d'écoulement au niveau des deux sections d'écoulement, l'expression (2.4) divisée par Δt , on aura ce qui suit :

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} v_2 - \rho \frac{\Delta V}{\Delta t} v_1 \quad (2.7)$$

Le débit volumique est suivant :
$$Q = \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (2.8)$$

Donc

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \rho Q v_2 - \rho Q v_1 \quad (2.9)$$

En remplaçant dans la relation (2.9) on aura :

$$\rho Q v_2 - \rho Q v_1 = \sum F_{ext} \quad (2.10)$$

L'équation (2.10) correspond à la relation générale de la théorie d'Euler, que nous appliquons ici à un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé, caractérisé par un lit majeur rugueux et une pente positive.

Nous pouvons ainsi exprimer l'équation de conservation de la quantité de mouvement entre le pied et l'extrémité du ressaut hydraulique sous la forme suivante :

$$\rho Q v_2 - \rho Q v_1 = f_1 - f_2 - f_r + G \sin \alpha \quad (2.11)$$

Où :

- f_1 et f_2 sont respectivement les forces de pression s'exerçant sur les sections amont et aval du ressaut :

$$f_1 = P_1 A_1 \quad (2.12)$$

$$f_2 = P_2 A_2 \quad (2.13)$$

- G : Le poids appliqué au centre de gravité du volume d'eau formé par le ressaut.
- f_r : La résistance provoquée par la rugosité imposée au lit majeur du canal, dont l'expression

$$\text{s'écrit comme suit : } f_r = C \rho g L_j \left(\frac{v_1^2}{2g} \right) \cdot p \quad (2.14)$$

Où :

g : L'accélération gravitationnelle (m/s²) ;
 L_j : La longueur du ressaut hydraulique (m) ;
 C : Le coefficient dû à la rugosité imposée () ;
 p : Le périmètre mouillé rugueux du canal ($p=B-b$)(m) ;
 ρ : La masse spécifique de l'eau (Kg/m³),
 Q : Le débit spécifique (m³/s).

D'après la figure (II.1), les forces f_1 et f_2 sont appliquées respectivement aux centres de gravité des sections rectangulaires composées (1-1) et (2-2), tandis que le poids G est appliqué au centre de gravité du ressaut.

En appliquant les lois de l'hydrostatique, nous obtenons :

$$\checkmark \quad f_1 = \omega \bar{h}_1 A_1 \quad (2.15)$$

$$\checkmark \quad f_2 = \omega \bar{h}_2 A_2 \quad (2.16)$$

$$\checkmark \quad G = \omega V \quad (2.17)$$

Où :

- $\omega = \rho g$
- $\bar{h}_1$ et $\bar{h}_2$: représentent respectivement les profondeurs entre les centres de gravité des sections transversales (1-1) et (2-2) et la surface libre de l'écoulement,
- A_1 et A_2 : représentent respectivement les aires des sections mouillées (1-1) et (2-2),
- V : représente le volume d'eau entre les deux sections (1-1) et (2-2), α étant l'angle d'inclinaison du canal par rapport à l'horizontal.

On remplace les expressions de f_1 , f_2 , f_r et G dans la relation (2.11), on obtient :

$$\omega \bar{h}_1 A_1 - \omega \bar{h}_2 A_2 - C \rho g L_j \left(\frac{v_1^2}{2g} \right) \cdot p + \omega V \sin \alpha = \rho Q v_2 - \rho Q v_1 \quad (2.18)$$

$$\omega \bar{h}_1 A_1 - \omega \bar{h}_2 A_2 - C \rho g L_j \left(\frac{v_1^2}{2g} \right) \cdot p + \omega V \sin \alpha = \rho Q (v_2 - v_1) \quad (2.19)$$

L'équation de continuité établit que la vitesse moyenne de l'écoulement s'exprime en fonction du débit volumique Q et de l'aire de la section mouillée A par la relation : $v = Q/A$.

En intégrant l'ensemble de ces considérations, la relation (2.19) peut être reformulée en divisant tous ces termes par ρg :

$$\bar{h}_1 A_1 + \frac{Q^2}{g A_1} + V \sin \alpha = \bar{h}_2 A_2 + \frac{Q^2}{g A_2} + C L_j \left(\frac{Q^2}{2g A_1^2} \right) \cdot (B - b) \quad (2.20)$$

En observant attentivement la figure (II.2), on peut déduire sans difficulté les expressions de A_1 , A_2 , $\bar{h}_1$ et $\bar{h}_2$.

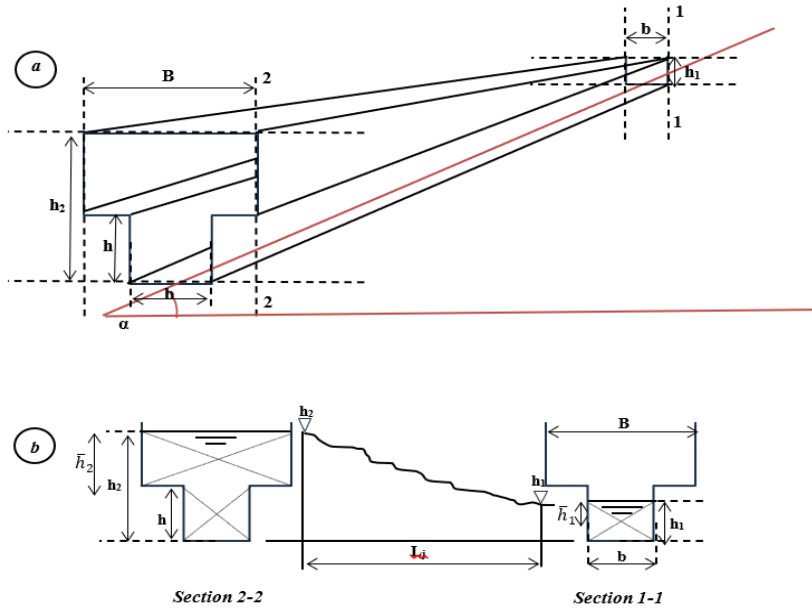


Figure II.2 a) Représentation géométrique du volume équivalent représentatif du ressaut.
b) Représentation géométrique des sections amont et aval du ressaut.

La figure II.2 illustre les sections amont (1-1) et aval (2-2) du ressaut, ainsi que les parois d'un canal rectangulaire composée symétrique par rapport à l'horizontale.

Les aires des sections mouillées correspondantes sont notées A_1 et A_2

$$A_1 = bh_1 \quad (2.21)$$

$$A_2 = B(h_2 - h) + bh \quad (2.22)$$

Et les hauteurs des centres de gravité s'écrivent :

$$\bar{h}_1 = \frac{h_1}{2} \cos \alpha \quad (2.23)$$

$$\bar{h}_2 = \frac{\frac{B}{2}(h_2 - h)^2 + (h_2 - \frac{h}{2})bh}{(h_2 - h)B + bh} \cos \alpha \quad (2.24)$$

II.2.2 Evaluation volumétrique du ressaut

Le volume d'eau compris dans le domaine fluide entre les sections de contrôle 1-1 et 2-2

$$V = \frac{(A_1 + A_2)}{2} L_j \quad (2.25)$$

En substituant les expressions des relations (2.21) et (2.22) dans l'équation (2.25), on dérive la l'expression suivante :

$$\begin{aligned} A_1 + A_2 &= bh_1 + B(h_2 - h) + bh = Bh_2 + bh_1 + (b - B)h \\ &= B(Yh_1 + \beta h_1 + (\beta - 1)h) = Bh_1(Y + \beta + \frac{\beta - 1}{\tau}) \\ &= Bh(\tau(Y + \beta) + (\beta - 1)) \end{aligned}$$

$$V = \frac{(A_1 + A_2)}{2} L_j = \frac{Bh(\tau(Y + \beta) + (\beta - 1))}{2} L_j$$

$$V = \frac{Bh}{2} [\tau(Y + \beta) + (\beta - 1)] L_j \quad (2.26)$$

La détermination théorique du volume réel d'un ressaut hydraulique s'avère complexe en raison des perturbations de la surface libre engendrées par le rouleau de surface. Il est donc nécessaire d'ajuster ce volume en le multipliant par un coefficient, appelé facteur de correction. La relation (2.26) s'exprime alors ainsi :

$$V = \frac{KBh}{2} [\tau(Y + \beta) + (\beta - 1)] L_j \quad (2.27)$$

K : Étant le rapport du volume réel au volume calculé du ressaut, il sera estimé par voie expérimentale

II.2.3 Nombre de Froude

L'autre paramètre clé du ressaut hydraulique, qui se base sur notre étude théorique, est le nombre de Froude F_1 de l'écoulement incident, évalué à la section initiale 1–1, c'est-à-dire au pied du ressaut.

De manière générale, il s'exprime par la relation :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gA_1^3} \frac{\partial A_1}{\partial h_1} \quad (2.28)$$

La relation (2.28) révèle que le nombre de Froude F_1 dépend de quatre paramètres fondamentaux :

Q : Débit volumique de l'écoulement [m^3/s] ;

g : Accélération de la pesanteur [m/s^2] ;

A_1 : Aire de la section mouillée transversale au pied du ressaut [m^2] ;

$\partial A_1 / \partial h_1$: Dérivée partielle de l'aire mouillée par rapport à la hauteur h_1 au pied du ressaut

Dans le cas particulier de cette étude, la section présente une géométrie rectangulaire de section composée, ce qui implique :

$$\frac{\partial A_1}{\partial h_1} = b \quad (2.29)$$

Ces considérations théoriques nous amènent à formuler la relation (2.28) sous la forme suivante :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2(h_1 \cos \alpha)^3} \quad (2.30)$$

Prenons en considération les éléments suivants :

$$\lambda = \frac{L_j}{h_1}, \quad Y = \frac{h_2}{h_1}, \quad \beta = \frac{b}{B}, \quad \tau = \frac{h_1}{h}$$

Où :

λ : est la longueur relative du ressaut ;

Y : le rapport des hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique ;

β : le rapport de l'élargissement ;

τ : le rapport d'aspect ;

α : l'angle d'inclinaison du canal par rapport à l'horizontale

Compte tenu de ce qui précède, l'équation générale devient la suivante :

$$\frac{1}{2}bh_1^2 \cos \alpha + \frac{Q^2}{gA_1} + \frac{KBh}{2}[\tau(Y + \beta) + (\beta - 1)]L_j \sin \alpha = \frac{\frac{B}{2}(h_2-h)^2 + (h_2-\frac{h}{2})bh}{(h_2-h)B+bh} (B(h_2-h) + bh) \cos \alpha + \frac{Q^2}{gA_2} + CL_j \left(\frac{Q^2}{2gA_1^2} \right) \cdot (B-b) \quad (2.31)$$

En simplifiant le membre de droite par A_2 , on obtient

$$\frac{1}{2}bh_1^2 \cos \alpha + \frac{Q^2}{gA_1} + Z = J \cos \alpha + \frac{Q^2}{gA_2} + CL_j \left(\frac{Q^2}{2gA_1^2} \right) \cdot (B-b)$$

Avec :

$$Z = \frac{KBh}{2}[\tau(Y + \beta) + (\beta - 1)]L_j \sin \alpha, \text{ et } J = \frac{B}{2}(h_2-h)^2 + (h_2-\frac{h}{2})bh$$

On regroupe les termes en Q^2/g

$$\frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2} - \frac{CL_j(B-b)}{2A_1^2} \right) = \left(J - \frac{1}{2}bh_1^2 \right) \cos \alpha - Z$$

D'où

$$\frac{Q^2}{g} = \frac{\left(J - \frac{1}{2}bh_1^2 \right) \cos \alpha - Z}{\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2} - \frac{CL_j(B-b)}{2A_1^2}}$$

En divise sur $b^2h_1^3$

$$\frac{Q^2}{gb^2(h_1 \cos \alpha)^3} = \frac{\left(J - \frac{1}{2}bh_1^2 \right) \cos \alpha - Z}{b^2h_1^3 \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2} - \frac{CL_j(B-b)}{2A_1^2} \right)}$$

Passage aux variables adimensionnelles :

En posant $A_1 = bh_1$, $A_2 = (h_2-h)B + bh$, $\lambda = \frac{L_j}{h_1}$, $Y = \frac{h_2}{h_1}$, $\beta = \frac{b}{B}$ et $\tau = \frac{h_1}{h}$

On a : $A_1 = \beta Bh_1$, $A_2 = Bh_1 \left(Y + \frac{\beta-1}{\tau} \right)$

Terme hydrostatique coté aval :

$$J = Bh_1^2 \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} \right) \right]$$

Donc : $J - \frac{1}{2}bh_1^2 = Bh_1^2 \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right]$

D'autre part :

$$Z = \frac{KBh}{2} [\tau(Y + \beta) + (\beta - 1)] L_j \sin \alpha = \frac{KBh^2}{2} \lambda \left[(\beta + Y) - \frac{\beta-1}{\tau} \right] \sin \alpha$$

Différences des inverses de surfaces :

$$\begin{aligned} b^2 h_1^3 \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2} - \frac{CL_j(B-b)}{2A_1^2} \right) &= \frac{b^2 h_1^3}{A_1} - \frac{b^2 h_1^3}{A_2} - \frac{b^2 h_1^3 CL_j(B-b)}{2A_1^2} = \beta B h_1^2 - \frac{\beta^2 B h_1^2}{Y - \frac{1}{\tau} + \frac{\beta}{\tau}} - \frac{c}{2} \lambda B h_1^2 (1 - \beta) \\ &= B h_1^2 \left[\beta - \frac{\beta^2}{Y - \frac{1}{\tau} + \frac{\beta}{\tau}} - \frac{c}{2} \lambda (1 - \beta) \right] \end{aligned}$$

Expression finale de F_1^2

En substituant et en simplifiant, on obtient :

$$\begin{aligned} F_1^2 &= \frac{Q^2}{g b^2 (h_1 \cos \alpha)^3} = \frac{\left(J - \frac{1}{2} b h_1^2 \right) \cos \alpha - Z}{b^2 h_1^3 \left(\frac{1}{A_1} - \frac{1}{A_2} - \frac{CL_j(B-b)}{2A_1^2} \right)} = \frac{B h_1^2 \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right] \cos \alpha - \frac{KBh^2}{2} \lambda \left[(\beta + Y) - \frac{\beta-1}{\tau} \right] \sin \alpha}{B h_1^2 \left[\beta - \frac{\beta^2}{Y - \frac{1}{\tau} + \frac{\beta}{\tau}} - \frac{c}{2} \lambda (1 - \beta) \right]} \\ &= \frac{\left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right] \cos \alpha - \frac{K}{2} \lambda \left[(\beta + Y) - \frac{\beta-1}{\tau} \right] \sin \alpha}{\left[\beta - \frac{\beta^2}{Y - \frac{1}{\tau} + \frac{\beta}{\tau}} - \frac{c}{2} \lambda (1 - \beta) \right]} \\ F_1^2 &= \left(\frac{Y + \frac{\beta-1}{\tau}}{\beta(Y + \frac{\beta-1}{\tau} - \beta)} \right) \frac{\cos \alpha \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right] - \frac{K}{2} \lambda \left[(\beta + Y) - \frac{\beta-1}{\tau} \right] \sin \alpha}{\left(1 - \frac{\beta}{Y - \frac{1}{\tau} + \frac{\beta}{\tau}} - \frac{c}{2} \lambda (1 - \beta) \right)} \quad (2.32) \end{aligned}$$

En faisant remplacer cette expression suivante $\left(\frac{\beta}{Y - \frac{1}{\tau} + \frac{\beta}{\tau}} + \frac{c}{2} \lambda (1 - \beta) \right)$ par le paramètre Cr dans l'approche (2.32) on déduit ce qui suit :

$$F_1^2 = \left(\frac{Y + \frac{\beta-1}{\tau}}{\beta(Y + \frac{\beta-1}{\tau} - \beta)} \right) \frac{\cos \alpha \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right] - \frac{K}{2} \lambda \left[(\beta + Y) - \frac{\beta-1}{\tau} \right] \sin \alpha}{(1 - Cr)} \quad (2.33)$$

L'application du principe de conservation de la quantité de mouvement entre deux sections encadrant un ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé à pente positive conduit à la relation (2.33). Cette équation fondamentale révèle que la dynamique du ressaut dépend de six paramètres clés :

- Le nombre de Froude amont F_1 caractérisant l'écoulement incident
- Les hauteurs conjuguées h_1 (amont) et h_2 (aval)
- La pente longitudinale du canal (angle α)
- La longueur caractéristique L_j du ressaut
- Le rapport d'élargissement latéral
- Le rapport d'aspect de la section

Une reformulation algébrique de la relation (2.33) permet d'exprimer le nombre de Froude sous la forme explicite suivante :

$$(1 - Cr)F_1^2 = \frac{Y + \frac{\beta-1}{\tau}}{\beta(Y + \frac{\beta-1}{\tau} - \beta)} \left\{ \cos \alpha \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right] - \frac{K}{2} \lambda \left[(\beta + Y) + \frac{\beta-1}{\tau} \right] \sin \alpha \right\} \quad (2.34)$$

Cas particulier :

Si l'angle d'inclinaison $\alpha = 0$ donc $\sin \alpha = 0$ et $\cos \alpha = 1$, et le coefficient de résistance $Cr = 0$, l'équation (2.34) devient comme suite :

$$F_1^2 = \frac{Y + \frac{\beta-1}{\tau}}{\beta(Y + \frac{\beta-1}{\tau} - \beta)} \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right] \quad (2.35)$$

Posons que $A = Y - \frac{1}{\tau}$, $D = Y + \frac{\beta-1}{\tau} = A + \frac{\beta}{\tau}$

Donc la relation (2.35) s'écrit comme suit : $F_1^2 = \frac{D}{\beta(D-\beta)} \left[\frac{1}{2} A^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right]$

$$\text{Où } \frac{Y}{\tau} = \frac{A + \frac{1}{\tau}}{\tau} = \frac{A}{\tau} + \frac{1}{\tau^2}$$

$$\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} = \frac{A}{\tau} + \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2}$$

Ainsi le crochet devient

$$\frac{1}{2} A^2 + \beta \left(\frac{A}{\tau} + \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) = \frac{1}{2} \left(A^2 + \frac{2\beta}{\tau} A + \frac{\beta}{\tau^2} - \beta \right)$$

Réécriture du facteur multiplicatif, On obtient alors

$$F_1^2 = \frac{D}{\beta(D-\beta)} \frac{1}{2} \left(A^2 + \frac{2\beta}{\tau} A + \frac{\beta}{\tau^2} - \beta \right) = \frac{1}{\beta} \frac{D}{2(D-\beta)} \left(A^2 + \frac{2\beta}{\tau} A + \frac{\beta}{\tau^2} - \beta \right)$$

$$\text{Mais : } \frac{D}{2(D-\beta)} = \frac{1}{2(1-\frac{\beta}{D})}$$

$$\text{Donc } F_1^2 = \frac{1}{2(1-\frac{\beta}{D})} \frac{1}{\beta} \left(A^2 + \frac{2\beta}{\tau} A + \frac{\beta}{\tau^2} - \beta \right)$$

En divisant l'expression entre crochets par β , on obtient

$$\frac{1}{\beta} (A^2 + \frac{2\beta}{\tau} A + \frac{\beta}{\tau^2} - \beta) = \frac{A^2}{\beta} + \frac{2}{\tau} A + \frac{1}{\tau^2} - 1$$

$$\text{Or } \frac{2}{\tau} A + \frac{1}{\tau^2} = \frac{2Y}{\tau} - \frac{2}{\tau^2} + \frac{1}{\tau^2} = \frac{2Y}{\tau} - \frac{1}{\tau^2} = \frac{2Y-1}{\tau}$$

$$\text{Et } D = Y - \frac{1-\beta}{\tau} \text{ ainsi}$$

$$F_1^2 = \frac{\frac{(2Y-1/\tau) + (Y-1/\tau)^2}{\beta} - 1}{2 \left(1 - \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \right)} \quad (2.35)$$

Il s'agit de la même approche que celle proposée par (Khattaoui & Achour, 2012), laquelle est déduite de l'expression (2.34), régissant l'écoulement de transition entre les deux régimes dans un canal rectangulaire composé lisse.

II.3 ANALYSE EXPERIMENTALE DE L'EQUATION SEMI THEORIQUE

II.3.1 Détermination expérimentale du facteur de correction K

Pour déterminer expérimentalement la valeur de coefficient K de correction, la relation (2.34) peut être réécrite sous la forme suivante :

$$K = \frac{\cos \alpha \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right] - \frac{(1-Cr) F_1^2 \beta \left(Y + \frac{\beta-1}{\tau} - \beta \right)}{Y + \frac{\beta-1}{\tau}}}{\frac{1}{2} \lambda \left[(\beta + Y) + \frac{\beta-1}{\tau} \right] \sin \alpha} \quad (2.36)$$

Les tableaux II.1 à II.5 présentent les valeurs du coefficient k obtenues en appliquant les données expérimentales à l'équation (2.34).

Tableau II.1 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (0 mm) de la pente positive

Rugosité 0 mm								
Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
F ₁	Y	K	F ₁	Y	K	F ₁	Y	K
3,96	6,68	6,60	3,69	6,28	3,89	4,79	8,48	3,23
4,06	6,84	6,53	4,06	7,00	3,84	3,43	5,97	2,62
4,39	7,24	6,24	5,56	8,96	3,52	3,78	6,63	2,75
4,68	7,52	5,79	5,99	9,48	3,20	4,18	7,33	2,67
5,20	8,40	6,20	3,30	5,23	2,94	2,72	4,60	2,55
3,43	5,10	4,02	3,43	5,53	3,00	3,14	5,51	2,66
3,60	5,50	4,37	3,64	6,00	3,15	3,43	5,94	2,62

3,73	5,87	4,94	3,87	6,33	2,99	3,80	6,60	2,63
3,96	6,17	4,80	4,18	6,87	3,02	3,99	7,11	2,84
4,09	6,47	5,04	4,46	7,33	3,18	2,04	3,90	3,41
4,46	6,90	4,66	4,79	8,10	3,48	2,14	4,08	3,17
4,94	7,80	5,03	5,18	8,43	3,09	2,42	4,45	2,94
5,28	8,53	5,69	5,38	8,83	3,31	2,57	4,78	2,97
5,53	8,93	5,86	5,78	9,33	3,25	2,90	5,30	2,79
3,61	5,66	4,67	2,72	4,43	3,37	3,21	5,65	2,63
3,99	6,37	5,52	2,89	4,74	3,31	3,43	6,30	2,99
4,39	6,83	5,08	3,00	4,94	3,36	3,76	6,80	3,07
4,59	7,29	5,78	3,17	5,31	3,47			
4,87	7,60	5,56	3,54	5,57	2,50			
5,21	7,94	4,93	3,73	6,09	3,00			
2,45	3,95	5,79	3,92	6,57	3,35			
2,45	3,98	5,73	4,11	7,00	3,55			
2,40	4,13	6,70	4,59	7,40	3,08			
2,60	4,38	6,21	2,37	3,83	3,28			
2,72	4,60	6,31	2,42	4,05	3,43			
2,96	4,83	5,53	2,57	4,40	3,58			
3,11	5,05	5,24	2,69	4,65	3,57			
3,21	5,40	6,26	2,81	5,00	3,80			
3,43	5,70	6,01	3,11	5,38	3,56			
			3,33	5,80	3,59			
			3,85	6,63	3,71			
			4,19	7,03	3,45			

Tableau II.2 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (6 mm) de la pente positive

Rugosité 6 mm								
Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
F ₁	Y	K	F ₁	Y	K	F ₁	Y	K
3,90	6,20	6,49	3,79	6,36	3,88	5,80	10,40	3,08
4,23	6,72	6,08	4,17	6,72	3,36	2,89	5,33	3,28
4,39	7,04	6,20	4,39	7,08	3,37	3,01	5,57	3,18
4,56	7,20	5,71	4,51	7,52	3,70	3,26	5,93	3,10
4,79	7,60	5,81	4,73	7,92	3,62	3,51	6,37	3,01
5,20	8,56	6,61	4,96	8,56	4,07	3,78	6,83	3,08
5,68	9,08	5,88	5,80	9,56	3,42	4,00	7,43	3,18
5,99	9,72	6,58	6,11	10,12	3,62	4,51	7,97	2,93
6,55	10,24	6,09	6,55	10,68	3,53	4,65	8,40	3,11
6,81	10,72	6,45	3,09	5,30	4,10	4,94	8,80	2,99
7,27	11,28	6,30	3,39	5,60	3,65	2,39	4,69	3,36
3,39	5,23	5,60	3,56	5,83	3,46	2,52	4,86	3,23
3,56	5,47	5,20	3,64	6,00	3,40	2,72	5,17	3,14
3,69	5,77	5,54	3,78	6,40	3,58	2,89	5,54	3,09
3,87	6,00	5,25	4,09	6,90	3,49	3,14	5,86	2,95
3,96	6,33	5,76	4,32	7,27	3,49	3,36	6,29	3,16
4,18	6,63	5,41	4,60	7,83	3,66	3,61	6,63	2,90
4,37	6,90	5,27	4,98	8,27	3,55	3,92	7,03	2,80
4,60	7,30	5,61	5,38	8,80	3,51	4,31	7,80	3,04
4,84	7,77	6,03	5,78	9,27	3,44	2,17	3,83	2,90
5,13	8,30	6,41	2,69	4,46	3,60	2,25	4,08	2,99
5,53	8,80	6,20	2,75	4,71	3,81	2,45	4,33	2,77
5,83	9,10	5,95	2,89	4,97	3,76	2,60	4,65	2,90
6,51	9,83	5,39	3,00	5,20	3,86	2,84	4,90	2,71

2,96	4,57	5,63	3,28	5,63	3,76			
3,00	4,71	5,82	3,43	5,89	3,71			
3,14	4,97	5,79	3,65	6,31	3,79			
3,21	5,17	5,75	3,99	6,91	3,82			
3,32	5,37	5,82	4,19	7,23	3,85			
3,50	5,71	5,91	4,43	7,63	3,95			
3,65	6,00	6,12	4,87	8,06	3,74			
3,92	6,34	5,89	2,34	3,85	3,61			
4,11	6,86	6,73	2,51	4,08	3,28			
2,57	3,90	5,58	2,63	4,28	3,26			
2,69	4,08	5,25	2,72	4,50	3,45			
2,81	4,13	4,41	2,87	4,75	3,38			
2,81	4,30	5,11	3,02	5,13	3,57			
2,96	4,55	5,03	3,21	5,40	3,59			
3,05	4,75	4,95	3,53	5,75	3,27			
3,21	5,05	5,11	3,69	6,15	3,49			
3,36	5,25	4,92	3,92	6,50	3,52			
3,49	5,53	5,36	4,19	6,80	3,45			
3,75	5,88	5,27	4,51	7,28	3,61			
3,92	6,23	5,85						
4,26	6,58	5,60						
4,44	6,95	6,07						

Tableau II.3 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (8 mm) de la pente positive

Rugosité 8 mm								
Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
F ₁	Y	K	F ₁	Y	K	F ₁	Y	K
4,12	6,20	4,96	3,85	6,60	4,15	3,28	6,32	3,59
4,23	6,80	6,26	3,96	6,76	4,01	3,53	6,60	3,34
4,51	7,12	5,81	4,23	7,04	3,48	3,74	6,96	3,29
4,68	7,44	5,94	4,39	7,56	3,77	3,96	7,36	3,21
5,14	8,16	5,84	4,73	8,12	3,64	4,23	8,04	3,35
5,68	9,12	6,04	6,68	10,96	3,64	4,68	8,68	3,33
6,49	10,08	5,68	3,22	5,23	4,50	5,08	9,20	3,12
6,94	10,72	5,85	3,43	5,43	3,88	2,97	5,33	3,86
7,47	11,40	5,81	3,73	5,70	3,01	3,13	5,60	3,56
3,56	5,30	6,28	3,32	5,86	4,01	3,43	6,00	3,14
3,64	5,47	5,95	3,54	6,29	3,79	3,07	5,91	3,46
3,91	5,83	5,22	3,80	6,74	3,76	3,43	6,34	3,09
5,28	8,40	5,83	4,11	7,06	3,47	3,05	5,45	3,20
3,36	5,34	6,92	4,39	7,46	3,48	3,21	5,85	3,13
3,43	5,63	6,30	4,75	7,94	3,45	3,69	6,75	3,00
3,69	5,89	5,58	2,96	4,98	4,45	3,92	7,20	3,03
3,88	6,29	5,70	3,11	5,25	4,06			
4,19	6,77	5,58	3,43	5,73	3,58			
4,39	7,06	5,55						
4,51	7,46	6,16						
3,17	4,93	7,29						
3,30	5,13	6,40						
3,43	5,48	6,23						
3,62	5,73	5,73						
3,92	6,15	5,24						

Tableau II.4 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (10 mm) de la pente positive

Rugosité 10 mm								
Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
F ₁	Y	K	F ₁	Y	K	F ₁	Y	K
4,79	7,32	6,21	4,17	6,48	2,97	3,64	6,60	3,30
4,91	7,52	5,97	4,68	7,40	2,96	3,85	6,72	2,92
5,32	7,84	4,69	4,85	7,84	3,29	4,12	7,24	3,01
5,50	8,24	4,90	6,05	9,68	3,18	4,40	7,84	3,08
5,62	8,52	5,11	6,24	10,04	3,31	4,79	8,48	3,01
5,80	9,04	5,76	6,94	10,84	3,14	3,22	5,27	3,06
6,17	9,52	5,59	3,56	5,50	3,80	3,56	5,87	2,65
6,49	10,16	6,11	3,64	5,67	3,58	3,73	6,17	2,57
6,94	10,68	5,95	3,82	5,93	3,35	5,28	9,07	2,80
3,78	5,23	4,91	4,09	6,43	3,26	3,54	6,26	3,14
3,82	5,43	4,92	4,23	6,77	3,18	3,80	6,63	3,00
3,96	5,57	4,37	4,55	7,23	2,93	3,99	7,00	2,93
4,09	6,07	5,09	3,73	6,26	3,83	3,11	5,00	3,30
4,23	6,37	5,13	3,92	6,63	3,74	3,30	5,65	3,29
4,51	6,63	4,27	4,19	7,03	3,61	3,59	6,03	2,93
3,61	5,63	7,01	4,59	7,46	3,30	3,76	6,35	2,82
3,80	5,97	6,77	4,79	8,00	3,56			
4,27	6,66	6,08	3,49	5,63	4,02			
4,47	7,00	5,93	3,82	6,08	3,47			
4,67	7,34	5,82	4,09	6,40	3,13			
4,91	7,71	5,75	4,26	6,88	3,38			
5,21	8,14	5,82	4,72	7,25	2,82			
3,59	5,40	7,05						
3,75	5,73	6,90						
4,09	6,08	5,66						
4,44	6,50	4,76						
4,54	6,68	4,66						

Tableau II.5 : Valeurs du coefficient k selon la rugosité (12 mm) de la pente positive

Rugosité 12 mm								
Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
F ₁	Y	K	F ₁	Y	K	F ₁	Y	K
3,96	6,24	7,34	3,69	6,24	4,71	3,43	6,32	3,38
4,23	6,68	7,17	3,96	6,64	4,40	3,01	5,37	3,91
4,68	7,20	6,30	4,34	6,96	3,78	3,17	5,67	3,70
4,79	7,44	6,22	5,08	8,60	4,31	3,26	6,00	3,78
5,08	8,00	6,52	5,38	8,96	4,16	3,51	6,33	3,58
5,38	8,40	6,54	5,68	9,60	4,11	3,73	6,90	3,60
5,68	9,04	7,10	5,99	10,08	4,23	4,05	7,33	3,48
5,99	9,52	7,29	3,64	6,07	4,53	3,21	5,97	3,75
6,30	10,08	7,39	3,87	6,40	4,22	3,54	6,29	3,38
6,94	10,60	6,54	4,09	6,80	4,03	3,08	5,63	3,93
7,13	11,00	6,92	4,32	7,20	4,02	3,24	5,90	3,51
3,60	5,77	8,50	4,55	7,67	4,04	3,49	6,25	3,20
3,82	5,93	7,30	4,79	8,17	4,10			

4,09	6,30	6,43	5,23	8,67	3,84			
4,27	6,57	6,06	3,28	5,51	4,73			
4,51	6,87	5,71	3,36	5,83	4,85			
5,53	8,73	6,61	3,73	6,29	4,38			
3,47	5,49	7,87	4,07	6,69	3,72			
3,61	5,77	7,45	4,23	7,14	3,98			
3,80	6,03	6,96	4,51	7,49	3,82			
3,96	6,29	6,77	4,79	8,06	4,09			
4,07	6,66	7,05	3,43	5,93	4,63			
4,47	7,14	6,57	3,75	6,43	4,34			
4,59	7,57	7,20	4,02	6,63	3,88			
4,79	7,69	6,55	4,23	6,98	3,84			
3,33	5,33	8,50						
3,53	5,70	7,66						
3,69	6,03	7,55						
3,99	6,38	6,90						
4,16	6,68	6,91						
4,33	6,95	6,83						

Les tableaux II.1- II.5, indiquent sans équivoque que le coefficient de correction k reste une valeur constante. En écartant les quelques observations extrêmes, la moyenne arithmétique de k est **4,24** . Obtenue en insérant les données expérimentales dans l'équation (2.34), alors devient comme suite :

$$(1 - Cr)F_1^2 = \frac{Y + \frac{\beta-1}{\tau}}{\beta(Y + \frac{\beta-1}{\tau} - \beta)} \left\{ \cos \alpha \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right] - \frac{4.24}{2} \lambda \left[(\beta + Y) + \frac{\beta-1}{\tau} \right] \sin \alpha \right\} \quad (2.37)$$

II.3.2 Etude du paramètre Cr en fonction de $(\varepsilon/B-b)$ et l'angle d'inclinaison α .

Dans le but d'établir l'expression du coefficient de frottement Cr, dépendant de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$ et $\tan \alpha$, les figures II.2 à II.6, présentent l'évolution du terme

$$f(Y) = \frac{Y + \frac{\beta-1}{\tau}}{\beta(Y + \frac{\beta-1}{\tau} - \beta)} \left\{ \cos \alpha \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right] - \frac{4.24}{2} \lambda \left[(\beta + Y) + \frac{\beta-1}{\tau} \right] \sin \alpha \right\} \text{ en fonction de } F_1^2 \text{ pour les trois pentes étudiées et les quatre rugosités équivalentes testées.}$$

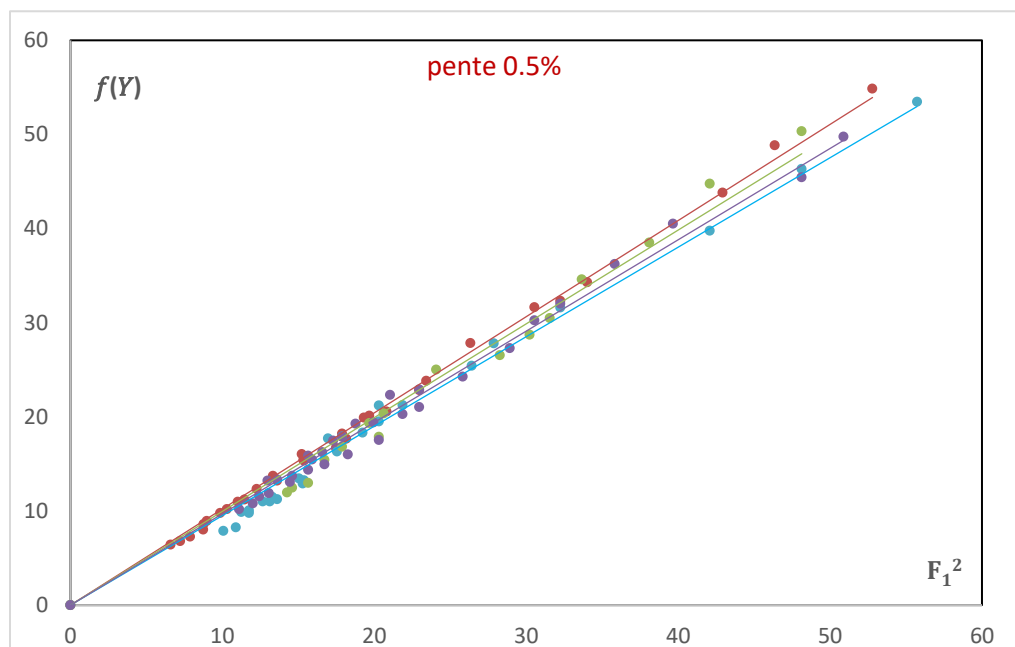


Figure II.3: Variation du $f(Y)$ avec le nombre de Froude F_1^2 ,

ε (mm) = (•) 06, (•) 08, (•) 10 et (•) 12.

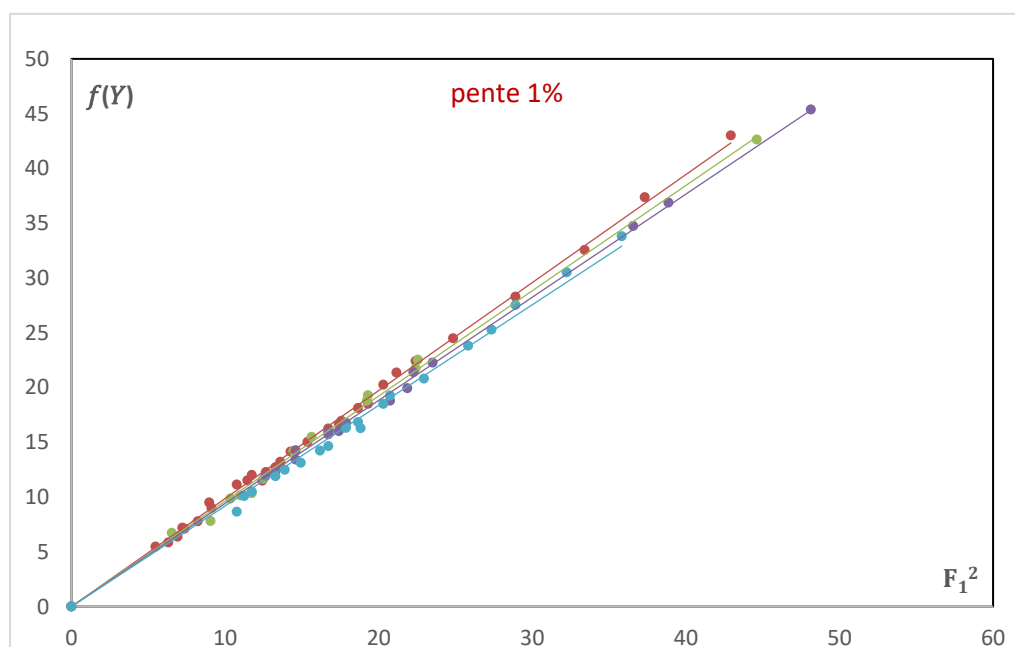


Figure II.4: Variation du $f(Y)$ avec le nombre de Froude F_1^2 ,

ε (mm) = (•) 06, (•) 08, (•) 10 et (•) 12.

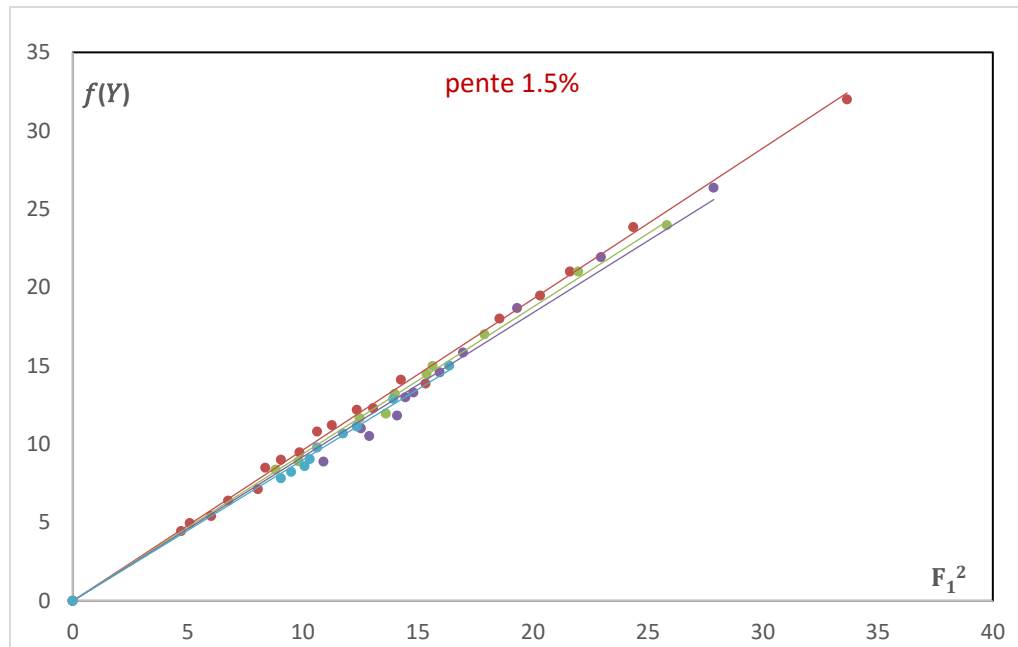


Figure II.5: Variation du $f(Y)$ avec le nombre de Froude F_1^2 ,

ε (mm) = (•) 06, (•) 08, (•) 10 et (•) 12.

On distingue quatre allures de points distincts, chacun correspondant à une rugosité constante. L'analyse des données expérimentales du ressaut hydraulique sur lit majeur rugueux montre que, pour chaque valeur de rugosité, les mesures se répartissent autour d'une relation linéaire de la forme

$$f(Y) = \frac{Y + \frac{\beta-1}{\tau}}{\beta(Y + \frac{\beta-1}{\tau} - \beta)} \left\{ \cos \alpha \left[\frac{1}{2} \left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2 + \beta \left(\frac{Y}{\tau} - \frac{1}{2\tau^2} - \frac{1}{2} \right) \right] - \frac{4.24}{2} \lambda \left[(\beta + Y) + \frac{\beta-1}{\tau} \right] \sin \alpha \right\} = a F_1^2 \quad (2.38)$$

Le terme $< a >$ = représente le facteur $(1 - Cr)$.

Les résultats de cette corrélation sont synthétisés dans les tableaux II.6 – II.8

Tableau II.6 : Facteur a_1 de corrélations

Pente 0,5 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_1	R^2
0,057	1,0214	0,9993
0,075	0,9961	0,9963
0,094	0,9702	0,9981
0,113	0,9506	0,9973

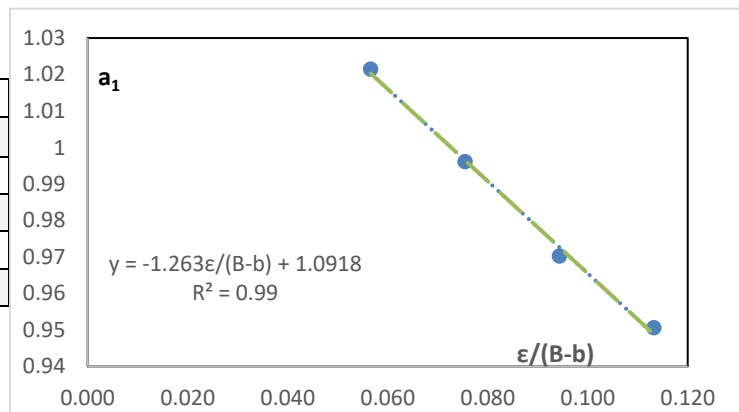


Figure II.6: Corrélation du facteur a_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs $(\varepsilon/(B-b), a_1)$ conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_1 = -1,263(\varepsilon/(B-b)) + 1,0918$.

Tableau II.7 : Facteur a_2 de corrélations

Pente 1 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_2	R^2
0,057	0,9860	0,9996
0,075	0,9611	0,9992
0,094	0,9413	0,9997
0,113	0,9184	0,9991

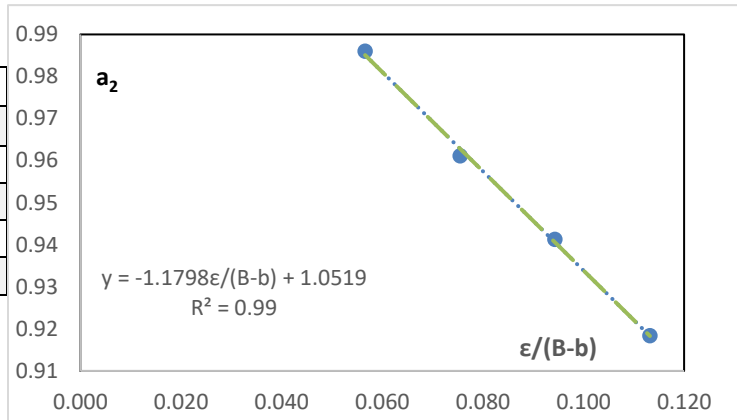


Figure II.7: Corrélation du facteur a_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs $(\varepsilon/(B-b), a_2)$ conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_2 = -1,1798(\varepsilon/(B-b)) + 1,0519$.

Tableau II.8 : Facteur a_3 de corrélations

Pente 1,5 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_3	R^2
0,057	0,9628	0,9993
0,075	0,9372	0,9995
0,094	0,9188	0,9975
0,113	0,8995	0,9993

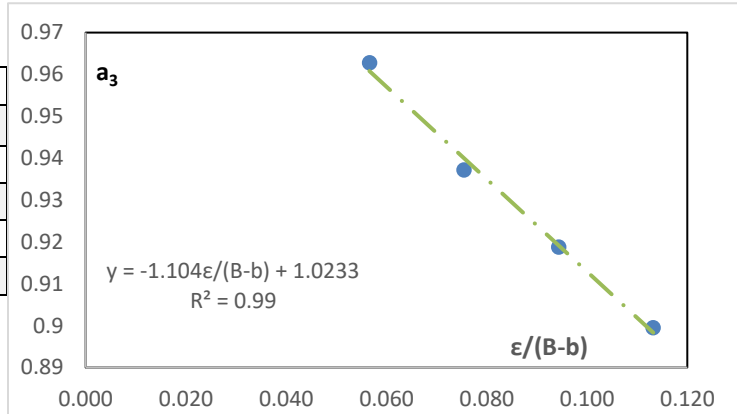


Figure II.8: Corrélation du facteur a_3 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs $(\varepsilon/(B-b), a_3)$ conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_3 = -1,104(\varepsilon/(B-b)) + 1,0233$.

Remplaçant les paramètres a_i par leurs expressions respectives dans la relation $f(Y) = A F_1^2$, on obtient ce qui suit :

$$f(Y) = (-1,2630\varepsilon/(B-b) + 1,0918) F_1^2 ; \tan \alpha = 0,5\% \quad (2.39)$$

$$f(Y) = (-1,1798\varepsilon/(B-b) + 1,0519) F_1^2 ; \tan \alpha = 1\% \quad (2.40)$$

$$f(Y) = (-1,1040\varepsilon/(B-b) + 1,0233) F_1^2 ; \tan \alpha = 1,5\% \quad (2.41)$$

Le tableau ci-dessous représente les valeurs de a' et b' du coefficient de rugosité avec l'angle d'inclinaison du canal.

Tableau II.9 : Valeurs a' et b' du coefficient de rugosité corrélées
à l'angle d'inclinaison du canal.

$\varepsilon / (B-b)$ (mm)	6 ; 8 ; 10 ; 12		
$\tan (\alpha)$	a'	b'	R^2
0,5 %	-1,2630	1,0918	0,99
1 %	-1,1798	1,0519	0,99
1,5 %	-1,1040	1,0233	0,99

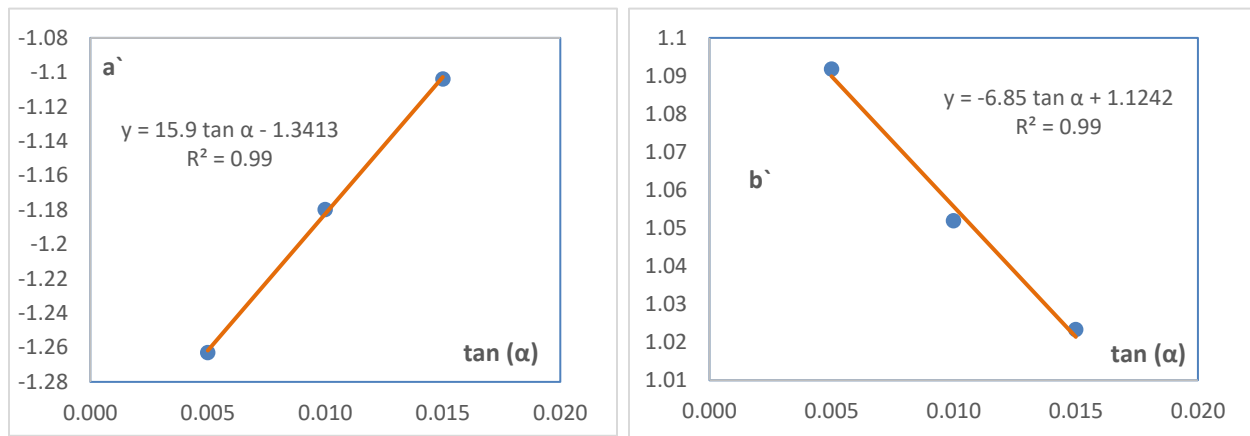


Figure II.9 : Variation des facteur a' et b' en fonction de $\tan (\alpha)$

$$a' = 15,9 \tan (\alpha) - 1,3413 \quad R^2 = 0,99 \quad (2.42)$$

$$b' = -6,85 \tan (\alpha) + 1,1242 \quad R^2 = 0,99 \quad (2.43)$$

Il serait pratique de reformuler les trois relations en une équation globale sous la forme suivante :

$$f(Y) = [(15,9 \tan (\alpha) - 1,3413) \varepsilon / (B - b) - 6,85 \tan (\alpha) + 1,1242] F_1^2 \quad (2.44)$$

Donc à partir de : $f(y) = (1 - Cr) F_1^2$ On déduire l'expression de paramètre Cr

$$f(y) = (1 - Cr) F_1^2 = [(15,9 (\tan \alpha) - 1,3413) \varepsilon / (B - b) - 6,85 (\tan \alpha) + 1,1242] F_1^2$$

$$(1 - Cr) = (15,9 (\tan \alpha) - 1,3413) \varepsilon / (B - b) - 6,85 (\tan \alpha) + 1,1242$$

$$Cr = -\frac{(1,3413 - 15,9 (\tan \alpha)) \varepsilon}{B - b} + 6,85 (\tan \alpha) - 0,1242 \quad (2.45)$$

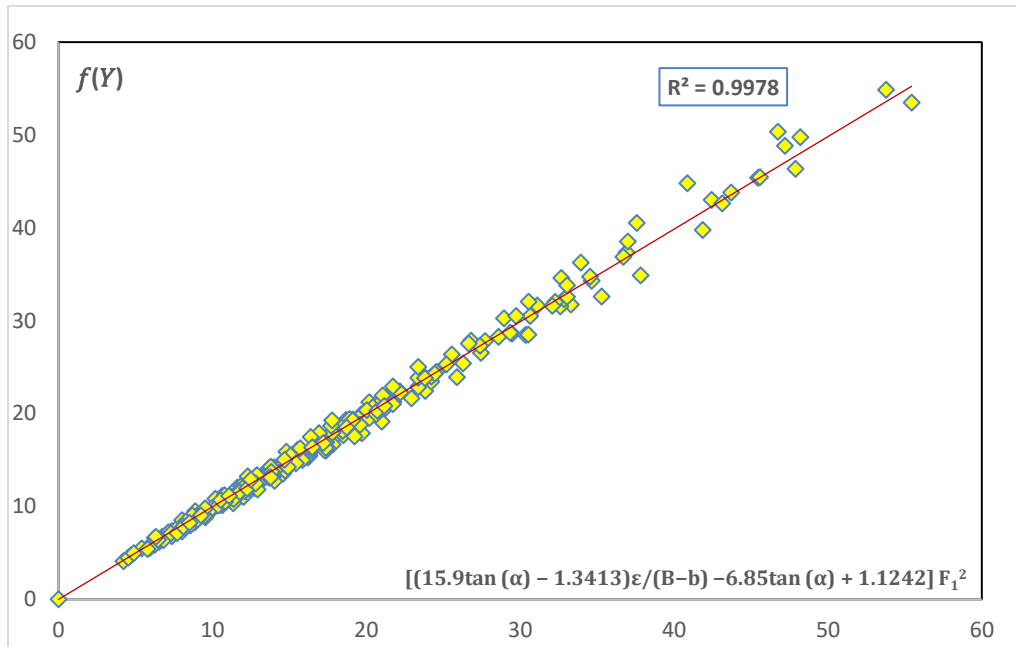


Figure II.10: Validation de l'approche semi-théorique.

II.3.3 Variation du rapport Y des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du coefficient Cr de résistance et du nombre de Froude F_1

L'équation semi-théorique (2.34), étant implicite par rapport à Y, a conduit à l'établissement d'une relation approchée permettant de déterminer plus aisément le rapport Y en fonction du coefficient de résistance du fond Cr et du nombre de Froude incident F_1 .

La figure II.11 présente un nuage de points qui conjointe clairement l'allure d'une courbe unique.

L'ajustement des données expérimentales par la méthode des moindres carrés non linéaire conduit, avec une excellente corrélation, à la relation de type puissance suivante :

$$Y = 1,914 F_1^{0,904} (1 - Cr)^{0,452} \quad (2.46)$$

$$0,000 \leq \frac{\epsilon}{B-b} \leq 0,113 \quad 0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,015$$

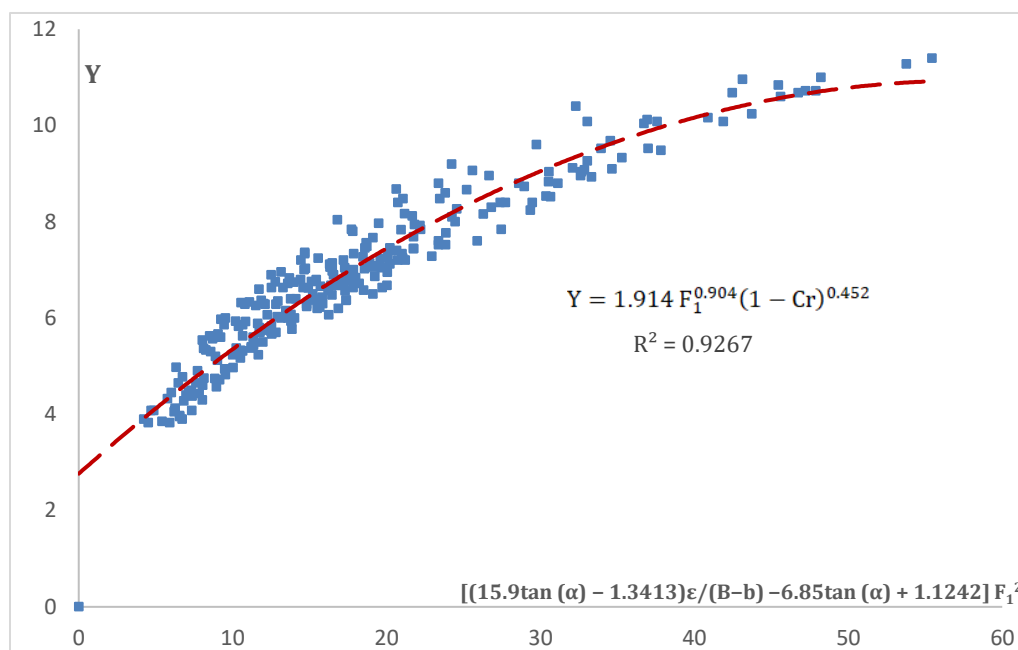


Figure II.11: illustration du rapport Y avec de $(1 - Cr)F_1^2$

Une comparaison entre les valeurs expérimentales de Y et celles issues de l'équation semi-théorique (2.46) est présentée dans la figure II.12. On observe que les points expérimentaux s'alignent en majorité sur la première bissectrice, indiquant que la relation (2.46) reproduit régulièrement le comportement semi-théorique.

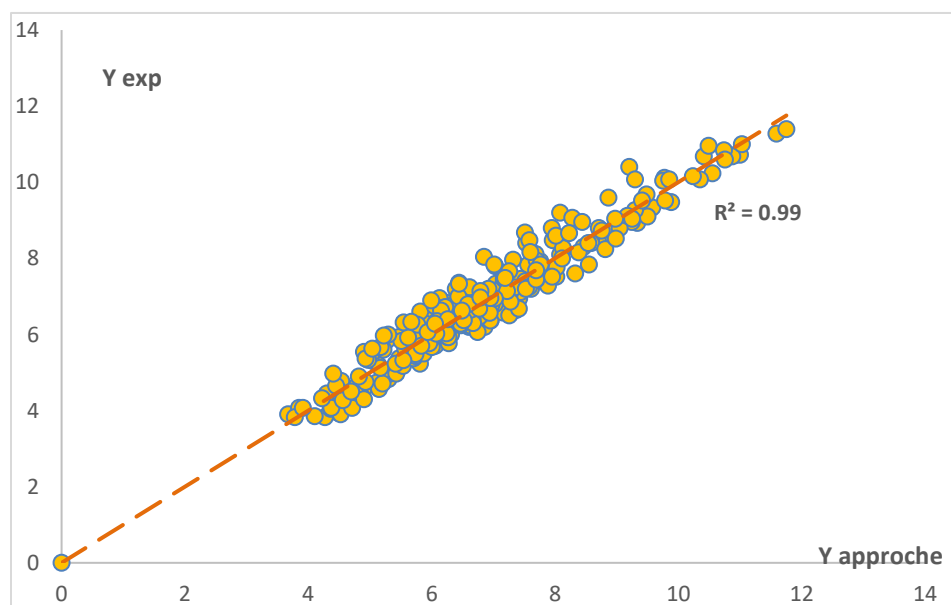


Figure II.12: Comparaison entre Y expérimental et de l'équation semi-théorique (2.34)

L'erreur relative entre les valeurs issues de l'équation semi-théorique (2.46) et les mesures expérimentales de Y est présentée dans les tableaux II.10 - II.14. Il ressort de cette analyse que, dans la majorité de l'erreur relative ne dépasse pas 10 %, ce qui confirme à la fois la fiabilité de cette approche et les mesures expérimentales obtenues au laboratoire.

Tableau II.10 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y théorique selon (la rugosité 0 mm)

Rugosité 0 mm								
Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$	Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$	Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$
6,68	6,90	-3,15	8,96	9,25	-3,10	8,48	7,97	6,44
6,84	7,07	-3,23	9,48	9,89	-4,13	6,63	6,43	3,24
7,24	7,59	-4,56	6,00	6,31	-4,98	7,33	7,05	4,09
7,52	8,03	-6,30	7,33	7,58	-3,23	7,11	6,76	5,27
8,40	8,83	-4,89	8,10	8,09	0,18	3,90	3,67	6,17
8,53	8,95	-4,69	8,83	8,98	-1,58	4,08	3,85	5,82
8,93	9,33	-4,30	9,33	9,58	-2,59	4,45	4,30	3,40
6,37	6,96	-8,43	4,43	4,85	-8,65	4,78	4,54	5,29
7,29	7,89	-7,62	4,74	5,12	-7,43	5,30	5,06	4,85
7,60	8,33	-8,77	4,94	5,29	-6,58	6,30	5,89	7,02
3,95	4,48	-11,80	5,31	5,57	-4,65	6,80	6,39	6,40
3,98	4,48	-11,25	6,57	6,74	-2,49			
4,13	4,38	-5,91	7,00	7,04	-0,56			
4,38	4,72	-7,26	3,83	4,27	-10,53			
4,60	4,91	-6,33	4,05	4,37	-7,28			
4,83	5,30	-9,03	4,40	4,60	-4,41			
5,40	5,70	-5,34	4,65	4,79	-2,98			
5,70	6,06	-5,96	5,38	5,47	-1,81			
			5,80	5,82	-0,40			
			7,03	7,17	-2,00			

Tableau II.11 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y théorique selon (la rugosité 6 mm)

Rugosité 6 mm								
Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$	Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$	Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$
6,20	6,61	-6,16	6,72	6,93	-3,00	10,40	9,20	12,99
6,72	7,10	-5,42	7,08	7,26	-2,48	5,57	5,08	9,48
7,04	7,36	-4,31	7,92	7,76	2,00	5,93	5,46	8,58
7,20	7,61	-5,41	10,12	9,78	3,48	6,37	5,85	8,81
7,60	7,96	-4,47	10,68	10,42	2,53	6,83	6,24	9,43
9,08	9,28	-2,12	5,60	5,73	-2,35	7,97	7,33	8,75
10,24	10,56	-3,00	5,83	6,00	-2,74	8,40	7,53	11,50
10,72	10,93	-1,92	6,00	6,13	-2,13	8,80	7,95	10,64
11,28	11,59	-2,69	6,40	6,33	1,09	5,54	4,91	12,97

5,23	5,81	-9,96	6,90	6,80	1,40	5,86	5,28	10,88
5,77	6,28	-8,18	7,27	7,15	1,65	6,29	5,61	12,03
6,63	7,04	-5,71	7,83	7,57	3,51	6,63	6,00	10,47
7,77	8,03	-3,25	8,27	8,14	1,62	7,03	6,45	8,91
8,30	8,46	-1,93	8,80	8,71	0,99	7,80	7,03	10,92
8,80	9,05	-2,79	9,27	9,30	-0,38	3,83	3,79	1,03
9,10	9,50	-4,23	4,46	4,65	-4,21	4,08	3,92	4,03
4,57	5,15	-11,25	5,20	5,14	1,23	4,33	4,23	2,31
4,71	5,21	-9,44	5,63	5,58	0,93	4,65	4,45	4,42
4,97	5,43	-8,40	5,89	5,80	1,47	4,90	4,82	1,66
5,17	5,54	-6,64	3,85	4,11	-6,22			
5,37	5,71	-5,90	4,08	4,38	-6,90			
5,71	5,99	-4,64	4,28	4,56	-6,26			
6,00	6,22	-3,58	4,50	4,70	-4,25			
6,34	6,63	-4,34	4,75	4,93	-3,72			
3,90	4,53	-13,88	5,13	5,17	-0,88			
4,08	4,72	-13,59	5,75	5,95	-3,33			
4,30	4,90	-12,33	6,15	6,20	-0,76			
6,23	6,64	-6,22	6,50	6,55	-0,76			
6,58	7,16	-8,14	6,80	6,96	-2,29			
6,95	7,42	-6,35	7,28	7,43	-2,05			

Tableau II.12 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y théorique selon (la rugosité 8 mm)

Rugosité 8 mm								
Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$	Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$	Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$
6,20	6,86	-9,68	6,76	6,53	3,48	6,60	5,82	13,42
6,80	7,03	-3,26	7,04	6,94	1,46	6,96	6,13	13,53
7,12	7,45	-4,39	7,56	7,19	5,21	7,36	6,45	14,17
7,44	7,70	-3,38	8,12	7,69	5,66	8,04	6,85	17,37
8,16	8,39	-2,71	10,96	10,49	4,46	8,68	7,52	15,48
9,12	9,18	-0,63	5,23	5,42	-3,42	9,20	8,09	13,79
10,08	10,35	-2,63	5,43	5,74	-5,36	5,33	4,97	7,26
10,72	11,00	-2,55	5,86	5,57	5,07	5,60	5,22	7,25
11,40	11,75	-3,00	6,29	5,91	6,39	6,75	6,05	11,53
8,40	8,59	-2,22	6,74	6,30	6,96	7,20	6,40	12,56
6,77	6,97	-2,85	7,06	6,76	4,33			
7,06	7,27	-2,89	7,46	7,17	3,95			
7,46	7,45	0,14	7,94	7,71	3,03			
			4,98	4,41	12,94			

Tableau II.13 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y théorique selon (la rugosité 10 mm)

Rugosité 10 mm								
Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$	Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$	Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$
7,52	7,95	-5,46	6,48	6,79	-4,50	6,72	6,22	7,96

7,84	8,55	-8,36	7,40	7,52	-1,62	7,24	6,62	9,39
8,24	8,82	-6,53	7,84	7,77	0,88	7,84	7,02	11,70
8,52	8,99	-5,23	9,68	9,49	2,00	8,48	7,59	11,74
9,04	9,25	-2,32	10,04	9,76	2,92	9,07	8,28	9,46
9,52	9,79	-2,75	10,84	10,74	0,89	6,26	5,77	8,42
10,16	10,24	-0,78	5,50	5,87	-6,37	6,63	6,16	7,65
10,68	10,88	-1,84	5,67	6,00	-5,62	7,00	6,44	8,74
6,07	6,75	-10,11	5,93	6,27	-5,31	6,35	6,09	4,30
6,37	6,95	-8,43	6,43	6,66	-3,47			
6,63	7,37	-9,95	6,77	6,87	-1,45			
6,50	7,26	-10,49	7,23	7,34	-1,49			
6,68	7,42	-10,02	6,08	6,27	-3,05			
			6,40	6,66	-3,97			
			7,25	7,58	-4,40			

Tableau II.14 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y théorique selon (la rugosité 12 mm)

Rugosité 12 mm								
Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$	Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$	Y_{exp}	$Y_{\text{théo}}$	$(\Delta Y/Y)\%$
6,24	6,47	-3,60	6,96	6,95	0,10	6,32	5,55	13,88
6,68	6,88	-2,84	8,60	8,02	7,22	5,37	4,93	8,81
7,20	7,53	-4,40	8,96	8,44	6,14	5,67	5,18	9,46
7,44	7,70	-3,35	9,60	8,87	8,25	6,00	5,30	13,20
8,00	8,12	-1,46	10,08	9,30	8,38	6,33	5,68	11,59
8,40	8,55	-1,70	6,07	5,94	2,14	6,90	5,99	15,13
9,04	8,98	0,70	6,40	6,26	2,17	7,33	6,45	13,77
9,52	9,41	1,12	6,80	6,59	3,14	5,97	5,23	14,18
10,08	9,86	2,26	7,20	6,93	3,96	5,63	5,04	11,63
10,60	10,76	-1,48	7,67	7,26	5,55			
11,00	11,03	-0,30	8,17	7,61	7,38			
5,77	5,95	-3,03	8,67	8,23	5,30			
5,93	6,27	-5,44	5,83	5,51	5,76			
6,30	6,67	-5,59	6,29	6,06	3,74			
6,57	6,94	-5,42	7,14	6,79	5,16			
6,87	7,28	-5,73	7,49	7,20	4,03			
8,73	8,76	-0,31	5,93	5,62	5,44			
5,49	5,74	-4,49	6,63	6,49	2,02			
5,77	5,97	-3,25	6,98	6,79	2,69			
6,03	6,25	-3,48						
6,29	6,47	-2,89						
6,66	6,64	0,19						
7,14	7,22	-1,14						
7,69	7,70	-0,16						
5,33	5,54	-3,95						
5,70	5,83	-2,29						
6,03	6,08	-0,86						
6,38	6,52	-2,27						
6,68	6,77	-1,46						
6,95	7,03	-1,11						

II.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre, nous avons mené à la fois une analyse théorique et une analyse expérimentale de l'équation semi-théorique. Sur le plan théorique, un développement a été présenté afin d'exprimer la relation fonctionnelle $f(F_1, Y, Cr, \lambda, \beta, \tau, \alpha) = 0$, décrivant le ressaut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire de section composée, avec lit majeur rugueux et pente positive. Ce travail a permis d'établir une relation semi-théorique, obtenue grâce à l'application de l'équation de la quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut hydraulique. Dans le cas particulier où $\alpha=0$ et le coefficient $Cr = 0$, la relation théorique (2.34) se réduit à la relation (2.35), correspondant au ressaut hydraulique classique évoluant dans un canal rectangulaire composé lisse approche (Khattaoui & Achour, 2012). Cette convergence vers une formulation connue constitue un argument supplémentaire en faveur de la validité et de la cohérence du développement théorique développé.

Par ailleurs le coefficient de correction k , défini comme le rapport entre le volume réel et le volume calculé du ressaut, a été déterminé à partir de données expérimentales. Pour les trois pentes testées, sa valeur moyenne constante est $k = 4,24$, ce qui confirme la fiabilité de la relation (2.34).

Dans un second temps, l'analyse expérimentale de l'équation semi-théorique nous a permis d'aboutir à une approche adimensionnelle explicite. Cette approche offre la possibilité de calculer le rapport Y des hauteurs conjuguées au laboratoire. Par conséquent, l'erreur relative de ces mesures déduites des deux expressions obtenues ne dépasse en majorité les 10%. Ce constat permet de conclure que la relation (2.34), précédemment établie, présente un degré de validité suffisant pour être considérée comme fiable et scientifiquement très acceptable à l'utilisation au dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Chapitre III

Etude expérimentale

III.1 INTRODUCTION :

Des travaux expérimentaux et numériques récents se sont intéressés à l'influence conjointe de la rugosité du lit et de la pente du canal sur la formation et les caractéristiques des ressauts hydrauliques, principalement dans des canaux rectangulaires simples (Palermo & Pagliara, 2017); (Laishram et al., 2021); (Gupta, S. K. & Dwivedi, V. K., 2023, 2024, 2025). Ces études montrent que l'augmentation de la rugosité du lit et de la pente du canal tend à réduire les paramètres caractéristiques du ressaut hydraulique, notamment sa longueur et son rapport des hauteurs conjuguées.

Cependant, la littérature concernant les effets combinés de la rugosité et de la pente dans les canaux composés demeure limitée, en particulier lorsque la rugosité est appliquée au lit mineur ou au lit majeur. Les travaux de (Parsamehr et al., 2022) ainsi que ceux de (Gupta, S. K. & Dwivedi, V. K., 2023, 2024, 2025). Soulignent que ces interactions présentent une complexité accrue et nécessitent des investigations supplémentaires afin de mieux caractériser les mécanismes hydrauliques associés.

À ce jour, le ressaut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire de section composée, présentant un lit majeur rugueux et une pente positive, n'a pas encore fait l'objet d'études approfondies. **Pour combler cette lacune, la présente recherche a été entreprise.**

Dans ce chapitre, nous analysons expérimentalement le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux et pente positive. L'objectif est de proposer des corrélations empiriques adimensionnelles permettant de décrire et de prédire les caractéristiques de ce type particulier de ressaut hydraulique permettant de dimensionner les ouvrages hydrauliques notamment les bassins d'amortissement.

III.2 RÉSULTATS ET DISCUSSION :

III.2.1 La variation du rapport « Y » des hauteurs conjuguées en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal « α »

Les figures de (III.1) à (III.4) montrent l'évolution du rapport des hauteurs conjuguées $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude F_1 . Ces données sont présentées pour quatre angles d'inclinaison distincts, où $\tan(\alpha)$ prend les valeurs de 0,00, 0,005, 0,010 et 0,015. L'analyse tient également compte de plusieurs valeurs de rugosités absolues : ($\varepsilon = \text{mm}$) = 00 ; 06 ; 08 ; 10 et 12.

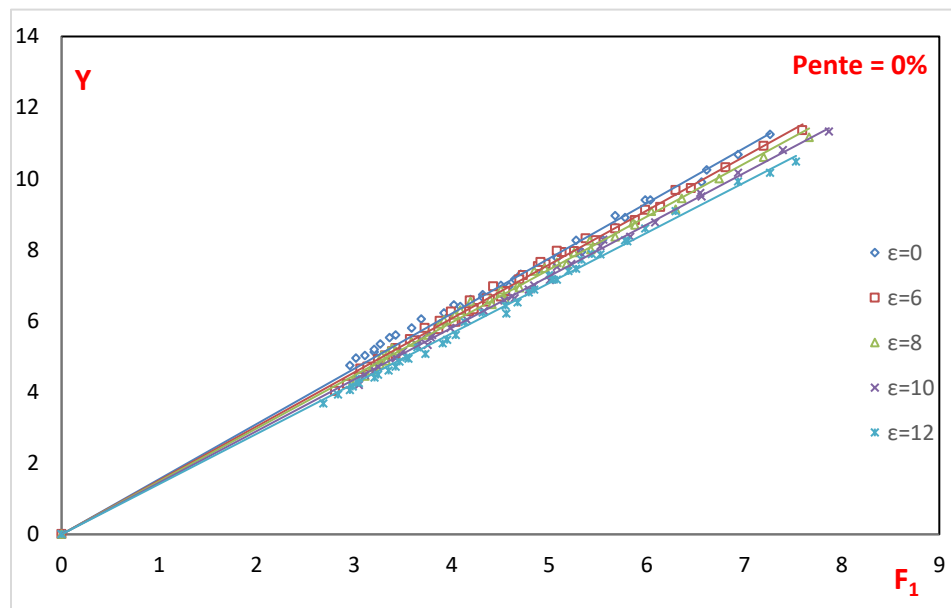


Figure III.1 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\epsilon(\text{mm}) = 0, 6, 8, 10$ et 12

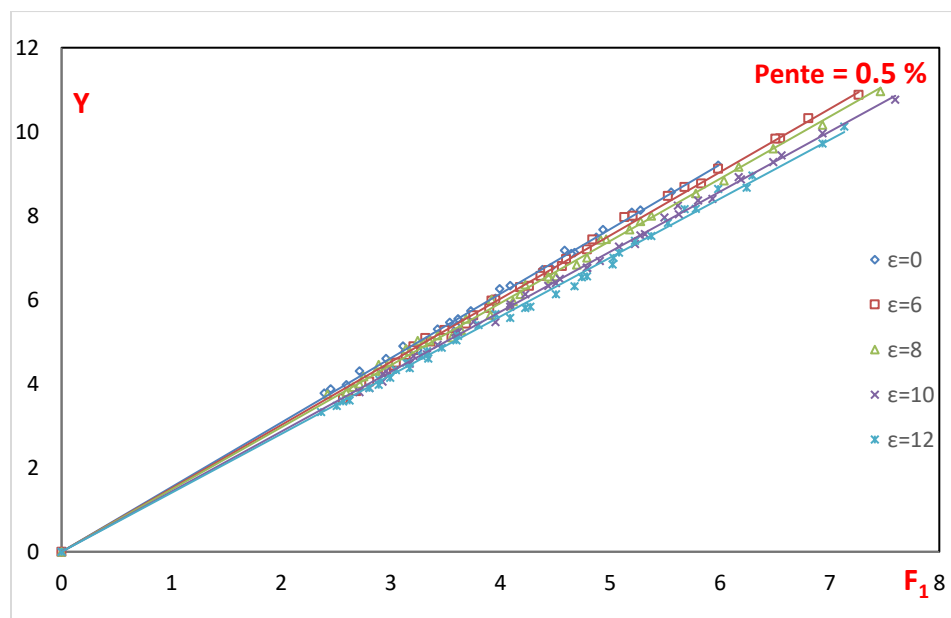


Figure III.2 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\epsilon(\text{mm}) = 0, 6, 8, 10$ et 12

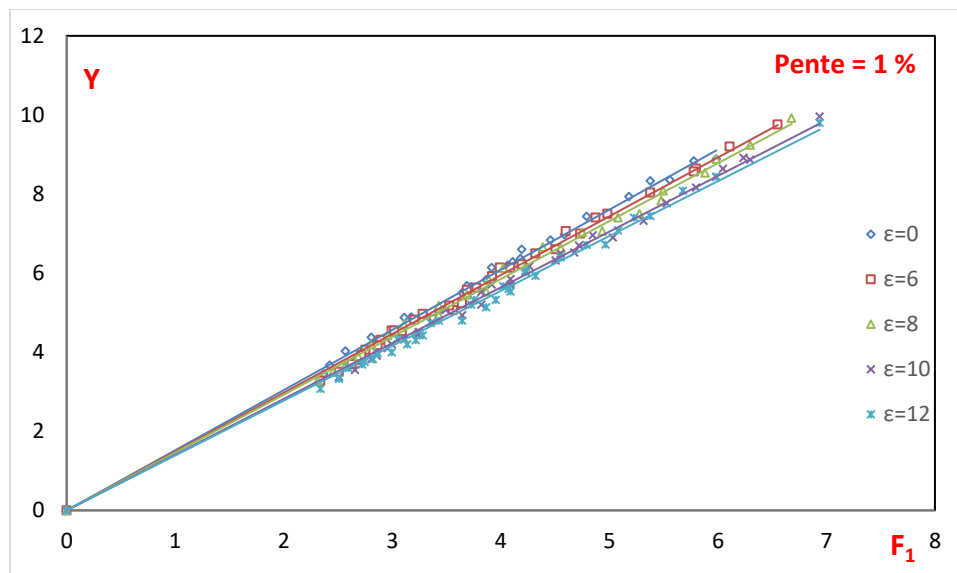


Figure III.3 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon(\text{mm}) = 0, 6, 8, 10$ et 12

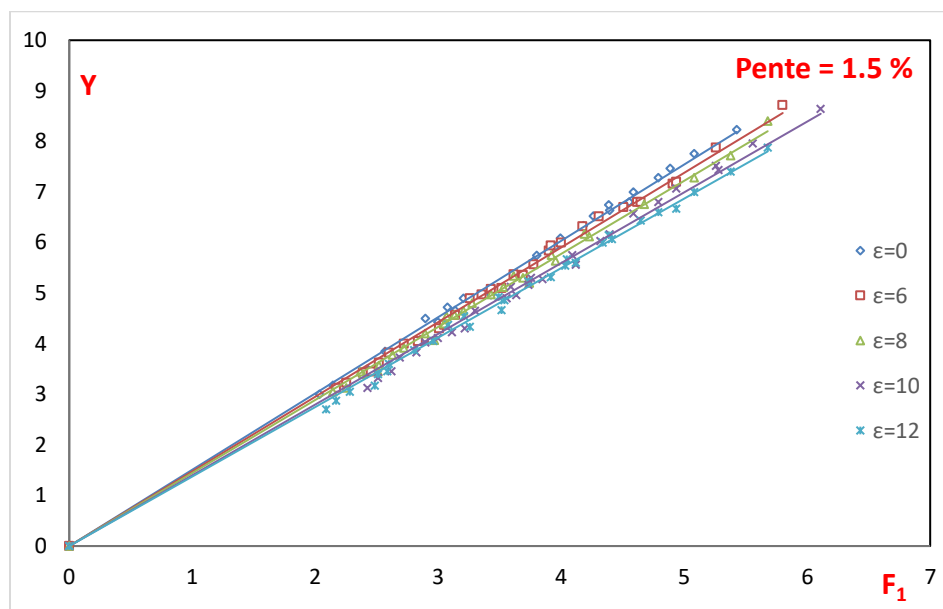


Figure III.4 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées du ressaut en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon(\text{mm}) = 0, 6, 8, 10$ et 12

Tableau III.1 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Y en fonction de F1.

Pente 0 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F ₁	Y	F ₁	Y	F ₁	Y	F ₁	Y	F ₁	Y
5,68	8,96	4,23	6,24	4,39	6,48	4,62	6,56	4,56	6,20
5,99	9,40	4,39	6,48	4,51	6,68	4,85	6,88	4,68	6,52
6,30	9,64	4,51	6,56	4,68	6,88	5,02	7,16	4,85	6,88
6,62	10,24	4,73	7,16	4,85	7,28	5,08	7,40	5,08	7,16
6,94	10,68	4,96	7,48	5,08	7,52	5,32	7,80	5,20	7,40
7,27	11,24	5,26	7,84	5,26	7,80	5,56	8,16	5,44	7,88
4,09	6,40	5,38	8,20	5,86	8,64	6,55	9,48	5,80	8,24
4,32	6,73	5,68	8,48	6,05	8,96	6,94	10,04	5,99	8,60
4,32	6,67	5,99	9,00	6,36	9,32	7,40	10,68	6,30	9,08
4,51	7,00	6,30	9,56	6,74	9,88	7,87	11,20	6,94	9,92
4,65	7,17	6,81	10,20	7,20	10,48	4,65	6,53	7,27	10,16
4,89	7,43	7,20	10,80	7,67	11,04	5,03	7,07	7,53	10,48
5,08	7,77	7,60	11,24	4,41	6,37	5,23	7,50	3,56	4,93
5,28	8,27	3,87	5,67	4,55	6,50	5,53	8,00	3,73	5,07
5,68	8,63	4,05	5,87	4,70	6,83	5,83	8,27	3,91	5,37
5,78	8,90	4,18	6,17	5,18	7,50	6,09	8,67	3,96	5,47
6,04	9,40	4,37	6,43	5,43	7,90	6,56	9,40	4,05	5,60
6,56	9,90	4,55	6,73	5,68	8,27	3,21	4,51	4,14	5,97
4,39	6,63	4,70	7,07	5,88	8,60	3,25	4,63	4,32	6,23
4,59	6,97	4,89	7,43	6,30	9,03	3,43	4,86	4,55	6,43
4,71	7,31	5,13	7,83	3,17	4,54	3,43	4,89	4,79	6,80
4,91	7,54	5,48	8,17	3,25	4,69	3,50	5,06	5,03	7,17
5,33	7,94	5,88	8,73	3,28	4,94	3,65	5,23	5,28	7,47
5,55	8,29	6,14	9,10	3,36	5,06	3,69	5,40	5,53	7,87
2,96	4,75	6,46	9,63	3,39	5,14	3,80	5,51	5,78	8,27
3,02	4,95	3,07	4,57	3,88	5,83	3,05	4,13	3,21	4,40
3,11	5,03	3,14	4,63	4,03	6,09	3,11	4,40	3,25	4,49
3,21	5,13	3,25	4,83	4,96	7,40	3,75	5,25	3,36	4,60
3,21	5,20	3,32	4,94	5,42	8,17	3,79	5,45	3,43	4,71
3,27	5,35	3,39	5,06	2,99	4,23	3,99	5,73	3,46	4,86
3,36	5,53	3,43	5,14	3,02	4,28	4,16	5,95	3,54	4,97
3,43	5,60	3,58	5,40	3,11	4,38	4,33	6,20	3,65	5,26
3,59	5,80	3,73	5,71	3,17	4,53	4,54	6,50	5,00	7,29
3,69	6,05	3,88	5,91	3,21	4,63	4,79	6,80	5,33	7,71
3,92	6,23	3,99	6,17	3,27	4,70	5,01	7,08	2,69	3,68
4,02	6,45	4,19	6,49	3,33	4,80			2,84	3,93
4,19	6,60	4,43	6,89	3,43	5,08			2,96	4,05
		4,91	7,57	3,59	5,33			2,99	4,15
		5,08	7,89	3,75	5,53			3,05	4,25
		2,81	3,95	3,92	5,95				
		2,93	4,15	4,09	6,23				
		3,05	4,35	4,19	6,48				
		3,43	4,98	4,51	6,80				
		3,62	5,38						
		4,02	5,90						
		4,23	6,25						
		4,37	6,55						

Tableau III.2 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Y en fonction de F_1 .

Pente 0,5 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y
4,68	7,12	4,39	6,52	4,23	6,24	4,79	6,76	4,68	5,80
5,20	8,08	4,56	6,68	4,51	6,44	4,91	6,92	4,79	6,32
5,56	8,56	4,79	7,08	4,96	7,32	5,32	7,56	5,02	6,56
5,99	9,20	5,68	8,56	5,38	7,88	5,50	7,96	5,08	6,84
3,43	5,30	5,99	9,00	6,17	9,04	5,62	8,24	5,38	7,12
3,60	5,50	6,55	9,72	6,49	9,48	5,80	8,36	5,68	7,52
3,73	5,80	6,81	10,20	6,94	10,04	6,17	8,92	5,99	8,16
3,96	6,03	7,27	10,76	7,47	10,84	6,49	9,28	6,30	8,64
4,09	6,33	3,56	5,03	3,56	5,00	6,94	9,96	6,94	8,96
4,46	6,77	3,69	5,33	3,64	5,17	7,60	10,76	7,13	9,72
4,65	7,10	3,96	5,90	3,91	5,63	3,96	5,47	3,34	10,12
4,94	7,67	4,18	6,20	4,09	5,77	4,09	5,83	3,60	4,60
5,28	8,13	4,37	6,47	4,18	6,03	4,23	6,13	4,09	5,03
5,53	8,47	4,60	6,87	4,46	6,40	4,51	6,40	4,27	5,57
3,00	4,57	4,84	7,33	4,70	6,73	4,79	6,77	4,51	5,83
3,25	5,00	5,13	7,87	4,79	6,90	5,08	7,27	4,74	6,13
3,36	5,09	5,53	8,37	5,18	7,57	5,28	7,53	5,03	6,53
3,54	5,46	5,83	8,67	5,28	7,77	5,63	8,03	5,23	7,00
3,61	5,54	6,51	9,73	5,78	8,43	5,93	8,40	5,53	7,40
3,92	5,91	2,96	4,20	6,04	8,73	6,19	8,87	5,78	7,83
3,99	6,26	3,00	4,34	2,75	4,09	6,56	9,43	6,25	8,17
4,39	6,71	3,14	4,60	2,89	4,37	2,93	4,23	2,89	8,67
4,59	7,17	3,21	4,80	3,14	4,74	3,21	4,66	3,00	3,97
4,87	7,49	3,32	5,00	3,25	4,94	3,61	5,23	3,17	4,14
5,21	7,94	5,21	7,91	3,36	4,94	2,72	3,80	3,28	4,37
2,45	3,85	2,57	3,58	3,69	5,46	2,81	3,90	3,46	4,66
2,45	3,88	2,69	3,75	4,91	7,34	2,93	4,05	3,61	4,86
2,40	3,78	2,81	3,98	2,42	3,68	3,17	4,48	3,80	5,14
2,60	3,98	2,96	4,23	2,60	3,73	2,96	4,30	3,96	5,40
2,72	4,30	3,05	4,43	2,66	3,85	3,33	4,70	2,37	5,66
2,96	4,60	3,21	4,73	2,72	3,93	3,43	4,93	2,51	3,33
3,11	4,90	3,36	4,93	2,87	4,23	3,59	5,23	2,57	3,48
		3,49	5,20	2,99	4,45	3,75	5,48	2,63	3,58
		3,75	5,55	3,17	4,70	4,09	5,90	2,81	3,60
		3,92	5,90	3,30	4,90	4,44	6,33	2,90	3,90
		4,26	6,25	3,43	5,08	4,54	6,50	3,05	4,10
		4,44	6,63	3,92	5,93	4,79	6,75	3,14	4,33
				4,44	6,48	5,23	7,33	3,33	4,50

Tableau III.3 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Y en fonction de F_1 .

Pente 1 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y
4,06	6,20	4,51	6,50	5,08	7,36	4,51	6,32	4,96	6,72
5,56	8,36	4,73	6,90	5,50	7,95	4,68	6,52	5,08	7,08
5,99	9,12	5,80	8,54	5,99	8,78	4,85	6,96	5,38	7,44
3,30	4,93	6,11	9,10	6,30	8,92	5,32	7,32	5,68	8,08
3,43	5,03	6,55	9,66	6,68	9,82	5,80	8,16	5,99	8,44
3,64	5,50	3,09	4,45	3,22	4,42	6,05	8,64	6,94	9,80

3,87	5,83	3,39	4,75	3,43	4,85	6,24	8,92	3,22	4,30
4,18	6,40	3,56	4,98	3,87	5,45	6,94	9,96	3,64	4,80
4,46	6,80	3,64	5,15	4,09	5,69	3,64	4,93	3,87	5,13
4,79	7,33	3,78	5,55	4,55	6,55	3,82	5,20	4,09	5,53
5,18	7,93	4,09	6,05	4,94	6,99	4,09	5,70	4,32	5,93
5,38	8,33	4,32	6,41	5,28	7,42	4,23	6,03	4,55	6,40
5,78	8,83	4,60	6,98	5,48	7,75	4,55	6,50	5,23	7,40
2,72	4,06	4,98	7,41	5,88	8,33	5,03	6,90	2,72	3,69
2,89	4,34	5,38	7,95	4,39	6,59	5,53	7,77	2,82	3,83
3,00	4,51	5,78	8,48	4,75	6,97	5,99	8,43	3,00	4,00
3,17	4,89	2,69	3,73	2,31	3,22	6,30	8,87	3,14	4,20
3,54	5,14	2,75	3,98	2,45	3,45	2,86	3,91	3,28	4,43
3,73	5,66	2,89	4,24	2,57	3,63	3,00	4,20	3,36	4,74
3,92	6,14	3,00	4,47	2,69	3,85	3,25	4,51	3,73	5,20
4,11	6,29	3,28	4,90	2,81	4,18	3,92	5,71	4,07	5,60
4,59	6,97	3,99	6,07	2,96	4,37	2,51	3,38	4,23	6,06
5,00	7,49	4,87	7,33	3,11	4,64	2,66	3,55	4,79	6,71
2,37	3,45	2,34	3,21	3,43	5,12	2,81	3,83	2,34	3,08
2,42	3,68	2,51	3,44	3,69	5,39	2,96	4,10	2,51	3,33
2,57	4,03	2,63	3,64	3,89	5,77	3,11	4,33	2,60	3,60
2,81	4,38	2,72	3,86	4,02	6,07	3,24	4,45	2,75	3,75
3,11	4,88	2,87	4,11			3,49	5,08	2,87	3,98
4,19	6,60	3,02	4,49			3,82	5,53	3,05	4,33
		3,21	4,76			4,09	5,85	3,43	4,80
		3,53	5,11			4,26	6,18	3,75	5,33
		3,69	5,51			4,72	6,70	4,02	5,68
		3,92	5,86					4,23	6,03
		4,19	6,16						

Tableau III.4 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Y en fonction de F_1 .

Pente 1,5 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y	F_1	Y
4,39	6,64	4,17	6,24	4,68	6,60	4,79	6,80	4,79	6,60
4,79	7,28	4,62	6,72	5,08	7,20	5,26	7,52	5,08	7,00
5,08	7,76	4,91	7,00	5,38	7,60	5,56	7,84	5,38	7,40
3,43	4,97	5,26	7,80	5,68	8,32	6,11	8,64	5,68	7,88
3,78	5,63	5,80	8,64	2,97	4,00	3,22	4,33	3,26	4,33
4,18	6,33	2,89	4,00	3,13	4,50	3,56	4,90	3,51	4,67
4,55	6,80	3,01	4,23	2,39	3,29	3,73	5,17	3,73	5,23
4,89	7,47	3,26	4,83	2,52	3,49	4,32	6,03	4,05	5,67
5,43	8,23	3,51	5,03	2,72	3,86	4,94	7,07	4,41	6,07
2,72	4,00	3,78	5,50	2,89	4,14	5,28	7,43	4,65	6,43
3,00	4,43	4,00	5,93	3,07	4,43	2,62	3,46	4,94	6,67
3,14	4,66	4,51	6,47	3,43	4,91	2,82	3,83	2,49	3,17
3,43	5,09	4,65	6,73	3,61	5,29	3,00	4,11	2,59	3,46
3,80	5,74	4,94	7,13	4,19	6,11	4,59	6,57	2,96	4,06
3,99	6,09	2,39	3,37	2,14	3,00	2,42	3,13	3,21	4,54
4,39	6,74	2,52	3,57	2,25	3,08	2,51	3,33	3,54	4,86
4,59	7,00	2,72	3,94	2,37	3,40	2,69	3,73	3,92	5,31
2,03	3,00	3,14	4,51	2,51	3,40	2,90	4,03	4,03	5,54
2,14	3,18	3,36	4,91	2,63	3,63	3,11	4,23	4,39	6,14
2,42	3,50	3,61	5,31	3,05	4,25	3,30	4,65	2,09	2,70
2,57	3,85	3,92	5,89	3,21	4,58	3,59	5,13	2,17	2,88
2,90	4,50	4,31	6,46	3,69	5,25	3,75	5,30	2,28	3,05

3,21	4,90	2,17	3,08	3,92	5,70	4,09	5,75	2,51	3,40
4,26	6,53	2,25	3,18					2,60	3,60
		2,45	3,40					2,81	3,88
		2,60	3,78					3,08	4,38
		2,84	4,00					3,49	4,93
		3,05	4,33						

On distingue cinq nuages de points, chacun associé à une rugosité fixée. L'analyse des données expérimentales du ressaut hydraulique avec lit majeur rugueux démontre que pour chaque valeur de rugosité « ε », les données s'alignent suivant une relation linéaire de la forme $Y = a F_1$.

Ces résultats montrent que le rapport des hauteurs conjuguées h_2/h_1 augmente avec le nombre de Froude amont F_1 , pour une rugosité donnée. En revanche, une augmentation de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$ provoque une diminution de ce même rapport.

Les résultats de cette corrélation sont récapitulés dans le tableau III.5

Tableau III.5 : Facteur a_1 de corrélations

Pente 0 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_1	R^2
0,000	1,5517	0,9994
0,057	1,4968	0,9997
0,075	1,4689	0,9996
0,094	1,4322	0,9998
0,113	1,4130	0,9997

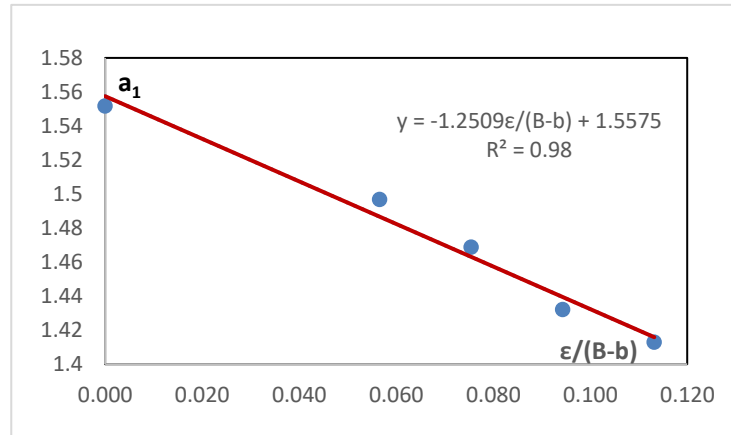


Figure III.5: Corrélation du facteur a_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

L'analyse des mesures expérimentales des couples de valeurs $(\varepsilon/(B-b), a_1)$ conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_1 = -1,2509(\varepsilon/(B-b)) + 1,5575$

Tableau III.6 : Facteur a_2 de corrélations

Pente 0,5 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_2	R^2
0,000	1,5399	0,9998
0,057	1,4856	0,9997
0,075	1,4597	0,9997
0,094	1,4286	0,9998
0,113	1,4005	0,9997

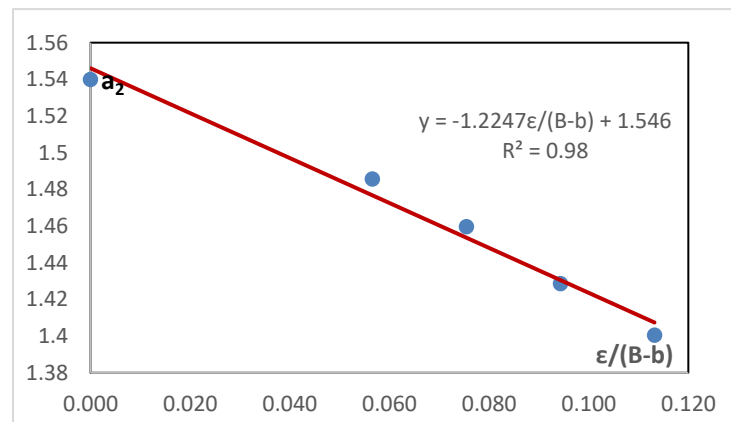


Figure III.6: Corrélation du facteur a_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs $(\varepsilon/(B-b), a_2)$ conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_2 = -1,2247(\varepsilon/(B-b)) + 1,546$

Tableau III.7 : Facteur a_3 de corrélations

Pente 1 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_3	R^2
0,000	1,5228	0,9996
0,057	1,4677	0,9996
0,075	1,4428	0,9996
0,094	1,4097	0,9996
0,113	1,3876	0,9995

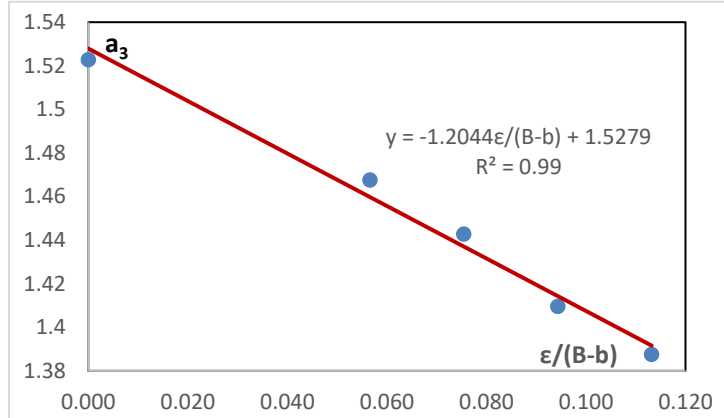


Figure III.7: Corrélation du facteur a_3 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs $(\varepsilon/(B-b), a_3)$ conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_3 = -1,2044(\varepsilon/(B-b)) + 1,5279$

Tableau III.8 : Facteur a_4 de corrélations

Pente 1,5 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_4	R^2
0,000	1,5086	0,9997
0,057	1,4557	0,9996
0,075	1,4241	0,9997
0,094	1,4015	0,9995
0,113	1,3738	0,9996

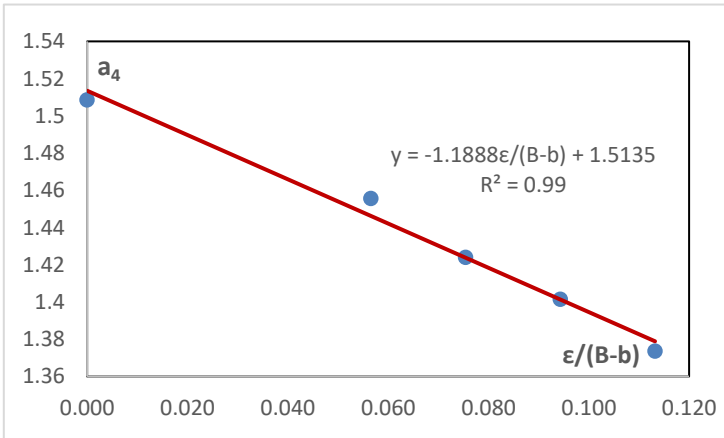


Figure III.8: Corrélation du facteur a_4 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs $(\varepsilon/(B-b), a_4)$ conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_4 = -1,1888(\varepsilon/(B-b)) + 1,5135$

Remplaçant les paramètres a par leurs expressions respectives dans la relation $Y = a F_1$, on obtient ce qui suit :

$$Y = (-1,2509\varepsilon/(B - b) + 1,5575)F_1 \quad ; \quad \tan \alpha = 0\% \quad (3.1).$$

$$Y = (-1,2247\varepsilon/(B - b) + 1,546)F_1 \quad ; \quad \tan \alpha = 0,5\% \quad (3.2)$$

$$Y = (-1,2044\varepsilon/(B - b) + 1,5279)F_1 \quad ; \quad \tan \alpha = 1\% \quad (3.3)$$

$$Y = (-1,1888\varepsilon/(B - b) + 1,5135)F_1 \quad ; \quad \tan \alpha = 1,5\% \quad (3.4)$$

Le tableau ci-dessous représente les valeurs de a' et b' du coefficient de rugosité avec l'angle d'inclinaison du canal.

Tableau III.9 : Valeurs a' et b' du coefficient de rugosité corrélées
Avec l'angle d'inclinaison du canal.

$\varepsilon/(B-b)$	0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12		
$\tan(\alpha)$	a'	b'	R^2
0 %	-1,2509	1,5575	0,98
0,5 %	-1,2247	1,5460	0,98
1 %	-1,2044	1,5279	0,99
1,5 %	-1,1888	1,5135	0,99

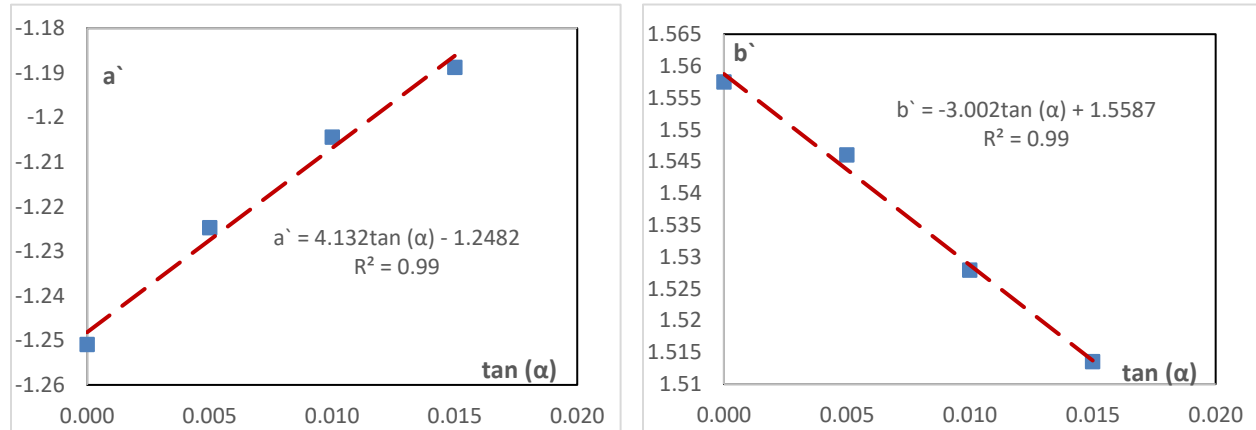


Figure III.9 : Variation des facteurs a' et b' en fonction de $\tan(\alpha)$

$$a' = 4,132 \tan(\alpha) - 1,2482 \quad R^2 = 0,99 \quad (3.5)$$

$$b' = -3,002 \tan(\alpha) + 1,5587 \quad R^2 = 0,99 \quad (3.6)$$

Il serait pratique de reformuler les quatre relations en une équation globale sous la forme suivante :

$$Y = [(4,132(\tan(\alpha)) - 1,2482)\varepsilon/(B - b) - 3,002(\tan(\alpha)) + 1,5587]F_1 \quad (3.7)$$

$$2,03 \leq F_1 \leq 7,87 \quad 0,000 \leq \frac{\varepsilon}{B-b} \leq 0,113 \quad 0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,015$$

La relation globale (3.7), explicite et sans dimension dont le rapport h_2/h_1 , offre une méthode simple et pratique pour déterminer les hauteurs conjuguées du ressaut hydraulique (Y), étant donné le nombre de Froude incident F_1 , la pente du canal tangentiel (α) et la rugosité relative ($\varepsilon/(B-b)$).

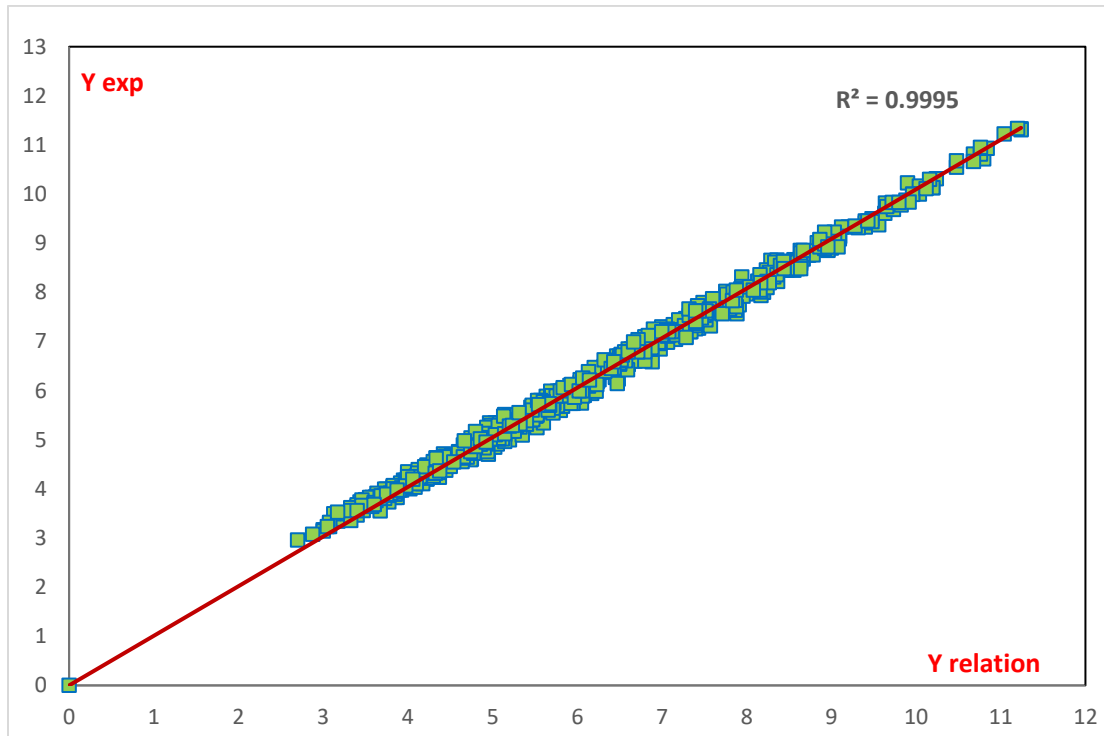


Figure III.10 : Variation de Y expérimentale du ressaut Y_{exp} en fonction de Y relation du ressaut Y calculée selon la relation (3.7).

La validité de la comparaison entre l'approche globale adimensionnelle $Y_{relation}$ et les valeurs expérimentales Y_{exp} est illustrée par la Figure III.10. La bonne adéquation des données avec la première bissectrice confirme la pertinence de cette modélisation fonctionnelle. De plus, Les écarts relatifs observés, majoritairement inférieurs à 5 %, témoignent d'une précision satisfaisante dans les calculs, tout en simplifiant l'exploitation des données, et le coefficient de corrélation élevé ($R^2 = 0,9995$) indique une forte concordance entre les données expérimentales et le modèle appliqué. De plus, l'erreur absolue moyenne ($MAE = 0,092$) reflète la grande précision du modèle, tandis que l'erreur relative moyenne ($MRE = 0,018$) et l'écart type de l'erreur relative ($\sigma RE = 0,042$) soulignent la cohérence des prédictions dans diverses conditions.

Tableau III.10 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y relation selon (la rugosité 0 mm)

Rugosité 0 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %
8,96	8,85	1,21	7,12	7,29	-2,37	6,20	6,33	-2,14	6,64	6,85	-3,12
9,40	9,33	0,74	8,08	8,10	-0,29	8,36	8,66	-3,60	7,28	7,47	-2,55
9,64	9,82	-1,83	8,56	8,66	-1,19	9,12	9,33	-2,28	7,76	7,92	-2,04
10,24	10,31	-0,70	9,20	9,33	-1,40	4,93	5,14	-4,26	4,97	5,34	-7,56
10,68	10,81	-1,26	5,30	5,34	-0,81	5,03	5,34	-6,14	5,63	5,88	-4,47
11,24	11,33	-0,76	5,50	5,61	-2,04	5,50	5,68	-3,27	6,33	6,52	-2,89
6,40	6,38	0,37	5,80	5,82	-0,30	5,83	6,02	-3,27	6,80	7,10	-4,35
6,73	6,73	0,00	6,03	6,16	-2,17	6,40	6,52	-1,83	7,47	7,62	-1,99
6,67	6,73	-1,00	6,33	6,38	-0,67	6,80	6,95	-2,20	8,23	8,46	-2,72
7,00	7,02	-0,35	6,77	6,95	-2,72	7,33	7,47	-1,81	4,00	4,24	-5,98
7,17	7,24	-1,09	7,10	7,24	-2,03	7,93	8,07	-1,74	4,43	4,67	-5,45
7,43	7,62	-2,48	7,67	7,69	-0,33	8,33	8,38	-0,56	4,66	4,89	-5,02
7,77	7,92	-1,98	8,13	8,23	-1,14	8,83	9,01	-1,98	5,09	5,34	-5,04
8,27	8,23	0,48	8,47	8,61	-1,75	4,06	4,24	-4,50	5,74	5,92	-3,16
8,63	8,85	-2,53	4,57	4,67	-2,18	4,34	4,51	-3,79	6,09	6,22	-2,26
8,90	9,01	-1,24	5,00	5,06	-1,19	4,51	4,67	-3,46	6,74	6,83	-1,37
9,40	9,41	-0,11	5,09	5,23	-2,82	4,89	4,95	-1,25	7,00	7,15	-2,11
9,90	10,23	-3,32	5,46	5,52	-1,07	5,14	5,52	-7,24	3,00	3,17	-5,69
6,63	6,84	-3,14	5,54	5,63	-1,60	5,66	5,81	-2,65	3,18	3,34	-5,21
6,97	7,15	-2,56	5,91	6,10	-3,21	6,14	6,10	0,64	3,50	3,78	-7,93
7,31	7,34	-0,35	6,26	6,22	0,52	6,29	6,41	-1,90	3,85	4,00	-3,97
7,54	7,66	-1,56	6,71	6,84	-1,82	6,97	7,15	-2,54	4,50	4,51	-0,30
7,94	8,32	-4,69	7,17	7,15	0,31	7,49	7,79	-4,05	4,90	5,00	-1,94
8,29	8,65	-4,39	7,49	7,60	-1,47	3,45	3,69	-6,93	6,53	6,64	-1,79
4,75	4,61	2,95	7,94	8,12	-2,18	3,68	3,78	-2,80	6,64	6,85	-3,12
4,95	4,71	4,94	3,85	3,82	0,70	4,03	4,00	0,54	7,28	7,47	-2,55
5,03	4,85	3,47	3,88	3,82	1,34	4,38	4,37	0,05	7,76	7,92	-2,04
5,13	5,00	2,50	3,78	3,73	1,09	4,88	4,85	0,52			
5,20	5,00	3,91	3,98	4,05	-1,87	6,60	6,53	0,99			
5,35	5,10	4,77	4,30	4,23	1,55						
5,53	5,24	5,09	4,60	4,61	-0,21						
5,60	5,34	4,58	4,90	4,85	1,02						
5,80	5,60	3,52									
6,05	5,75	4,97									
6,23	6,11	1,81									
6,45	6,27	2,79									
6,60	6,54	0,97									

Tableau III.11 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y relation selon (la rugosité 6 mm)

Rugosité 6 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Y _{exp}	Y _{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y _{exp}	Y _{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y _{exp}	Y _{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y _{exp}	Y _{rela}	$\Delta Y/Y$ %
6,24	6,29	-0,82	6,52	6,54	-0,28	6,50	6,70	-3,21	6,24	6,21	0,52
6,48	6,54	-0,91	6,68	6,79	-1,64	6,90	7,04	-2,13	6,72	6,87	-2,27
6,56	6,71	-2,22	7,08	7,13	-0,69	8,54	8,63	-1,11	7,00	7,30	-4,27
7,16	7,04	1,62	8,56	8,45	1,29	9,10	9,09	0,06	7,80	7,82	-0,29
7,48	7,39	1,24	9,00	8,91	1,04	9,66	9,75	-0,95	8,64	8,63	0,12
7,84	7,82	0,20	9,72	9,75	-0,29	4,45	4,60	-3,42	4,00	4,29	-7,35
8,20	8,00	2,42	10,20	10,13	0,68	4,75	5,04	-6,11	4,23	4,48	-5,73
8,48	8,45	0,35	10,76	10,81	-0,47	4,98	5,29	-6,28	4,83	4,85	-0,28
9,00	8,91	1,03	5,03	5,29	-5,17	5,15	5,42	-5,36	5,03	5,23	-3,87
9,56	9,37	1,97	5,33	5,49	-2,90	5,55	5,62	-1,30	5,50	5,62	-2,15
10,20	10,13	0,67	5,90	5,88	0,26	6,05	6,09	-0,65	5,93	5,95	-0,29
10,80	10,71	0,80	6,20	6,22	-0,36	6,41	6,43	-0,22	6,47	6,70	-3,67
11,24	11,31	-0,60	6,47	6,50	-0,47	6,98	6,84	1,94	6,73	6,91	-2,69
5,67	5,75	-1,51	6,87	6,85	0,31	7,41	7,42	-0,02	7,13	7,34	-2,93
5,87	6,02	-2,61	7,33	7,20	1,82	7,95	8,00	-0,67	3,37	3,55	-5,35
6,17	6,22	-0,91	7,87	7,63	2,96	8,48	8,60	-1,42	3,57	3,75	-4,93
6,43	6,50	-1,00	8,37	8,22	1,70	3,73	4,00	-7,28	3,94	4,05	-2,64
6,73	6,78	-0,63	8,67	8,68	-0,12	3,98	4,10	-2,89	4,51	4,67	-3,43
7,07	6,99	1,12	9,73	9,68	0,50	4,24	4,30	-1,49	4,91	4,99	-1,56
7,43	7,27	2,17	4,20	4,41	-4,93	4,47	4,46	0,22	5,31	5,38	-1,15
7,83	7,63	2,54	4,34	4,46	-2,68	4,90	4,88	0,28	5,89	5,83	1,01
8,17	8,15	0,20	4,60	4,67	-1,52	6,07	5,94	2,09	6,46	6,41	0,78
8,73	8,75	-0,24	4,80	4,78	0,49	7,33	7,25	1,03	3,08	3,23	-5,04
9,10	9,14	-0,42	5,00	4,94	1,24	3,21	3,48	-8,41	3,18	3,35	-5,64
9,63	9,61	0,27	7,91	7,75	2,10	3,44	3,74	-8,75	3,40	3,65	-7,33
4,57	4,56	0,15	3,58	3,82	-6,92	3,64	3,91	-7,54	3,78	3,87	-2,39
4,63	4,67	-0,90	3,75	4,00	-6,60	3,86	4,04	-4,69	4,00	4,22	-5,48
4,83	4,83	-0,04	3,98	4,17	-5,03	4,11	4,26	-3,76	4,33	4,54	-4,90
4,94	4,94	0,09	4,23	4,40	-4,16	4,49	4,49	-0,15	6,24	6,21	0,52
5,06	5,05	0,21	4,43	4,54	-2,55	4,76	4,77	-0,20	6,72	6,87	-2,27
5,14	5,10	0,81	4,73	4,77	-0,95	5,11	5,24	-2,63	7,00	7,30	-4,27
5,40	5,32	1,45	4,93	5,01	-1,63	5,51	5,49	0,41			
5,71	5,54	2,97	5,20	5,20	0,06	5,86	5,83	0,44			
5,91	5,77	2,42	5,55	5,59	-0,66	6,16	6,24	-1,28			
6,17	5,94	3,71	5,90	5,83	1,11						
6,49	6,23	3,90	6,25	6,34	-1,47						
6,89	6,59	4,35	6,63	6,60	0,37						
7,57	7,31	3,41	6,52	6,54	-0,28						
7,89	7,56	4,11									
3,95	4,18	-5,71									
4,15	4,36	-4,95									
4,35	4,54	-4,33									
4,98	5,10	-2,54									
5,38	5,39	-0,30									
5,90	5,99	-1,46									
6,25	6,29	-0,66									
6,55	6,50	0,80									

Tableau III.12 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y relation selon (la rugosité 8 mm)

Rugosité 8 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %
6,48	6,44	0,69	6,24	6,19	0,79	7,36	7,44	-1,09	6,60	6,85	-3,74
6,68	6,60	1,20	6,44	6,60	-2,47	7,95	8,05	-1,22	7,20	7,44	-3,33
6,88	6,85	0,45	7,32	7,27	0,68	8,78	8,76	0,22	7,60	7,87	-3,59
7,28	7,10	2,46	7,88	7,87	0,07	8,92	9,22	-3,38	8,32	8,31	0,07
7,52	7,44	1,04	9,04	9,04	0,01	9,82	9,78	0,44	4,00	4,35	-8,63
7,80	7,70	1,27	9,48	9,50	-0,22	4,42	4,71	-6,54	4,50	4,59	-1,92
8,64	8,59	0,63	10,04	10,16	-1,20	4,85	5,02	-3,43	3,29	3,50	-6,39
8,96	8,86	1,15	10,84	10,93	-0,84	5,45	5,66	-3,79	3,49	3,69	-5,81
9,32	9,32	0,05	5,00	5,21	-4,19	5,69	5,99	-5,33	3,86	3,98	-3,26
9,88	9,88	0,04	5,17	5,34	-3,30	6,55	6,67	-1,74	4,14	4,23	-2,21
10,48	10,54	-0,61	5,63	5,73	-1,64	6,99	7,23	-3,44	4,43	4,49	-1,41
11,04	11,23	-1,69	5,77	5,99	-3,88	7,42	7,73	-4,15	4,91	5,02	-2,13
6,37	6,46	-1,51	6,03	6,12	-1,50	7,75	8,02	-3,44	5,29	5,29	-0,09
6,50	6,67	-2,59	6,40	6,53	-2,04	8,33	8,61	-3,37	6,11	6,13	-0,29
6,83	6,88	-0,63	6,73	6,88	-2,12	6,59	6,42	2,60	3,00	3,14	-4,62
7,50	7,59	-1,14	6,90	7,02	-1,68	6,97	6,96	0,15	3,08	3,30	-7,35
7,90	7,95	-0,61	7,57	7,58	-0,24	3,22	3,38	-4,99	3,40	3,47	-1,94
8,27	8,32	-0,60	7,77	7,73	0,49	3,45	3,59	-4,19	3,40	3,68	-8,12
8,60	8,62	-0,18	8,43	8,46	-0,37	3,63	3,76	-3,76	3,63	3,85	-6,12
9,03	9,22	-2,10	8,73	8,84	-1,23	3,85	3,93	-2,17	4,25	4,47	-5,07
4,54	4,65	-2,33	4,09	4,03	1,27	4,18	4,11	1,59	4,58	4,69	-2,59
4,69	4,75	-1,46	4,37	4,24	3,11	4,37	4,33	0,79	5,25	5,40	-2,86
4,94	4,81	2,75	4,74	4,60	3,10	4,64	4,56	1,80	5,70	5,74	-0,72
5,06	4,91	2,84	4,94	4,75	3,83	5,12	5,02	1,86			
5,14	4,97	3,42	4,94	4,91	0,61	5,39	5,40	-0,20			
5,83	5,68	2,55	5,46	5,40	1,02	5,77	5,69	1,25			
6,09	5,91	2,96	7,34	7,20	1,99	6,07	5,89	2,88			
7,40	7,26	1,91	3,68	3,55	3,40						
8,17	7,94	2,86	3,73	3,80	-2,14						
4,23	4,38	-3,58	3,85	3,89	-1,06						
4,28	4,42	-3,42	3,93	3,98	-1,34						
4,38	4,56	-4,17	4,23	4,20	0,66						
4,53	4,65	-2,74	4,45	4,38	1,67						
4,63	4,69	-1,51	4,70	4,65	1,10						
4,70	4,79	-1,85	4,90	4,83	1,37						
4,80	4,88	-1,67	5,08	5,02	1,08						
5,08	5,02	1,07	5,93	5,74	3,08						
5,33	5,26	1,26	6,48	6,50	-0,33						
5,53	5,50	0,48	6,24	6,19	0,79						
5,95	5,74	3,48									
6,23	5,99	3,76									
6,48	6,14	5,16									
6,80	6,60	2,95									

Tableau III.13 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y relation selon (la rugosité 10 mm)

Rugosité 10 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %
6,56	6,66	-1,47	6,76	6,90	-2,12	6,32	6,49	-2,73	6,80	6,90	-1,50
6,88	6,99	-1,55	6,92	7,07	-2,16	6,52	6,74	-3,33	7,52	7,57	-0,73
7,16	7,24	-1,08	7,56	7,66	-1,35	6,96	6,99	-0,36	7,84	8,01	-2,12
7,40	7,32	1,05	7,96	7,92	0,50	7,32	7,66	-4,66	8,64	8,80	-1,87
7,80	7,66	1,76	8,24	8,09	1,76	8,16	8,36	-2,42	4,33	4,63	-6,92
8,16	8,01	1,86	8,36	8,36	0,02	8,64	8,71	-0,84	4,90	5,12	-4,59
9,48	9,44	0,42	8,92	8,89	0,30	8,92	8,98	-0,70	5,17	5,38	-4,07
10,04	10,00	0,42	9,28	9,35	-0,73	9,96	10,00	-0,36	6,03	6,22	-3,15
10,68	10,66	0,18	9,96	10,00	-0,37	4,93	5,25	-6,44	7,07	7,11	-0,61
11,20	11,34	-1,23	10,76	10,95	-1,75	5,20	5,50	-5,86	7,43	7,60	-2,29
6,53	6,70	-2,51	5,47	5,70	-4,24	5,70	5,89	-3,39	3,46	3,77	-9,14
7,07	7,25	-2,62	5,83	5,89	-1,04	6,03	6,09	-0,95	3,83	4,07	-6,22
7,50	7,53	-0,46	6,13	6,09	0,68	6,50	6,56	-0,93	4,11	4,32	-4,94
8,00	7,96	0,44	6,40	6,49	-1,45	6,90	7,25	-5,08	6,57	6,61	-0,56
8,27	8,40	-1,65	6,77	6,90	-2,02	7,77	7,96	-2,53	3,33	3,62	-8,78
8,67	8,77	-1,24	7,27	7,32	-0,75	8,43	8,62	-2,26	3,73	3,87	-3,90
9,40	9,46	-0,59	7,53	7,60	-0,95	8,87	9,07	-2,33	4,03	4,17	-3,67
4,51	4,63	-2,47	8,03	8,11	-0,94	3,91	4,12	-5,18	4,23	4,48	-6,10
4,63	4,68	-1,06	8,40	8,55	-1,79	4,20	4,32	-2,80	4,65	4,75	-2,25
4,86	4,94	-1,70	8,87	8,92	-0,64	4,51	4,68	-3,60	5,13	5,17	-0,91
4,89	4,94	-1,11	9,43	9,45	-0,23	5,71	5,64	1,25	5,30	5,41	-2,05
5,06	5,05	0,22	4,23	4,22	0,27	3,38	3,62	-7,18	5,75	5,89	-2,48
5,23	5,26	-0,62	4,66	4,63	0,68	3,55	3,83	-7,83	6,80	6,90	-1,50
5,40	5,31	1,58	5,23	5,21	0,42	3,83	4,04	-5,69	7,52	7,57	-0,73
5,51	5,48	0,65	3,80	3,91	-2,99	4,10	4,26	-3,93	7,84	8,01	-2,12
4,13	4,39	-6,54	3,90	4,04	-3,66	4,33	4,48	-3,66	8,64	8,80	-1,87
4,40	4,48	-1,91	4,05	4,22	-4,13	4,45	4,66	-4,80			
5,25	5,41	-3,05	4,48	4,57	-2,20	5,08	5,03	0,85			
5,45	5,46	-0,15	4,30	4,26	0,90	5,53	5,50	0,36			
5,73	5,75	-0,40	4,70	4,80	-2,15	5,85	5,89	-0,74			
5,95	5,99	-0,72	4,93	4,94	-0,29	6,18	6,14	0,56			
6,20	6,24	-0,67	5,23	5,17	1,00	6,70	6,80	-1,48			
6,50	6,54	-0,68	5,48	5,41	1,19						
6,80	6,90	-1,52	5,90	5,89	0,10						
7,08	7,22	-2,00	6,33	6,39	-1,06						
			6,50	6,54	-0,67						
			6,75	6,90	-2,27						
			7,33	7,53	-2,85						

Tableau III.14 : Erreur relative en (%) entre Y expérimentale et Y relation selon (la rugosité 12 mm)

Rugosité 12 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %	Y_{exp}	Y_{rela}	$\Delta Y/Y$ %
6,20	6,47	-4,31	5,80	5,99	-3,31	6,72	7,04	-4,69	6,60	6,79	-2,86
6,52	6,63	-1,66	6,32	6,63	-4,87	7,08	7,20	-1,71	7,00	7,20	-2,86
6,88	6,87	0,11	6,56	6,79	-3,51	7,44	7,62	-2,43	7,40	7,62	-2,97
7,16	7,20	-0,59	6,84	7,12	-4,08	8,08	8,05	0,40	7,88	8,05	-2,12
7,40	7,37	0,42	7,12	7,20	-1,15	8,44	8,48	-0,51	4,33	4,62	-6,55
7,88	7,71	2,20	7,52	7,62	-1,34	9,80	9,83	-0,33	4,67	4,98	-6,71
8,24	8,22	0,22	8,16	8,05	1,37	4,30	4,56	-6,00	5,23	5,29	-1,06
8,60	8,48	1,35	8,64	8,48	1,81	4,80	5,17	-7,60	5,67	5,73	-1,16
9,08	8,93	1,69	8,96	8,93	0,38	5,13	5,48	-6,71	6,07	6,25	-3,07
9,92	9,83	0,87	9,72	9,83	-1,17	5,53	5,80	-4,77	6,43	6,59	-2,38
10,16	10,30	-1,37	10,12	10,11	0,09	5,93	6,12	-3,18	6,67	6,99	-4,91
10,48	10,68	-1,87	4,60	4,74	-2,99	6,40	6,45	-0,83	3,46	3,66	-5,98
4,93	5,04	-2,21	5,03	5,10	-1,40	7,40	7,41	-0,13	4,06	4,20	-3,45
5,07	5,29	-4,42	5,57	5,80	-4,15	3,69	3,86	-4,60	4,54	4,55	-0,13
5,37	5,54	-3,27	5,83	6,06	-3,84	3,83	4,00	-4,50	4,86	5,01	-3,25
5,47	5,61	-2,55	6,13	6,39	-4,13	4,00	4,25	-6,18	5,31	5,55	-4,43
5,60	5,73	-2,39	6,53	6,72	-2,89	4,20	4,45	-5,90	5,54	5,71	-3,09
5,97	5,86	1,74	7,00	7,13	-1,89	4,43	4,65	-5,03	6,14	6,22	-1,18
6,23	6,12	1,77	7,40	7,41	-0,14	4,74	4,75	-0,25	2,70	2,96	-9,63
6,43	6,45	-0,32	7,83	7,83	-0,01	5,20	5,28	-1,55	2,88	3,08	-7,02
6,80	6,79	0,14	8,17	8,19	-0,32	5,60	5,77	-3,03	3,05	3,23	-6,05
7,17	7,13	0,47	8,67	8,85	-2,13	6,06	5,99	1,09	3,40	3,56	-4,64
7,47	7,48	-0,19	3,97	4,10	-3,22	6,71	6,79	-1,12	3,60	3,68	-2,27
7,87	7,83	0,41	4,14	4,25	-2,53	3,08	3,31	-7,79	3,88	3,98	-2,61
8,27	8,19	0,89	4,37	4,50	-2,92	3,33	3,56	-7,01	4,38	4,37	0,22
4,40	4,55	-3,41	4,66	4,65	0,11	3,60	3,68	-2,28	4,93	4,95	-0,49
4,49	4,60	-2,57	4,86	4,91	-1,11	3,75	3,89	-3,77			
4,60	4,76	-3,38	5,14	5,12	0,42	3,98	4,06	-2,19			
4,71	4,86	-3,07	5,40	5,39	0,21	4,33	4,32	0,07			
4,86	4,91	-1,11	5,66	5,61	0,91	4,80	4,86	-1,21			
4,97	5,02	-0,90	3,33	3,36	-0,90	5,33	5,32	0,08			
5,26	5,17	1,57	3,48	3,56	-2,40	5,68	5,70	-0,45			
7,29	7,08	2,77	3,58	3,64	-1,84	6,03	5,99	0,56			
7,71	7,56	1,98	3,60	3,72	-3,44						
3,68	3,81	-3,62	3,90	3,98	-1,97						
3,93	4,02	-2,42	4,10	4,11	-0,13						
4,05	4,19	-3,51	4,33	4,32	0,06						
4,15	4,24	-2,06	4,50	4,45	1,01						
4,25	4,32	-1,71	4,78	4,72	1,10						

III.2.2 La variation de la longueur relative du rouleau de surface « L_r/h_1 » en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal « α »

Les figures III.11 à III.14 mettent en lumière la relation étroite entre le rapport L_r/h_1 qui exprime la longueur relative du rouleau de surface par rapport le nombre de Froude F_1 , indicateur clé du régime d'écoulement, pour quatre valeurs d'inclinaison de pente caractérisées par $\tan(\alpha) =$

0% ; 0,5% ; 1% ; 1,5%. Elles illustrent l'évolution de ce rapport en fonction du nombre de Froude pour cinq valeurs de rugosité, chacune étant représentée par un nuage de points distinct.

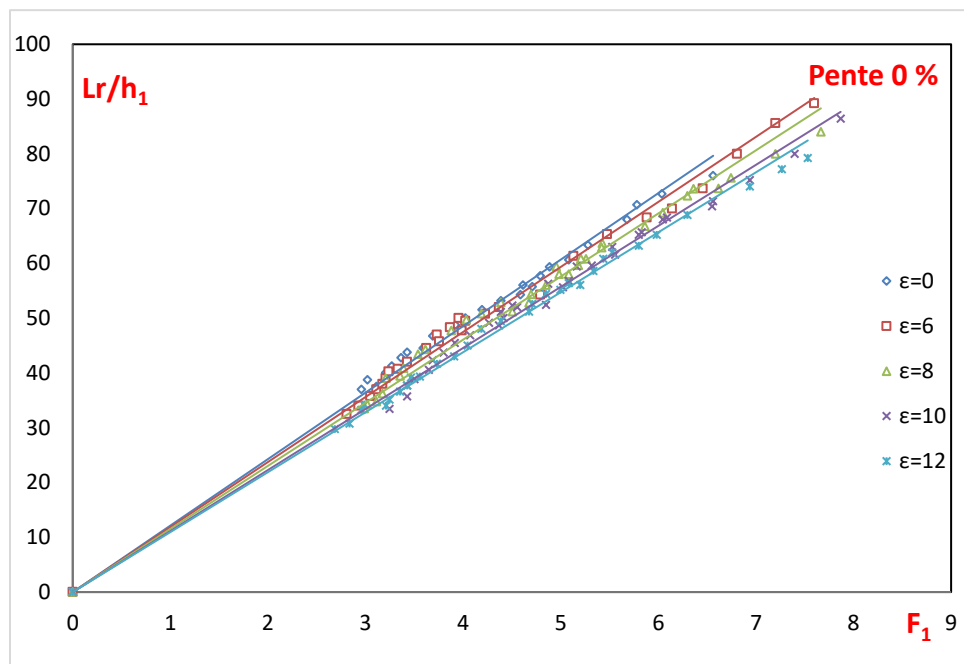


Figure III.11 : Variation de la longueur relative du rouleau en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm.

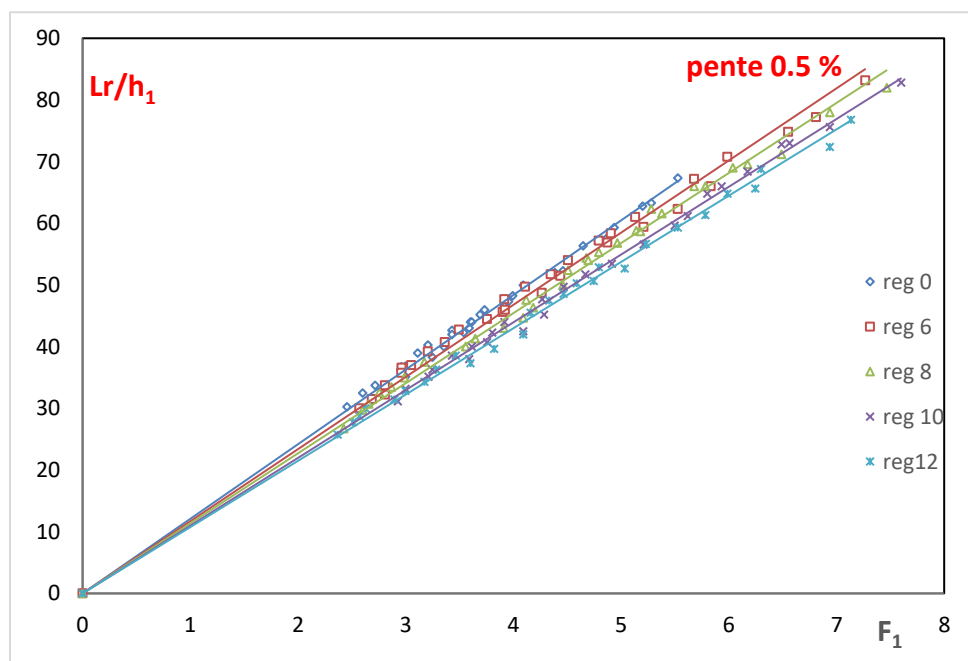


Figure III.12 : Variation de la longueur relative du rouleau en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm.

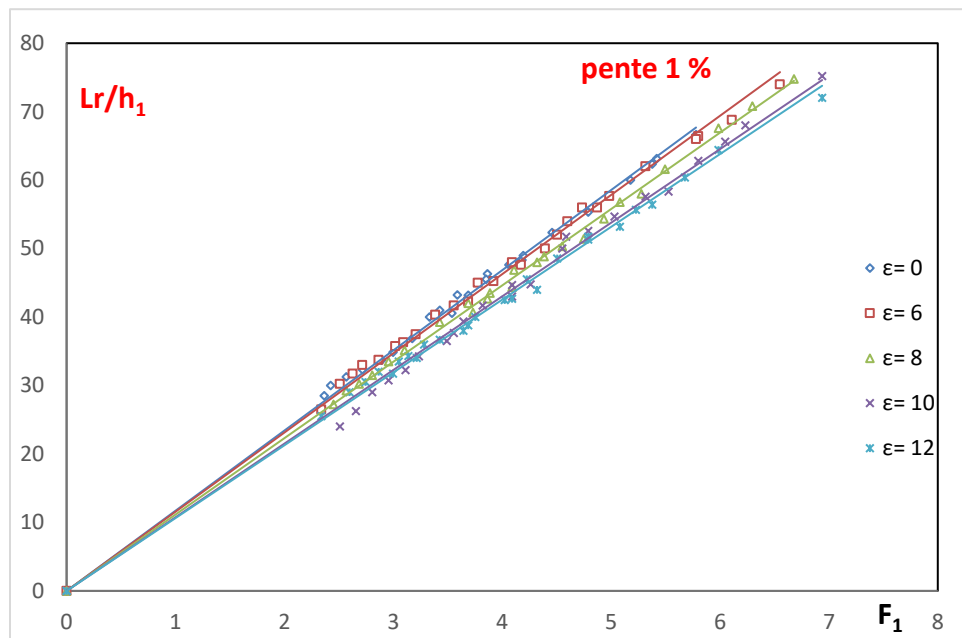


Figure III.13 : Variation de la longueur relative du rouleau en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm.

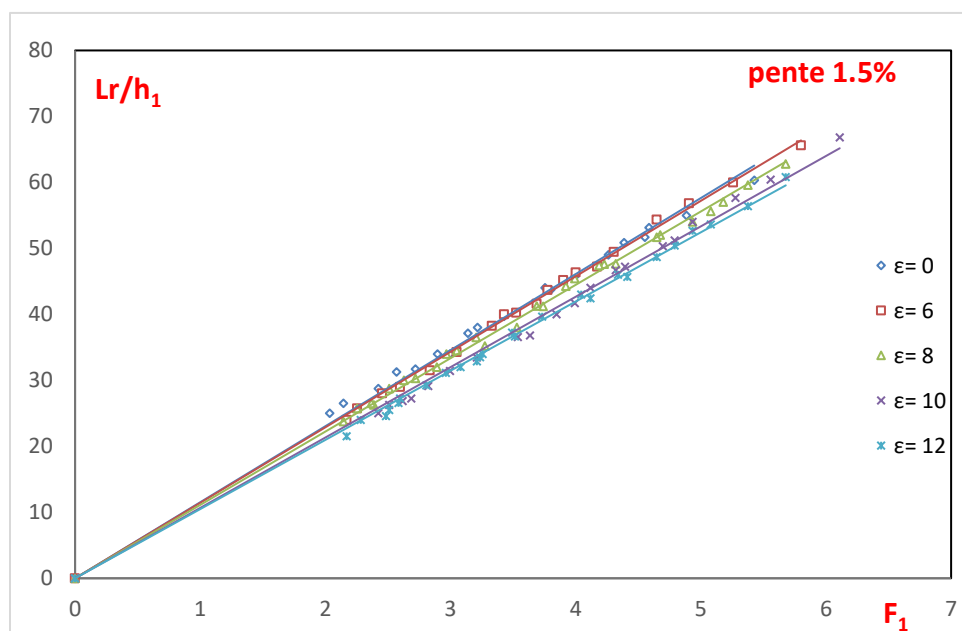


Figure III.14 : Variation de la longueur relative du rouleau en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm.

Tableau III.15 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Lr/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 0 %									
$\varepsilon = 0$ mm		$\varepsilon = 6$ mm		$\varepsilon = 8$ mm		$\varepsilon = 10$ mm		$\varepsilon = 12$ mm	
F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1
4,89	59,33	6,81	79,20	4,51	51,20	4,85	52,40	4,68	51,20
5,08	60,67	7,20	84,80	4,68	52,80	5,02	55,60	4,85	54,40
5,28	63,33	7,60	88,40	4,85	56,00	5,08	56,80	5,08	56,40
5,68	68,00	3,73	45,00	5,08	58,00	5,32	59,60	5,20	56,00
5,78	70,67	3,87	46,33	5,26	60,80	5,56	61,60	5,44	60,80
6,04	72,67	3,96	48,00	5,86	66,80	5,80	65,20	5,80	63,20
6,56	76,00	5,13	59,00	6,05	69,20	6,05	68,00	5,99	65,20
4,39	53,14	5,48	64,33	6,36	73,60	6,55	70,40	6,30	68,80
4,59	54,29	5,88	67,67	6,74	75,60	6,94	75,20	6,94	74,00
4,71	55,71	6,14	69,33	7,20	80,00	7,40	80,00	7,27	77,20
2,96	37,00	6,46	72,67	7,67	84,00	7,87	86,40	7,53	79,20
3,02	38,75	2,81	32,00	4,70	54,33	4,37	48,67	3,56	39,33
3,11	37,50	2,93	33,50	4,98	58,00	4,41	50,00	3,73	41,67
3,21	39,00	3,05	35,25	5,18	59,67	4,55	52,00	3,91	43,00
3,21	40,00	3,11	36,50	5,43	63,33	5,53	63,00	4,05	45,00
3,27	41,25	3,17	37,50	6,30	72,33	5,83	65,67	5,53	62,00
3,36	42,75	3,21	38,50	6,62	73,67	6,09	68,33	3,21	34,00
3,43	43,75	3,24	38,75	3,36	36,00	6,56	71,33	3,25	35,14
3,59	44,50	3,33	40,25	3,39	37,43	3,25	33,43	3,36	36,57
3,69	46,75	3,43	41,50	3,54	40,00	3,43	35,71	3,43	37,71
3,92	48,75	3,62	43,00	3,61	40,86	3,43	37,71	3,46	39,14
4,02	50,00	3,75	45,00	3,88	44,29	3,50	38,86	4,19	48,00
4,19	51,50	3,99	47,25	4,03	46,29	3,65	40,57	4,39	49,43
4,61	56,00	4,02	48,00	4,19	47,43	3,69	42,29	4,71	52,57
4,79	57,75	4,23	49,50	4,39	49,43	3,80	43,71	5,00	55,14
		4,37	51,50	4,96	56,00	3,92	45,43	5,33	58,57
		4,79	53,75	5,21	57,43	4,07	46,86	2,69	29,75
				5,42	59,43	4,27	49,14	2,84	30,75
				2,99	33,50	4,39	51,14	2,96	33,25
				3,02	34,25	4,51	52,29	2,99	34,25
				3,11	34,75	4,87	56,29		
				3,17	36,25	5,17	59,43		
				3,21	37,50				

Tableau III.16 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Lr/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 0,5 %									
$\varepsilon = 0$ mm		$\varepsilon = 6$ mm		$\varepsilon = 8$ mm		$\varepsilon = 10$ mm		$\varepsilon = 12$ mm	
F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1
3,69	43,20	3,90	44,80	4,12	46,80	4,28	45,20	5,99	66,00
5,20	62,00	4,79	56,40	4,51	51,60	5,50	59,60	6,30	69,60
3,43	42,00	4,91	57,60	4,68	53,60	5,62	61,20	6,94	75,20
3,60	44,00	5,68	65,20	4,96	56,00	5,80	64,80	7,13	78,00
3,73	45,33	5,99	69,20	5,14	58,00	6,17	68,40	3,60	38,33
3,96	47,33	6,55	74,00	5,38	60,00	6,49	72,80	3,82	40,00
4,09	50,00	6,81	76,40	5,68	65,20	6,94	75,60	4,09	43,33
4,46	52,33	7,27	82,40	6,17	68,80	7,60	82,80	4,74	51,33
4,65	56,33	5,13	59,33	6,49	71,20	5,93	66,00	5,03	53,33
4,94	59,33	5,53	61,33	6,94	77,20	6,56	73,00	5,23	56,67
5,28	63,33	5,83	64,00	7,47	81,20	2,93	31,14	5,53	59,67
5,53	66,67	2,96	34,86	3,56	39,33	3,00	33,14	5,78	61,33

3,00	35,14	3,92	46,00	3,64	40,67	3,21	35,14	6,25	66,67
3,00	36,86	4,11	48,00	3,91	42,33	3,25	36,29	2,89	32,29
3,25	38,29	4,35	50,00	4,09	44,00	3,43	38,57	3,00	32,86
3,36	40,00	4,51	52,29	4,18	45,67	3,61	40,00	3,17	34,29
3,54	42,29	4,87	55,14	4,46	49,33	3,80	42,29	3,28	36,29
3,61	44,00	5,21	57,71	4,70	53,33	3,92	44,00	3,46	38,57
3,92	46,00	2,57	28,00	4,79	54,67	4,27	47,71	4,47	48,57
3,99	48,29	2,69	29,50	5,18	58,00	4,47	49,71	4,59	50,29
4,39	52,00	2,81	30,25	5,28	61,67	4,67	51,71	4,79	52,86
4,87	57,71	2,96	31,75	5,78	65,33	4,91	53,43	2,37	25,75
2,45	29,75	3,05	33,75	6,04	68,33	5,21	56,57	2,51	28,00
2,60	32,00	3,21	35,00	2,75	32,00	3,59	38,00	2,57	28,75
2,72	33,25	3,36	37,25	2,42	26,50	3,75	40,75	2,63	30,00
2,96	36,25	3,49	38,75	2,60	29,25	4,09	42,50	4,16	45,50
3,11	37,50	3,75	40,75	2,66	30,50			4,33	47,50
3,21	38,75	3,92	42,50	2,87	33,00				
3,43	41,50	4,26	44,00	2,99	34,50				
3,59	42,50	4,44	46,75	3,17	37,00				

Tableau III.17 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Lr/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 1 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1
3,69	43,20	4,17	46,00	5,08	56,00	5,32	57,60	3,69	38,80
4,06	47,60	4,39	48,80	5,50	61,20	5,80	62,80	5,08	53,20
3,43	41,00	4,51	50,40	5,99	67,20	6,05	65,60	5,38	56,40
3,87	46,33	4,73	54,40	6,30	70,40	6,24	68,00	5,68	60,40
4,18	48,33	5,32	60,40	6,68	74,40	6,94	75,20	5,99	64,40
4,46	52,33	5,80	64,80	3,73	40,00	3,56	37,67	6,94	72,00
4,79	55,33	6,11	67,20	3,87	42,33	3,64	39,33	3,22	34,00
5,18	60,00	6,55	72,40	4,09	44,00	3,82	41,67	3,43	36,67
5,38	62,33	3,09	35,00	4,32	47,67	4,09	44,67	3,64	38,00
5,78	66,67	3,39	39,00	4,55	50,00	4,55	50,00	4,09	42,67
2,72	32,29	3,56	40,33	4,94	54,00	5,03	54,67	4,32	44,00
2,89	33,71	3,78	43,67	5,28	57,67	5,53	58,33	4,79	51,33
3,00	34,86	4,09	46,67	3,10	34,86	4,59	51,71	5,23	55,67
3,17	36,86	4,60	52,67	4,11	46,57	4,79	52,57	3,00	31,71
3,54	40,57	4,98	56,33	4,39	48,57	2,51	24,00	3,14	34,29
5,42	63,14	5,78	64,67	4,75	50,29	2,66	26,25	3,28	36,00
2,37	28,50	4,87	54,86	2,45	26,25	2,81	29,00	4,51	48,57
2,42	30,00	2,34	25,50	2,57	28,75	2,96	30,75	4,79	51,71
2,57	31,25	2,51	29,25	2,69	30,00	3,11	32,25	2,34	25,50
3,33	40,00	2,63	30,75	2,81	31,00	3,24	34,25	2,60	29,00
3,59	43,25	2,72	32,00	2,96	32,50	3,49	36,50	2,75	30,50
3,85	45,50	2,87	32,75	3,43	39,00	4,09	43,00	2,87	32,00
4,19	49,00	3,02	34,75	3,69	41,75	4,26	44,75	3,05	33,50
		3,21	36,50	3,89	43,25			3,75	40,00
		3,69	41,25					4,02	42,50
		3,92	44,25					4,23	45,50

Tableau III.18 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de Lr/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 1,5 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1	F_1	Lr/h_1
3,22	38,00	3,43	37,60	3,28	36,00	3,64	36,80	4,12	42,40
3,43	40,00	3,69	40,00	3,53	38,00	3,85	40,00	4,34	46,00
4,18	47,33	3,90	43,60	3,74	42,00	4,12	44,00	4,79	50,40
4,55	51,67	4,17	45,60	4,23	46,40	4,39	47,20	5,08	53,60
4,89	55,00	4,91	55,20	4,68	50,80	4,79	51,20	5,38	56,40
5,43	60,33	5,26	58,40	5,08	54,40	5,56	60,40	5,68	60,80
2,72	31,71	5,80	64,00	5,38	58,40	6,11	66,80	3,26	34,00
3,00	34,00	3,78	42,33	5,68	61,60	4,32	46,67	3,51	36,67
3,14	37,14	4,00	45,00	2,97	33,00	4,70	50,33	3,73	39,67
3,43	39,71	4,65	53,00	4,32	46,67	4,94	54,00	4,05	43,00
3,80	43,71	4,31	48,29	4,65	50,67	5,28	57,67	4,41	45,67
3,99	45,71	2,17	23,75	4,94	53,00	2,62	26,86	4,65	48,67
4,39	50,86	2,25	25,00	5,18	56,00	2,82	29,14	4,94	52,67
4,59	53,14	2,45	27,50	2,39	25,43	3,00	31,43	2,49	24,57
2,03	25,00	2,60	29,50	2,72	29,43	3,21	33,43	2,59	26,57
2,14	26,50	2,84	30,75	2,89	31,14	3,54	36,57	2,96	31,14
2,42	28,75	3,05	33,25	3,99	44,57	3,99	41,71	3,21	32,86
2,57	31,25	3,33	37,25	4,19	46,57	2,42	25,00	2,17	21,50
2,90	34,00	3,53	39,25	2,14	23,00	2,51	26,25	2,28	24,00
3,75	44,00			2,25	25,00	2,69	27,25	2,51	25,50
4,26	49,00			2,37	25,75			2,60	27,25
				2,51	28,00			2,81	29,25
				2,63	29,25			3,08	32,00
				3,05	33,75			3,24	33,50
				3,21	35,75			3,49	37,25
				3,69	40,50				
				3,92	43,50				

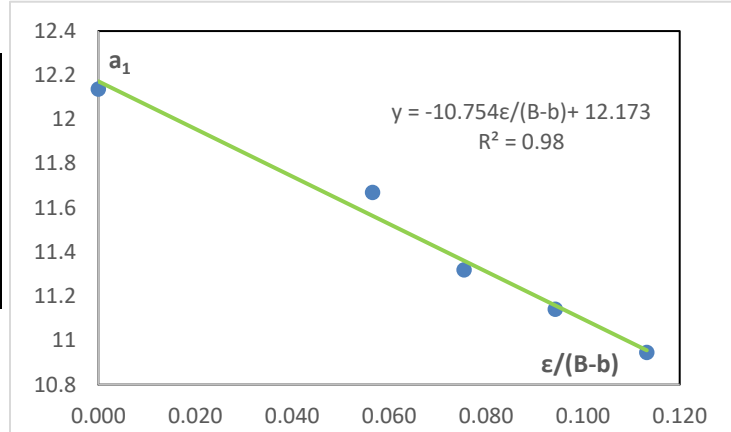
Les données expérimentales du ressaut hydraulique sur lit majeur rugueux se répartissent en cinq nuages de points distincts, chacun correspondant à une rugosité constante du lit majeur. pour chaque valeur de rugosité absolue ε , les points expérimentaux s'alignent selon une relation linéaire de la forme $Lr/h_1 = a \cdot F_1$, où Lr/h_1 représente la longueur relative du rouleau, et F_1 le nombre de Froude amont. Cette linéarité suggère une dépendance directe entre l'intensité du ressaut et la dynamique de l'écoulement, modulée par la rugosité du lit.

L'analyse révèle que, pour une rugosité donnée, la longueur relative du rouleau Lr/h_1 augmente avec le nombre de Froude F_1 . Et l'augmentation de cette rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$ entraîne une diminution du rapport Lr/h_1 .

Les résultats de cette corrélation sont récapitulés dans les tableaux III.19 – III-22

Tableau III.19 : Facteur a_1 de corrélations

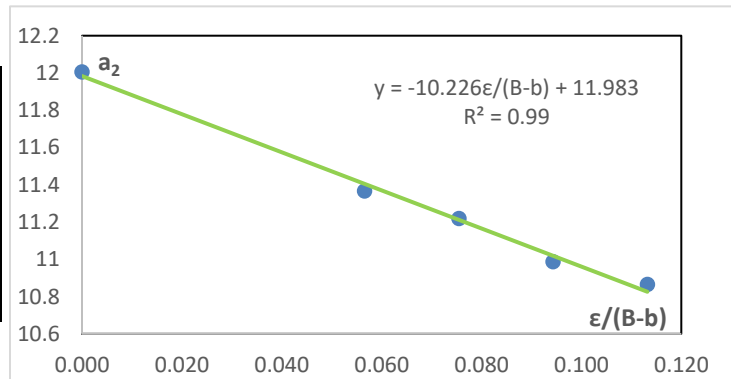
Pente 0 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_1	R^2
0,000	12,137	0,9994
0,057	11,669	0,9994
0,075	11,319	0,999
0,094	11,141	0,9993
0,113	10,945	0,9995

**Figure III.15: Corrélation du facteur a_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$**

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, a_1) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_1 = -10,754(\varepsilon/(B-b)) + 12,173$

Tableau III.20 : Facteur a_2 de corrélations

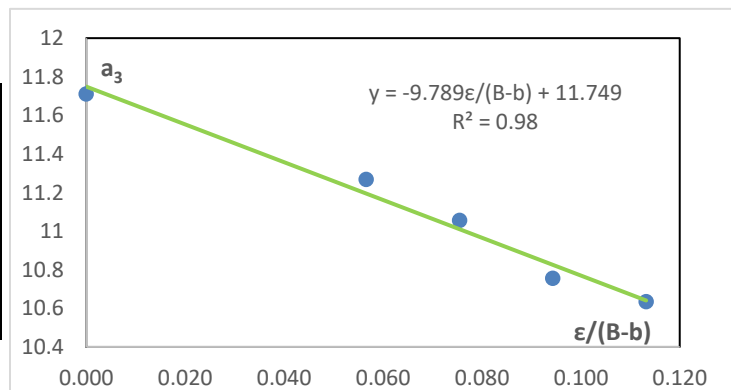
Pente 0,5 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_2	R^2
0,000	12,005	0,9997
0,057	11,367	0,9994
0,075	11,219	0,9995
0,094	10,987	0,9997
0,113	10,866	0,9995

**Figure III.16: Corrélation du facteur a_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$**

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, a_2) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_2 = -10,226(\varepsilon/(B-b)) + 11,983$

Tableau III.21 : Facteur a_3 de corrélations

Pente 1 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_3	R^2
0,000	11,710	0,9997
0,057	11,267	0,9996
0,075	11,055	0,9998
0,094	10,755	0,9994
0,113	10,634	0,9996

**Figure III.17: Corrélation du facteur a_3 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$**

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\epsilon/(B-b)$, a_3) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_3 = -9,789(\epsilon/(B-b)) + 11,749$

Tableau III.22 : Facteur a_4 de corrélations

Pente 1,5 %		
$\epsilon/(B-b)$	a_4	R^2
0,000	11,525	0,9995
0,057	11,122	0,9998
0,075	10,917	0,9998
0,094	10,667	0,9994
0,113	10,487	0,9997

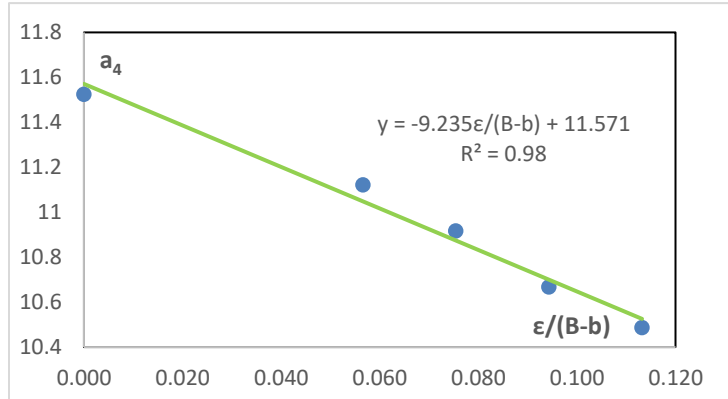


Figure III.18: Corrélation du facteur a_4 avec le rapport $\epsilon/(B-b)$

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\epsilon/(B-b)$, a_4) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_4 = -9,2345(\epsilon/(B-b)) + 11,571$

Remplaçant les paramètres a par leurs expressions respectives dans la relation $Lr/h_1 = a F_1$, on obtient ce qui suit :

$$Lr/h_1 = (-10,754\epsilon/(B-b) + 12,173)F_1 \quad ; \quad \tan \alpha = 0\% \quad (3.8)$$

$$Lr/h_1 = (-10,226\epsilon/(B-b) + 11,983)F_1 \quad ; \quad \tan \alpha = 0,5\% \quad (3.9)$$

$$Lr/h_1 = (-9,789\epsilon/(B-b) + 11,749)F_1 \quad ; \quad \tan \alpha = 1\% \quad (3.10)$$

$$Lr/h_1 = (-9,235\epsilon/(B-b) + 11,571)F_1 \quad ; \quad \tan \alpha = 1,5\% \quad (3.11)$$

Le tableau ci-dessous représente les valeurs de a' et b' du coefficient de rugosité avec l'angle d'inclinaison du canal.

Tableau III.23 : Valeurs a' et b' du coefficient de rugosité corrélées

à l'angle d'inclinaison du canal.

$\epsilon/(B-b)$	0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12		
$\tan(\alpha)$	a'	b'	R^2
0 %	-10,754	12,173	0,98
0,5 %	-10,226	11,983	0,99
1 %	-9,789	11,749	0,98
1,5 %	-9,235	11,571	0,98

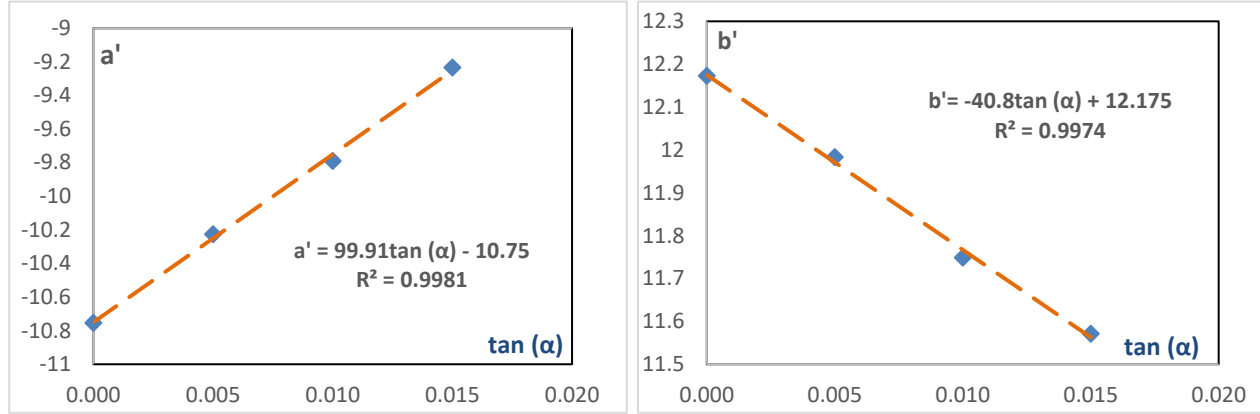


Figure III.19 : Variation des facteur a' et b' en fonction de $\tan(\alpha)$

$$a' = 99,91 \tan(\alpha) - 10,75 \quad R^2 = 0,99 \quad (3.12)$$

$$b' = -40,8 \tan(\alpha) + 12,175 \quad R^2 = 0,99 \quad (3.13)$$

Il serait pratique de reformuler les quatre relations en une équation globale sous la forme suivante :

$$Lr/h_1 = [(99,91(\tan(\alpha)) - 10,75)\varepsilon/(B - b) - 40,8(\tan(\alpha)) + 12,175]F_1 \quad (3.14)$$

$$2,03 \leq F_1 \leq 7,87 \quad 0,000 \leq \frac{\varepsilon}{B - b} \leq 0,113 \quad 0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,015$$

La validité de la comparaison entre l'approche globale adimensionnelle Lr/h_{relation} et les valeurs expérimentales Lr/h_{exp} est illustrée par la Figure III.20. L'alignement satisfaisant des données sur la première bissectrice confirme la convenance de cette modélisation fonctionnelle.

Par ailleurs, les erreurs relatives observées, en majorité inférieures à 5 %, traduisent une précision satisfaisante des calculs tout en facilitant l'exploitation des résultats. Le coefficient de corrélation principalement élevé ($R^2 = 0,9985$) atteste d'une forte concordance entre le modèle et les données expérimentales. La précision du modèle est également mise en évidence par une faible erreur absolue moyenne (MAE = 0,83). Enfin, sa cohérence et sa crédibilité sont confirmées par la faiblesse de l'erreur relative moyenne (MRE = 0,019) ainsi que par la faible dispersion de cette dernière, caractérisée par son écart-type ($\sigma_{RE} = 0,065$).

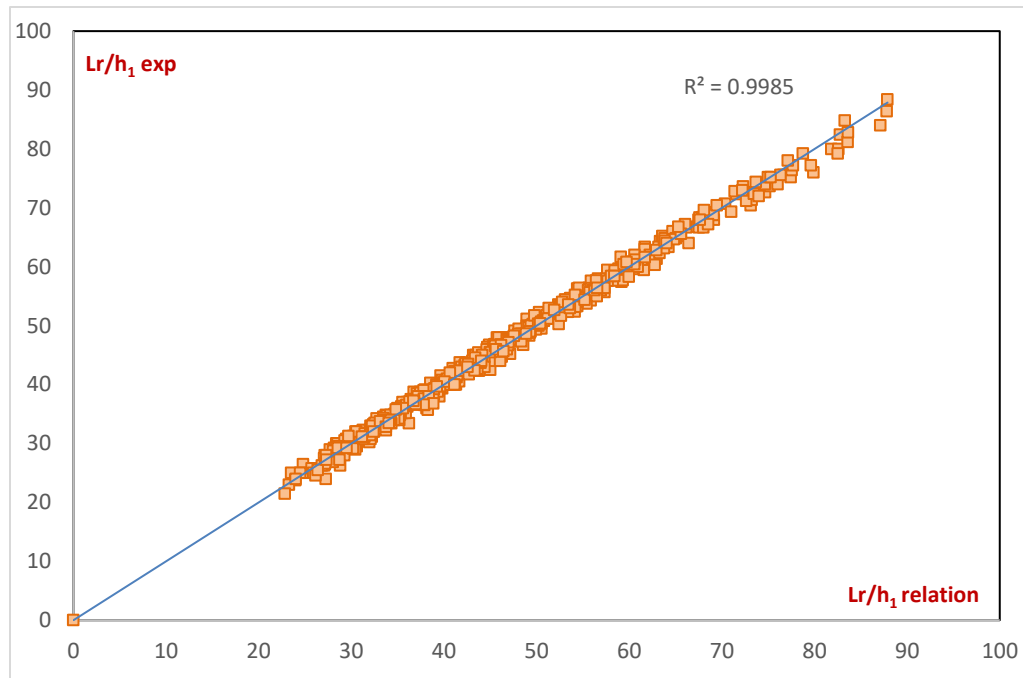


Figure III.20 : Comparaison entre Lr/h_1 expérimentale et l'approche globale $f(\tan(\alpha), \varepsilon/(B-b), F_1)$

Tableau III.24 : Erreur relative en (%) entre Lr/h_1 expérimentale et Lr/h_1 relation selon (la rugosité 0 mm)

Rugosité 0 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$
59,33	59,50	-0,28	43,20	44,16	-2,21	43,20	43,40	-0,47	38,00	37,19	2,13
60,67	61,87	-1,98	62,00	62,24	-0,38	47,60	47,81	-0,45	40,00	39,64	0,90
63,33	64,26	-1,46	42,00	41,04	2,29	41,00	40,34	1,61	47,33	48,36	-2,16
68,00	69,14	-1,68	44,00	43,11	2,03	46,33	45,49	1,83	51,67	52,65	-1,91
70,67	70,38	0,41	45,33	44,68	1,44	48,33	49,21	-1,81	55,00	56,51	-2,75
72,67	73,51	-1,15	47,33	47,35	-0,03	52,33	52,48	-0,27	60,33	62,75	-4,01
76,00	79,90	-5,13	50,00	48,97	2,06	55,33	56,38	-1,88	31,71	31,46	0,81
53,14	53,40	-0,49	52,33	53,39	-2,01	60,00	60,95	-1,58	34,00	34,65	-1,92
54,29	55,85	-2,88	56,33	55,64	1,23	62,33	63,28	-1,51	37,14	36,29	2,29
55,71	57,33	-2,91	59,33	59,08	0,42	66,67	68,02	-2,03	39,71	39,64	0,19
37,00	36,01	2,68	63,33	63,18	0,24	32,29	32,01	0,85	43,71	43,96	-0,57
38,75	36,76	5,15	66,67	66,17	0,75	33,71	34,03	-0,95	45,71	46,18	-1,02
37,50	37,89	-1,03	35,14	35,88	-2,09	34,86	35,27	-1,17	50,86	50,72	0,27
39,00	39,03	-0,08	36,86	35,88	2,66	36,86	37,35	-1,34	53,14	53,04	0,19
40,00	39,03	2,43	38,29	38,86	-1,50	40,57	41,64	-2,64	25,00	23,53	5,89
41,25	39,80	3,52	40,00	40,16	-0,41	63,14	63,78	-1,01	26,50	24,79	6,46
42,75	40,96	4,19	42,29	42,37	-0,19	28,50	27,86	2,26	28,75	28,03	2,50
43,75	41,74	4,60	44,00	43,26	1,69	30,00	28,53	4,91	31,25	29,70	4,95
44,50	43,71	1,78	46,00	46,89	-1,93	31,25	30,23	3,27	34,00	33,49	1,49
46,75	44,91	3,94	48,29	47,81	0,99	40,00	39,21	1,97	44,00	43,41	1,33
48,75	47,74	2,07	52,00	52,51	-0,98	43,25	42,25	2,32	49,00	49,28	-0,58
50,00	48,98	2,05	57,71	58,34	-1,08	45,50	45,35	0,32			

51,50	51,05	0,87	29,75	29,37	1,29	49,00	49,34	-0,70			
56,00	56,16	-0,28	32,00	31,10	2,80						
57,75	58,33	-1,01	33,25	32,52	2,21						
			36,25	35,41	2,33						
			37,50	37,25	0,66						
			38,75	38,38	0,97						
			41,50	41,04	1,11						
			42,50	42,98	-1,12						

Tableau III.25 : Erreur relative en (%) entre Lr/h_1 expérimentale et Lr/h_1 relation selon (la rugosité 6 mm)

Rugosité 6 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$
79,20	78,75	0,57	44,80	44,44	0,81	46,00	46,80	-1,73	37,60	37,85	-0,65
84,80	83,28	1,79	56,40	54,57	3,24	48,80	49,28	-0,99	40,00	40,72	-1,80
88,40	87,89	0,58	57,60	55,89	2,97	50,40	50,54	-0,28	43,60	43,07	1,22
45,00	43,17	4,06	65,20	64,69	0,79	54,40	53,09	2,41	45,60	46,06	-1,02
46,33	44,71	3,50	69,20	68,18	1,47	60,40	59,64	1,26	55,20	54,16	1,88
48,00	45,75	4,69	74,00	74,63	-0,85	64,80	65,06	-0,40	58,40	58,05	0,60
59,00	59,34	-0,58	76,40	77,55	-1,51	67,20	68,52	-1,97	64,00	64,04	-0,06
64,33	63,35	1,52	82,40	82,76	-0,44	72,40	73,48	-1,49	42,33	41,69	1,52
67,67	68,04	-0,56	59,33	58,44	1,51	35,00	34,67	0,95	45,00	44,16	1,87
69,33	71,03	-2,45	61,33	62,96	-2,65	39,00	37,97	2,65	53,00	51,31	3,19
72,67	74,67	-2,76	64,00	66,43	-3,79	40,33	39,90	1,08	48,29	47,54	1,54
32,00	32,45	-1,42	34,86	33,74	3,21	43,67	42,36	3,00	23,75	23,97	-0,92
33,50	33,86	-1,06	46,00	44,61	3,01	46,67	45,88	1,69	25,00	24,89	0,44
35,25	35,28	-0,07	48,00	46,82	2,46	52,67	51,60	2,03	27,50	27,08	1,53
36,50	35,99	1,39	50,00	49,51	0,98	56,33	55,90	0,78	29,50	28,68	2,77
37,50	36,72	2,09	52,29	51,33	1,82	64,67	64,83	-0,25	30,75	31,31	-1,82
38,50	37,08	3,69	55,14	55,51	-0,67	54,86	54,66	0,37	33,25	33,67	-1,26
38,75	37,44	3,37	57,71	59,32	-2,78	25,50	26,23	-2,87	37,25	36,79	1,25
40,25	38,54	4,24	28,00	29,26	-4,51	29,25	28,16	3,73	39,25	38,91	0,85
41,50	39,65	4,45	29,50	30,60	-3,74	30,75	29,47	4,17			
43,00	41,90	2,55	30,25	31,96	-5,66	32,00	30,46	4,80			
45,00	43,43	3,50	31,75	31,96	-0,67	32,75	32,15	1,85			
47,25	46,14	2,36	33,75	33,69	0,18	34,75	33,86	2,57			
48,00	46,53	3,07	35,00	34,74	0,74	36,50	35,95	1,50			
49,50	48,90	1,21	37,25	36,52	1,97	41,25	41,37	-0,28			
51,50	50,50	1,93	38,75	38,32	1,11	44,25	43,98	0,61			
53,75	55,42	-3,10	40,75	39,78	2,37						
			42,50	42,77	-0,63						
			44,00	44,67	-1,52						
			46,75	48,55	-3,85						
			49,50	50,53	-2,09						

Tableau III.26 : Erreur relative en (%) entre Lr/h_1 expérimentale et Lr/h_1 relation selon (la rugosité 8 mm)

Rugosité 8 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$
51,20	51,21	-0,02	46,80	46,11	1,47	56,00	56,05	-0,09	36,00	35,58	1,16
52,80	53,14	-0,65	51,60	50,46	2,21	61,20	60,64	0,91	38,00	38,37	-0,97
56,00	55,10	1,61	53,60	52,36	2,30	67,20	66,03	1,74	42,00	40,65	3,22
58,00	57,74	0,44	56,00	55,59	0,73	70,40	69,47	1,32	46,40	45,93	1,00
60,80	59,75	1,72	58,00	57,56	0,77	74,40	73,68	0,96	50,80	50,81	-0,02
66,80	66,62	0,27	60,00	60,21	-0,35	40,00	41,17	-2,93	54,40	55,21	-1,49
69,20	68,72	0,69	65,20	63,59	2,47	42,33	42,64	-0,73	58,40	58,42	-0,04
73,60	72,29	1,79	68,80	69,12	-0,46	44,00	45,12	-2,56	61,60	61,70	-0,16
75,60	76,64	-1,37	71,20	72,65	-2,03	47,67	47,65	0,03	33,00	32,24	2,29
80,00	81,82	-2,27	77,20	77,69	-0,63	50,00	50,23	-0,46	46,67	46,94	-0,58
84,00	87,11	-3,71	81,20	83,59	-2,94	54,00	54,44	-0,82	50,67	50,50	0,33
54,33	53,36	1,79	39,33	39,84	-1,28	57,67	58,22	-0,96	53,00	53,62	-1,18
58,00	56,64	2,35	40,67	40,81	-0,35	34,86	34,23	1,80	56,00	56,27	-0,49
59,67	58,86	1,36	42,33	43,78	-3,43	46,57	45,34	2,64	25,43	25,94	-2,01
63,33	61,67	2,62	44,00	45,80	-4,10	48,57	48,39	0,38	29,43	29,56	-0,44
72,33	71,57	1,06	45,67	46,83	-2,54	50,29	52,40	-4,20	31,14	31,42	-0,90
73,67	75,18	-2,05	49,33	49,94	-1,22	26,25	27,06	-3,08	44,57	43,39	2,65
36,00	38,13	-5,90	53,33	52,58	1,42	28,75	28,34	1,43	46,57	45,51	2,29
37,43	38,54	-2,97	54,67	53,65	1,86	30,00	29,64	1,21	23,00	23,29	-1,26
40,00	40,22	-0,54	58,00	58,00	0,01	31,00	30,95	0,15	25,00	24,50	2,02
40,86	41,06	-0,50	61,67	59,10	4,16	32,50	32,63	-0,39	25,75	25,72	0,12
44,29	44,07	0,48	65,33	64,73	0,93	39,00	37,82	3,03	28,00	27,28	2,58
46,29	45,82	1,00	68,33	67,60	1,07	41,75	40,69	2,54	29,25	28,55	2,40
47,43	47,60	-0,35	32,00	30,84	3,61	43,25	42,89	0,84	33,75	33,14	1,82
49,43	49,84	-0,84	26,50	27,15	-2,44				35,75	34,83	2,58
56,00	56,32	-0,57	29,25	29,09	0,54				40,50	40,07	1,05
57,43	59,18	-3,04	30,50	29,75	2,46				43,50	42,61	2,06
59,43	61,59	-3,64	33,00	32,09	2,74						
33,50	33,96	-1,37	34,50	33,46	3,01						
34,25	34,31	-0,17	37,00	35,54	3,93						
34,75	35,36	-1,76									
36,25	36,07	0,49									
37,50	36,43	2,86									

Tableau III.27 : Erreur relative en (%) entre Lr/h_1 expérimentale et Lr/h_1 relation selon (la rugosité 10 mm)

Rugosité 10 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$
52,40	54,12	-3,27	45,20	47,13	-4,27	57,60	57,68	-0,14	36,80	38,87	-5,62
55,60	56,06	-0,83	59,60	60,49	-1,50	62,80	62,92	-0,20	40,00	41,13	-2,83
56,80	56,71	0,15	61,20	61,82	-1,02	65,60	65,60	0,00	44,00	44,02	-0,05
59,60	59,35	0,42	64,80	63,83	1,49	68,00	67,63	0,54	47,20	46,98	0,47
61,60	62,03	-0,69	68,40	67,92	0,70	75,20	75,26	-0,08	51,20	51,22	-0,03

65,20	64,74	0,70	72,80	71,39	1,93	37,67	38,59	-2,45	60,40	59,41	1,64
68,00	67,50	0,74	75,60	76,35	-0,99	39,33	39,53	-0,51	66,80	65,32	2,22
70,40	73,12	-3,87	82,80	83,62	-0,99	41,67	41,45	0,53	46,67	46,18	1,04
75,20	77,44	-2,97	66,00	65,30	1,06	44,67	44,37	0,66	50,33	50,20	0,27
80,00	82,57	-3,22	73,00	72,21	1,08	50,00	49,39	1,22	54,00	52,76	2,29
86,40	87,82	-1,64	31,14	32,21	-3,42	54,67	54,59	0,14	57,67	56,42	2,16
48,67	48,73	-0,14	33,14	32,98	0,49	58,33	59,96	-2,78	26,86	28,00	-4,25
50,00	49,25	1,50	35,14	35,32	-0,52	51,71	49,76	3,78	29,14	30,18	-3,56
52,00	50,82	2,27	36,29	35,72	1,56	52,57	51,97	1,15	31,43	32,04	-1,94
63,00	61,69	2,08	38,57	37,72	2,20	24,00	27,23	-13,48	33,43	34,32	-2,66
65,67	65,09	0,88	40,00	39,76	0,59	26,25	28,82	-9,79	36,57	37,83	-3,45
68,33	67,96	0,54	42,29	41,84	1,06	29,00	30,44	-4,95	41,71	42,69	-2,35
71,33	73,24	-2,67	44,00	43,10	2,05	30,75	32,08	-4,33	25,00	25,92	-3,67
33,43	36,23	-8,38	47,71	46,96	1,59	32,25	33,75	-4,67	26,25	26,84	-2,25
35,71	38,26	-7,13	49,71	49,15	1,14	34,25	35,11	-2,52	27,25	28,72	-5,39
37,71	38,26	-1,45	51,71	51,37	0,66	36,50	37,89	-3,80			
38,86	39,08	-0,58	53,43	54,08	-1,22	43,00	44,37	-3,19			
40,57	40,75	-0,43	56,57	57,30	-1,29	44,75	46,23	-3,32			
42,29	41,17	2,65	38,00	39,51	-3,96						
43,71	42,43	2,93	40,75	41,32	-1,39						
45,43	43,71	3,78	42,50	45,01	-5,91						
46,86	45,44	3,03									
49,14	47,63	3,09									
51,14	48,96	4,28									
52,29	50,30	3,81									
56,29	54,39	3,37									
59,43	57,65	2,99									

Tableau III.28 : Erreur relative en (%) entre Lr/h_1 expérimentale et Lr/h_1 relation selon (la rugosité 12 mm)

Rugosité 12 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$	Lr/h_1 exp	Lr/h_1 rel	$\frac{\Delta Lr/h_1}{Lr/h_1} \%$
51,20	51,25	-0,09	66,00	64,71	1,96	38,80	39,33	-1,37	42,40	43,30	-2,13
54,40	53,13	2,33	69,60	68,09	2,18	53,20	54,18	-1,85	46,00	45,62	0,82
56,40	55,68	1,27	75,20	75,01	0,26	56,40	57,34	-1,67	50,40	50,38	0,04
56,00	56,97	-1,74	78,00	77,13	1,12	60,40	60,55	-0,25	53,60	53,43	0,31
60,80	59,58	2,01	38,33	38,93	-1,55	64,40	63,83	0,89	56,40	56,55	-0,26
63,20	63,57	-0,58	40,00	41,31	-3,27	72,00	73,98	-2,75	60,80	59,72	1,78
65,20	65,59	-0,60	43,33	44,22	-2,05	34,00	34,29	-0,87	34,00	34,26	-0,77
68,80	69,01	-0,31	51,33	51,28	0,11	36,67	36,56	0,30	36,67	36,95	-0,79
74,00	76,03	-2,74	53,33	54,41	-2,01	38,00	38,86	-2,27	39,67	39,25	1,05
77,20	79,62	-3,14	56,67	56,52	0,25	42,67	43,62	-2,23	43,00	42,54	1,07
79,20	82,53	-4,21	59,67	59,75	-0,15	44,00	46,06	-4,69	45,67	46,40	-1,62
39,33	38,98	0,89	61,33	62,49	-1,89	51,33	51,09	0,48	48,67	48,88	-0,43
41,67	40,90	1,84	66,67	67,52	-1,28	55,67	55,75	-0,16	52,67	51,90	1,46
43,00	42,85	0,35	32,29	31,27	3,15	31,71	31,96	-0,77	24,57	26,14	-6,39
45,00	44,33	1,49	32,86	32,40	1,39	34,29	33,47	2,39	26,57	27,19	-2,33
62,00	60,57	2,31	34,29	34,32	-0,09	36,00	35,00	2,78	31,14	31,15	-0,01
34,00	35,18	-3,46	36,29	35,48	2,21	48,57	48,05	1,07	32,86	33,76	-2,74
35,14	35,57	-1,22	38,57	37,46	2,89	51,71	51,09	1,21	21,50	22,83	-6,20
36,57	36,76	-0,53	48,57	48,28	0,59	25,50	24,94	2,19	24,00	24,00	-0,01

37,71	37,57	0,39	50,29	49,59	1,38	29,00	27,70	4,47	25,50	26,40	-3,54
39,14	37,97	3,00	52,86	51,79	2,01	30,50	29,28	4,00	27,25	27,32	-0,26
48,00	45,90	4,38	25,75	25,59	0,61	32,00	30,56	4,49	29,25	29,51	-0,88
49,43	48,07	2,76	28,00	27,14	3,06	33,50	32,52	2,92	32,00	32,40	-1,24
52,57	51,60	1,84	28,75	27,77	3,40	40,00	40,04	-0,09	33,50	34,04	-1,62
55,14	54,77	0,68	30,00	28,40	5,32	42,50	42,89	-0,93	37,25	36,73	1,40
58,57	58,46	0,19	45,50	44,96	1,18	45,50	45,08	0,92			
29,75	29,44	1,04	47,50	46,83	1,42						
30,75	31,08	-1,07									
33,25	32,41	2,53									
34,25	32,75	4,39									

III.2.3 La variation de la longueur relative du ressaut « L_j/h_1 » en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal « α »

La longueur L_j est définie comme la distance entre la section initiale du ressaut et la section finale, où est mesurée la hauteur h_2 . L'objectif principal de cette partie de l'étude consiste à évaluer la longueur relative L_j/h_1 pour l'ensemble des valeurs de pente du canal testées et de la rugosité testée aussi.

Les figures III.21 à III.24 illustrent clairement que le rapport L_j/h_1 , représentant la longueur relative du ressaut, varie en fonction du nombre de Froude initial F_1 pour différentes rugosités testées imposées au lit majeur : ε (mm) = 0,00 ; 6 ; 8 ; 10 et 12, et pour toutes les pentes examinées.

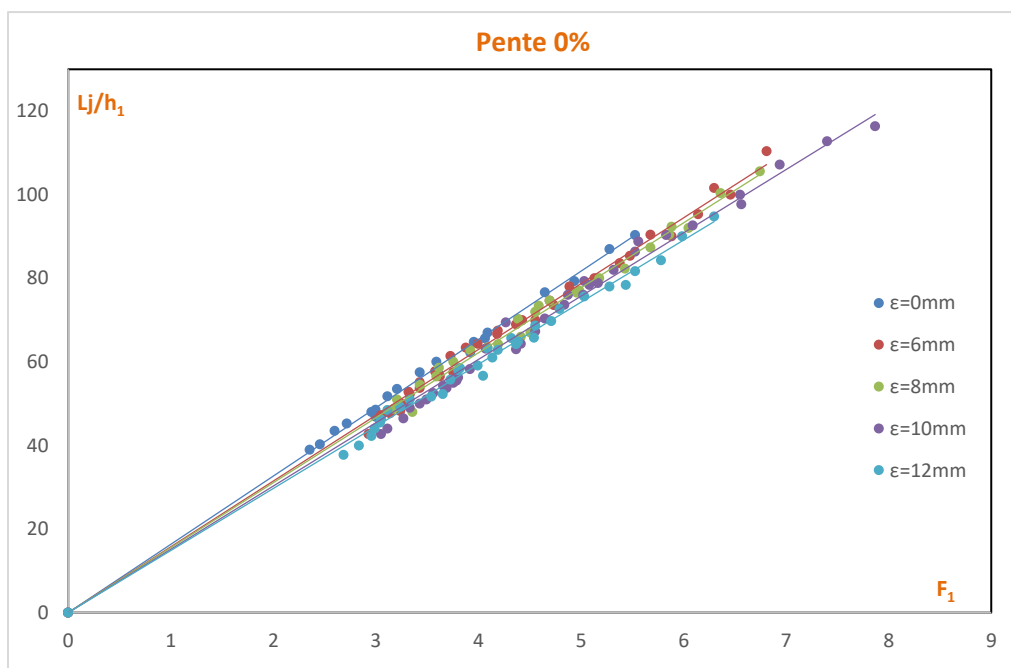


Figure III.21 : Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude

Pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm.

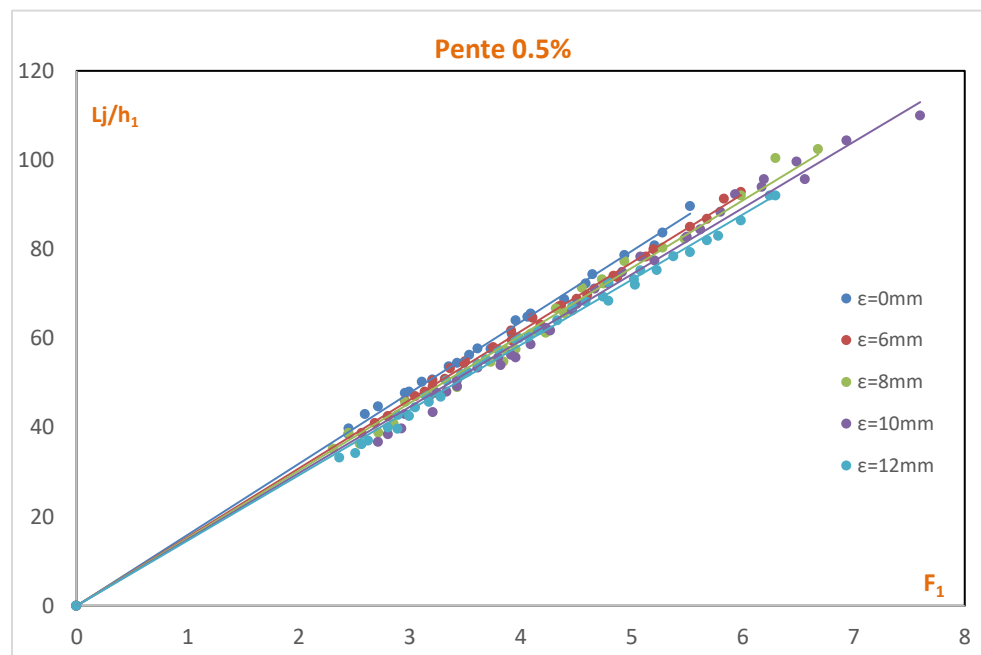


Figure III.22 : Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude

Pour les rugosités $\epsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm .

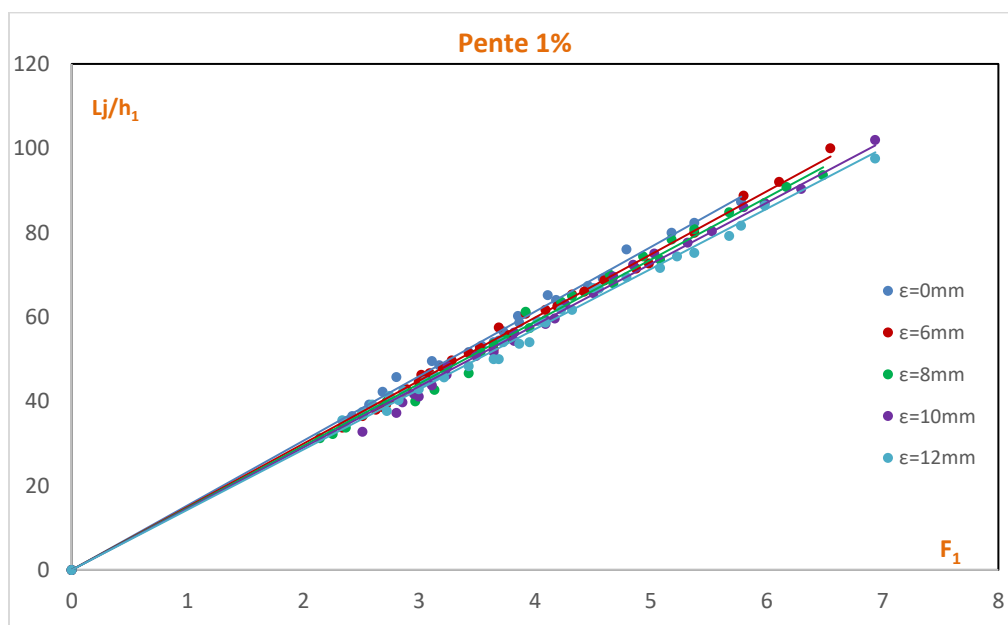


Figure III.23 : Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude

Pour les rugosités $\epsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm .

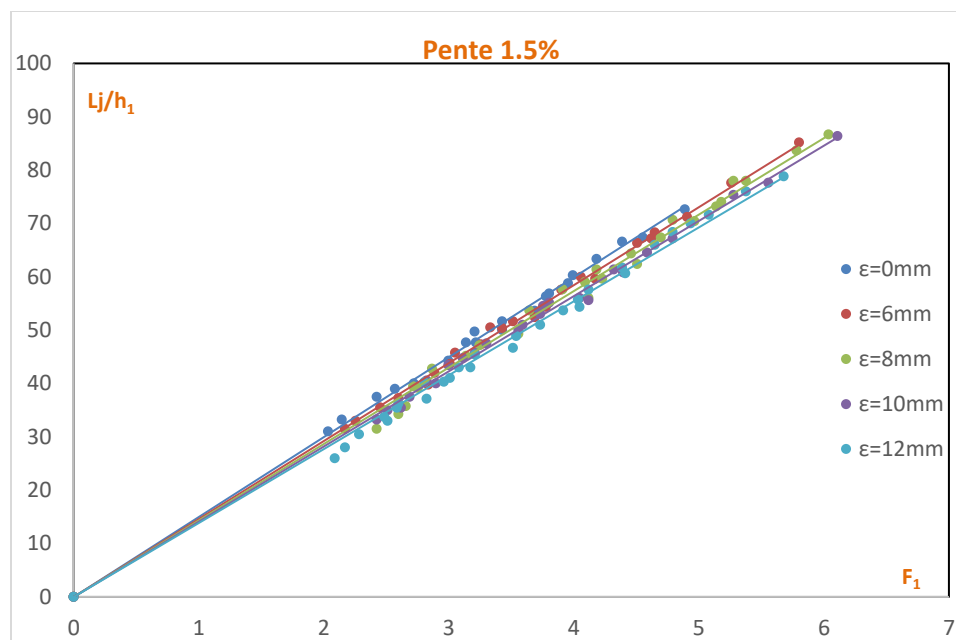


Figure III.24 : Variation de la longueur relative du ressaut en fonction du nombre de Froude

Pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm.

Tableau III.29 : Données expérimentales obtenues pour établir les courbes de $Lj/h1$ en fonction de $F1$

Pente 0 %									
$\varepsilon = 0$ mm		$\varepsilon = 6$ mm		$\varepsilon = 8$ mm		$\varepsilon = 10$ mm		$\varepsilon = 12$ mm	
F_1	Lj/h_1	F_1	Lj/h_1	F_1	Lj/h_1	F_1	Lj/h_1	F_1	Lj/h_1
3,96	64,00	4,73	73,60	5,86	90,40	5,02	77,60	5,44	80,80
4,06	64,80	5,38	83,60	6,05	92,00	5,08	80,00	5,99	92,40
4,65	76,00	5,68	90,40	6,36	100,40	5,32	83,60	6,30	97,20
4,94	78,67	6,30	101,60	6,74	105,60	5,56	90,40	4,05	58,67
5,28	86,33	6,81	110,40	4,41	66,00	6,55	101,60	4,14	63,00
5,53	89,67	4,18	66,67	4,55	72,00	6,94	108,80	4,32	67,67
3,00	46,29	4,37	69,00	4,70	74,67	7,40	114,40	4,55	70,67
3,00	48,00	4,55	70,00	4,98	77,00	7,87	118,00	4,79	74,67
3,61	56,57	4,70	74,67	5,18	80,00	4,37	64,33	5,03	77,67
2,35	38,50	4,89	78,00	5,43	82,33	4,41	65,67	5,28	80,00
2,45	39,75	5,13	80,00	5,68	87,33	4,55	68,67	5,53	83,67
2,60	43,00	5,48	85,33	5,88	92,33	4,65	71,67	5,78	86,33
2,72	44,75	5,88	90,00	3,36	48,00	4,84	75,00	3,54	53,43
2,96	47,50	6,14	95,33	3,61	58,57	5,03	80,67	3,65	54,00
3,11	51,25	6,46	100,00	4,39	70,29	5,53	87,67	3,73	57,43
3,21	53,00	3,14	47,71	4,59	73,43	5,83	91,67	3,80	59,71
3,43	57,00	3,25	50,00	4,96	76,57	6,09	94,00	3,99	60,86
3,59	59,50	3,32	52,86	3,17	48,75	6,56	99,00	4,19	64,57
3,92	61,75	3,43	55,14	3,21	51,00	3,69	54,86	4,39	66,57
4,09	66,50	3,58	57,71	3,43	54,50	3,80	57,43	4,71	71,43
		3,73	61,43	3,59	56,50	3,92	59,43	2,69	39,25
		3,88	63,43	3,75	60,00	4,07	64,29	2,84	41,50
		3,99	64,29	3,92	62,75	4,27	70,57	2,96	43,75

		4,19	67,43	4,09	63,50	4,87	77,14	2,99	45,50
		4,43	70,00	4,19	64,25	5,17	80,00	3,04	47,00
		2,93	42,75	4,51	67,00	3,05	43,75	3,05	47,75
		3,05	47,25			3,11	45,00	3,11	50,00
		3,24	48,25			3,27	47,50	3,24	50,75
		3,33	52,25			3,33	50,00	3,33	52,50
		3,43	53,75			3,43	51,00	3,82	60,00
		3,62	56,50			3,49	52,00	4,09	64,75
		3,75	57,50			3,56	53,50	4,37	65,75
						3,66	55,25	4,54	67,25
						3,75	56,00		
						3,79	56,50		

Tableau III.30 : Données expérimentales obtenues pour établir les courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 0,5 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1
3,96	64,00	5,20	80,00	3,85	54,80	5,50	84,00	4,79	70,00
4,06	64,80	5,68	86,80	3,96	57,60	5,62	85,60	5,02	74,80
4,39	68,80	5,99	92,80	4,23	61,20	5,80	89,60	5,08	76,80
3,73	56,33	4,18	63,00	4,39	65,60	6,17	95,20	5,38	80,00
4,65	74,33	4,37	67,33	4,73	73,20	6,49	100,80	5,68	83,60
4,94	78,67	4,60	69,67	5,99	92,00	6,94	105,60	5,99	88,00
5,28	83,67	4,84	74,00	6,30	100,40	7,60	111,20	6,30	93,60
5,53	89,67	5,13	78,33	6,68	102,40	3,82	55,00	4,74	70,67
3,00	48,00	5,53	85,00	3,22	47,67	3,96	56,67	5,03	73,33
3,36	50,86	5,83	91,33	3,43	49,00	4,09	59,67	5,23	76,67
3,54	53,43	3,14	48,00	3,73	54,67	4,23	63,33	5,53	80,67
3,61	56,57	3,21	49,14	3,87	57,33	4,51	68,67	5,78	84,33
4,59	72,29	3,32	50,86	4,09	61,00	4,79	73,33	6,25	93,33
5,21	80,86	3,50	54,86	4,32	66,67	5,08	79,33	2,89	40,86
2,45	38,50	3,92	61,71	4,55	71,33	5,93	93,33	3,00	43,71
2,45	39,75	4,11	64,57	4,94	77,33	6,19	96,67	3,17	46,86
2,60	43,00	4,35	67,14	5,28	80,33	6,56	96,67	3,28	48,00
2,72	44,75	4,51	68,86	5,48	82,33	3,21	44,29	3,46	53,14
2,96	47,75	4,87	73,71	2,55	36,29	3,25	48,57	3,61	55,43
3,11	50,25	2,57	38,75	2,72	38,86	3,43	51,43	3,80	58,57
3,21	50,75	2,69	41,00	2,86	40,86	3,61	54,29	3,96	60,86
3,43	54,50	2,81	42,50	2,96	45,71	3,80	56,57	4,07	61,43
3,92	61,00	2,81	42,50	4,75	72,29	3,92	57,14	4,47	68,29
4,09	65,50	2,96	46,00	2,31	35,25	4,27	62,57	4,59	69,43
		3,05	47,00	2,45	38,75	4,47	67,14	4,79	73,71
		3,21	50,50			4,67	72,00	2,37	34,25
		3,36	53,25			4,91	75,71	2,51	35,25
		3,49	54,50			5,21	78,29	2,57	37,25
		3,75	58,00			2,72	37,50	2,63	38,00
		3,92	59,50			2,81	39,25	2,81	41,00
						2,93	40,50	2,90	43,75
						3,17	47,50	3,05	45,50
						2,96	43,75	3,14	48,25
						3,33	48,75	3,33	51,50
						3,43	50,00	3,53	53,50
								3,69	56,25

								3,99	61,00
								4,16	62,75
								4,33	65,00

Tableau III.31 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 1 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1
3,69	54,40	5,80	88,80	3,53	52,00	4,17	60,80	3,69	51,60
3,43	50,33	6,11	92,00	3,74	55,20	4,51	66,80	3,96	55,60
3,64	54,00	6,55	100,00	4,23	64,00	4,68	70,80	5,08	73,20
3,87	58,67	3,09	46,67	4,68	68,40	4,85	73,60	5,38	76,80
4,18	64,00	3,64	52,33	5,08	74,00	5,32	78,80	5,68	80,80
4,46	66,33	3,78	55,67	5,38	81,20	5,80	87,20	5,99	88,00
4,79	75,33	4,09	61,67	5,68	85,20	6,94	103,20	6,94	99,20
5,18	80,00	4,32	65,33	2,97	40,33	3,64	52,67	3,22	47,00
5,38	82,33	4,60	68,67	3,13	43,00	3,82	55,33	3,43	49,67
5,78	87,33	4,98	72,67	3,43	47,00	4,09	59,33	3,64	51,33
3,17	48,57	5,38	80,00	3,64	54,00	5,03	76,00	3,87	55,00
3,54	53,14	2,69	38,57	3,96	57,67	5,53	81,33	4,09	60,00
3,73	56,57	2,75	40,57	4,32	65,33	5,99	88,00	4,32	63,00
4,11	65,14	2,89	42,86	4,65	70,33	6,30	91,33	4,55	68,00
4,59	69,14	3,00	44,57	4,94	74,67	2,86	40,57	5,23	75,67
2,37	35,25	3,28	49,71	5,18	78,67	3,00	42,00	5,78	83,00
2,42	36,50	3,43	51,43	2,52	37,14	3,07	45,71	2,72	38,86
2,57	39,25	4,43	66,00	2,72	40,29	3,25	49,14	2,82	41,43
2,69	42,25	4,87	71,43	6,17	91,20	2,51	33,50	3,00	44,00
2,81	45,75	2,34	33,75	6,49	94,00	2,81	38,00	3,14	47,14
3,11	49,50	2,51	36,50	2,14	31,50	2,96	42,50	3,73	55,14
3,85	60,25	2,63	38,00	2,25	32,50	3,11	44,50	4,51	68,00
		2,72	39,25	2,37	34,00	3,24	47,00	4,79	70,57
		2,87	42,25	2,51	37,50	3,49	51,50	2,34	36,50
		3,02	46,25	3,92	61,50	3,82	57,00	2,51	38,50
		3,21	48,00			4,09	60,00	2,60	40,25
		3,53	52,75			4,26	63,75	2,75	42,25
		3,69	57,50					2,87	43,50
		3,92	60,75					3,05	45,75
		4,19	62,50					4,02	60,00
								4,23	62,75

Tableau III.32 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de L_j/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 1,5 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1	F_1	L_j/h_1
3,69	53,60	3,43	50,40	4,12	56,80	4,12	57,20	4,12	60,00
3,96	58,80	3,69	52,40	4,23	60,40	4,39	62,40	4,79	70,80
3,22	47,67	3,90	57,60	4,51	63,20	4,79	68,80	5,08	74,00
3,43	51,00	4,17	59,60	4,96	71,20	5,56	79,20	5,38	78,40
3,78	55,00	4,62	67,20	5,14	74,00	6,11	88,00	5,68	81,20
4,18	63,33	4,91	71,20	5,38	78,80	3,56	51,33	3,01	43,00
4,55	67,33	5,26	77,60	3,56	50,00	3,73	54,33	3,17	45,00
4,89	72,67	5,80	85,20	3,64	54,33	4,05	57,33	3,51	48,67

2,72	38,86	2,89	42,00	3,91	58,33	4,32	62,67	3,73	53,00
3,00	42,57	3,01	43,67	4,09	59,67	5,28	76,67	4,05	56,33
3,14	46,86	3,26	47,33	4,18	62,00	2,62	36,57	4,41	62,67
3,43	50,00	3,51	51,67	4,46	65,00	2,82	41,71	4,65	68,00
3,80	56,86	3,78	54,33	4,70	68,00	3,00	44,57	4,94	72,00
3,99	60,29	4,51	66,33	4,79	71,33	3,21	46,86	2,49	35,43
4,39	66,57	4,65	68,33	5,18	74,67	3,80	56,29	2,59	37,14
2,03	31,00	2,17	31,50	5,28	78,67	4,59	65,71	2,82	38,86
2,14	33,25	2,25	33,00	5,78	84,33	2,42	34,25	2,96	42,00
2,42	37,50	2,45	35,50	6,04	87,33	2,51	36,00	3,21	47,14
2,57	39,00	2,60	37,25	2,75	39,71	2,69	38,50	3,54	50,57
3,21	49,75	2,84	39,75	3,14	45,71	2,90	41,00	3,92	55,43
		3,05	45,75	3,25	47,71	3,11	45,75	4,03	57,43
		3,33	50,50	2,42	32,00	3,30	48,50	4,39	63,43
		4,06	60,00	2,60	34,75	3,59	52,00	2,09	27,50
				2,66	36,25	3,75	55,50	2,17	29,50
				2,72	40,00			2,28	32,00
				2,87	43,25			2,51	34,50
								2,60	37,75
								2,81	41,75
								3,08	44,50

On observe quatre nuages de points, chacun correspondant à un angle d'inclinaison α . L'analyse des données expérimentales de longueurs relatives au ressaut hydraulique sur lit majeur rugueux met en évidence que, pour chaque valeur de rugosité ε , les points se disposent selon une relation linéaire de la forme $Lj/h_1 = a F_1$.

Les résultats indiquent que, pour une inclinaison donnée, le rapport de longueur relative Lj/h_1 croît avec le nombre de Froude amont F_1 . En revanche, une augmentation de la pente du canal, exprimée par $\tan \alpha$, entraîne une diminution de ce rapport.

Les paramètres issus de cette corrélation sont présentés dans les tableaux III.33 – III.36.

Tableau III.33 : Valeurs des paramètres a_1

Pente 0 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_1	R^2
0,000	16,185	0,9997
0,057	15,743	0,9995
0,075	15,543	0,9995
0,094	15,403	0,9990
0,113	15,271	0,9995

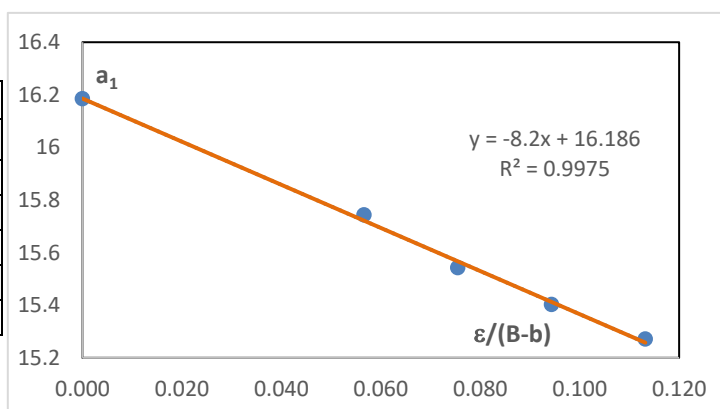
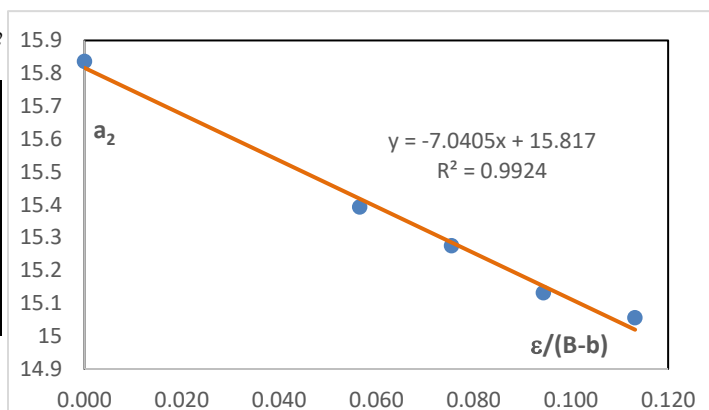


Figure III.25 : Corrélation du facteur a_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs $(\varepsilon/(B-b), a_1)$ conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_1 = -8,2(\varepsilon/(B-b)) + 16,186$

Tableau III.34 : Valeurs des paramètres a_2

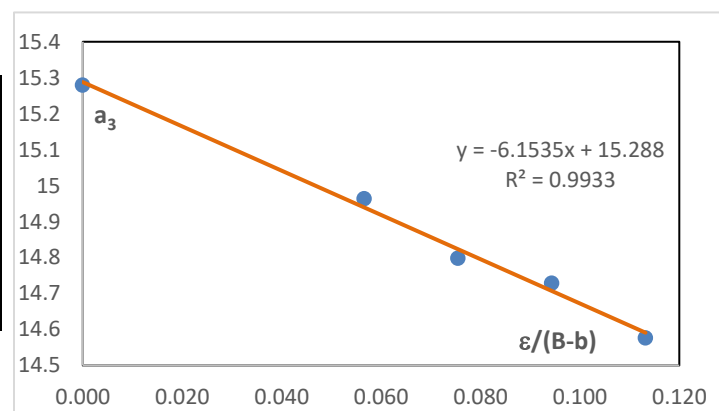
Pente 0,5 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_2	R^2
0,000	15,836	0,9995
0,057	15,393	0,9996
0,075	15,275	0,999
0,094	15,132	0,9991
0,113	15,056	0,9996

**Figure III.26 : Corrélation du facteur a_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$**

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, a_2) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_2 = -7,0405(\varepsilon/(B-b)) + 15,817$

Tableau III.35 : Valeurs des paramètres a_3

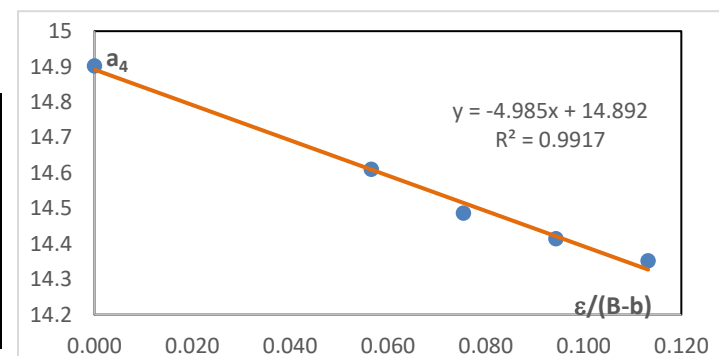
Pente 1 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_3	R^2
0,000	15,280	0,9994
0,057	14,964	0,9996
0,075	14,799	0,9992
0,094	14,729	0,9995
0,113	14,577	0,9994

**Figure III.27: Corrélation du facteur a_3 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$**

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, a_3) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_3 = -6,1535(\varepsilon/(B-b)) + 15,288$

Tableau III.36 : Valeurs des paramètres a_4

Pente 1,5 %		
$\varepsilon/(B-b)$	a_4	R^2
0,000	14,902	0,9996
0,057	14,61	0,9998
0,075	14,487	0,9994
0,094	14,414	0,9997
0,113	14,352	0,9995

**Figure III.28: Corrélation du facteur a_4 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$**

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, a_4) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $a_4 = -4,985(\varepsilon/(B-b)) + 14,892$

Remplaçant les paramètres a par leurs expressions respectives dans la relation $L_j/h_1 = a F_1$, on obtient ce qui suit :

$$L_j/h_1 = (-8,2(\varepsilon/(B-b)) + 16,186)F_1 \quad ; R^2 = 0,99 \quad ; \tan(\alpha) = 0 \% \quad (3.15)$$

$$L_j/h_1 = (-7,0405(\varepsilon/(B-b)) + 15,817)F_1 \quad ; R^2 = 0,99 \quad ; \tan(\alpha) = 0,5\% \quad (3.16)$$

$$L_j/h_1 = (-6,1535(\varepsilon/(B-b)) + 15,288)F_1 \quad ; R^2 = 0,99 \quad ; \tan(\alpha) = 1\% \quad (3.17)$$

$$L_j/h_1 = (-4,985(\varepsilon/(B-b)) + 14,892)F_1 \quad ; R^2 = 0,99 \quad ; \tan(\alpha) = 1,5\% \quad (3.18)$$

Le tableau ci-dessous représente les valeurs de a' et b' du coefficient de rugosité avec l'angle d'inclinaison du canal.

Tableau III.37 : Valeurs a' et b' du coefficient de rugosité corrélées
à l'angle d'inclinaison du canal.

$\varepsilon/(B-b)$	0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12		
$\tan(\alpha)$	a'	b'	R^2
0 %	-8,2000	16,186	0,99
0,5 %	-7,0405	15,817	0,99
1 %	-6,1535	15,288	0,99
1,5 %	-4,9850	14,892	0,99

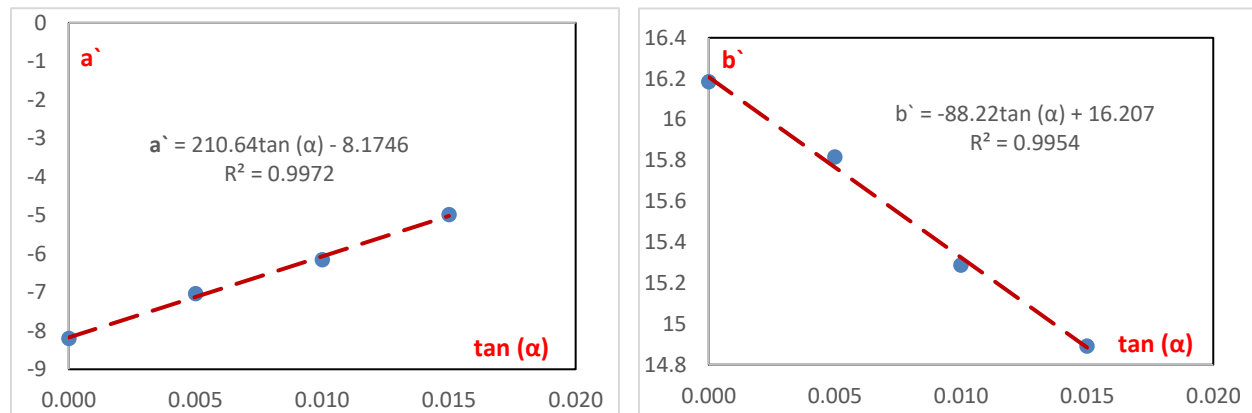


Figure III.29 : Variation des facteurs a' et b' en fonction de $\varepsilon/(B-b)$

$$a' = 210,02 \tan(\alpha) - 8,1746 \quad R^2 = 0,99 \quad (3.19)$$

$$b' = -88,22 \tan(\alpha) + 16,207 \quad R^2 = 0,99 \quad (3.20)$$

Il serait pratique de reformuler les quatre relations en une équation globale sous la forme suivante :

$$Lj/h_1 = [(210,02 \tan(\alpha) - 8,1746)\varepsilon/(B-b) - 88,22 \tan(\alpha) + 16,207]F_1 \quad (3.21)$$

$$2,03 \leq F_1 \leq 7,87 \quad 0,000 \leq \frac{\varepsilon}{B-b} \leq 0,113 \quad 0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,015$$

La validité de la comparaison entre l'approche globale adimensionnelle $Lj/h_{1\text{relation}}$ et les valeurs expérimentales $Lj/h_{1\text{exp}}$ est illustrée par la Figure III.30. La bonne concordance des données avec la première bissectrice affirme la concordance de cette modélisation fonctionnelle. Par ailleurs, les erreurs relatives observées, en majorité inférieures à 5 %, traduisent une précision admissible des calculs tout en facilitant l'exploitation des résultats. Le coefficient de corrélation principalement élevé ($R^2 = 0,9994$) atteste d'un accord très important entre le modèle et les données. La grande précision du modèle est renforcée par une faible erreur absolue moyenne (MAE = 1,25). Enfin, sa cohérence et sa crédibilité sont démontrées par la faiblesse de l'erreur relative moyenne (MRE = 0,022) et de son écart-type ($\sigma_{RE} = 0,10$).

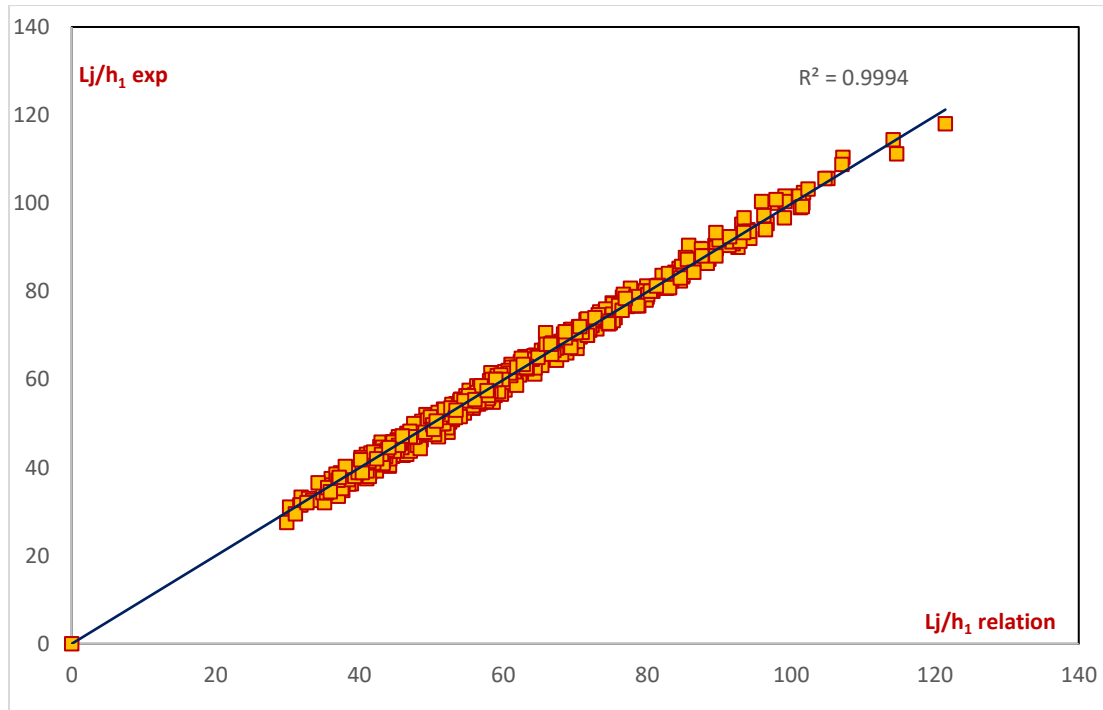


Figure III.30 : Comparaison entre Lj/h_1 expérimentale et l'approche globale $f(\tan(\alpha), \varepsilon/(B-b), F_1)$

Tableau III.38 : Erreur relative en (%) entre Lj/h_1 expérimentale et Lj/h_1 relation selon (la rugosité 00 mm)

Rugosité 00 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$
64,00	64,10	-0,16	64,00	62,36	2,57	54,40	56,53	-3,91	53,60	54,90	-2,42
64,80	65,86	-1,63	64,80	64,06	1,14	50,33	52,54	-4,38	58,80	58,87	-0,11
76,00	75,33	0,88	68,80	69,28	-0,70	54,00	55,85	-3,43	47,67	47,87	-0,42
78,67	79,99	-1,68	56,33	58,85	-4,46	58,67	59,24	-0,97	51,00	51,02	-0,05
86,33	85,54	0,92	74,33	73,28	1,42	64,00	64,09	-0,14	55,00	56,21	-2,20
89,67	89,58	0,09	78,67	77,81	1,09	66,33	68,34	-3,03	63,33	62,24	1,72
46,29	48,57	-4,94	83,67	83,21	0,54	75,33	73,42	2,54	67,33	67,77	-0,65
48,00	48,57	-1,19	89,67	87,14	2,81	80,00	79,37	0,78	72,67	72,74	-0,10
56,57	58,56	-3,52	48,00	47,25	1,56	82,33	82,41	-0,09	38,86	40,49	-4,20
38,50	38,14	0,95	50,86	52,89	-4,01	87,33	88,59	-1,43	42,57	44,61	-4,78
39,75	39,76	-0,02	53,43	55,80	-4,43	48,57	48,65	-0,15	46,86	46,71	0,31
43,00	42,11	2,07	56,57	56,97	-0,70	53,14	54,23	-2,05	50,00	51,02	-2,05
44,75	44,02	1,63	72,29	72,32	-0,05	56,57	57,10	-0,94	56,86	56,59	0,47
47,50	47,93	-0,91	80,86	82,10	-1,54	65,14	62,99	3,31	60,29	59,44	1,40
51,25	50,43	1,59	38,50	38,67	-0,45	69,14	70,30	-1,67	66,57	65,28	1,93
53,00	51,95	1,97	39,75	38,67	2,71	35,25	36,28	-2,92	31,00	30,28	2,31
57,00	55,56	2,52	43,00	40,96	4,74	36,50	37,15	-1,79	33,25	31,91	4,04
59,50	58,19	2,21	44,75	42,82	4,30	39,25	39,37	-0,30	37,50	36,08	3,78
61,75	63,55	-2,92	47,75	46,63	2,35	42,25	41,17	2,55	39,00	38,23	1,96
66,50	66,30	0,30	50,25	49,06	2,36	45,75	43,00	6,01	49,75	47,71	4,10
			50,75	50,54	0,41	49,50	47,69	3,66			
			54,50	54,05	0,83	60,25	59,07	1,96			
			61,00	61,82	-1,35						
			65,50	64,49	1,54						

Tableau III.39 : Erreur relative en (%) entre Lj/h_1 expérimentale et Lj/h_1 relation selon (la rugosité 06 mm)

Rugosité 06 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$
73,60	72,72	1,19	78,00	79,87	-2,40	88,80	86,90	2,14	50,40	50,05	0,70
83,60	84,66	-1,27	86,80	87,24	-0,51	92,00	91,53	0,51	52,40	53,85	-2,77
90,40	89,41	1,10	90,80	91,96	-1,27	100,00	98,15	1,85	57,60	56,96	1,12
101,60	99,16	2,40	63,00	64,25	-1,98	46,67	46,31	0,77	59,60	60,92	-2,21
110,40	107,20	2,90	67,33	67,08	0,38	52,33	54,60	-4,33	67,20	67,44	-0,36
66,67	65,84	1,24	69,67	70,68	-1,45	55,67	56,58	-1,64	71,20	71,63	-0,61
69,00	68,75	0,37	74,00	74,34	-0,46	61,67	61,28	0,62	77,60	76,77	1,07
70,00	71,69	-2,42	76,67	78,82	-2,80	65,33	64,72	0,94	85,20	84,69	0,60
74,67	73,93	0,99	83,33	84,92	-1,90	68,67	68,92	-0,37	42,00	42,14	-0,34
78,00	76,95	1,35	90,00	89,59	0,46	72,67	74,66	-2,75	43,67	43,93	-0,59
80,00	80,77	-0,97	45,71	48,22	-5,47	80,00	80,56	-0,70	47,33	47,57	-0,50
85,33	86,23	-1,06	48,00	49,32	-2,74	38,57	40,25	-4,34	51,67	51,31	0,70
90,00	92,62	-2,91	50,00	50,98	-1,96	40,57	41,27	-1,71	54,33	55,14	-1,48
95,33	96,69	-1,42	54,00	53,80	0,37	42,86	43,33	-1,10	66,33	65,79	0,82

100,00	101,65	-1,65	61,71	60,17	2,50	44,57	44,90	-0,73	68,33	67,86	0,70
47,71	49,41	-3,56	64,57	63,14	2,21	49,71	49,17	1,09	31,50	31,70	-0,63
50,00	51,11	-2,22	67,14	66,77	0,55	51,43	51,36	0,14	33,00	32,92	0,26
52,86	52,25	1,15	68,86	69,23	-0,54	66,00	66,31	-0,47	35,50	35,81	-0,88
55,14	53,97	2,12	72,86	74,87	-2,76	71,43	73,01	-2,21	37,25	37,93	-1,83
57,71	56,30	2,44	38,00	39,47	-3,86	33,75	35,04	-3,82	39,75	41,40	-4,16
61,43	58,67	4,50	40,25	41,27	-2,54	36,50	37,61	-3,05	45,75	44,53	2,68
63,43	61,06	3,73	41,00	43,11	-5,14	38,00	39,36	-3,59	50,50	48,65	3,67
64,29	62,88	2,19	41,75	43,11	-3,25	39,25	40,69	-3,67	60,00	59,22	1,29
67,43	65,94	2,20	47,00	45,44	3,33	42,25	42,94	-1,63			
70,00	69,69	0,45	46,25	46,85	-1,31	46,25	45,23	2,21			
42,75	46,08	-7,80	52,00	49,25	5,29	48,00	48,02	-0,05			
47,25	48,02	-1,62	53,25	51,68	2,95	52,75	52,81	-0,11			
48,25	50,97	-5,63	54,50	53,66	1,55	57,50	55,26	3,90			
52,25	52,46	-0,41	58,00	57,68	0,55	60,75	58,75	3,30			
53,75	53,97	-0,42	58,50	60,24	-2,98	62,50	62,82	-0,51			
56,50	57,04	-0,95									
57,50	59,11	-2,81									

Tableau III.40 : Erreur relative en (%) entre Lj/h_1 expérimentale et Lj/h_1 relation selon (la rugosité 08 mm)

Rugosité 08 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$
90,40	91,39	-1,10	54,80	58,59	-6,92	52,00	52,50	-0,96	56,80	59,73	-5,16
92,00	94,29	-2,48	57,60	60,23	-4,56	55,20	55,62	-0,76	60,40	61,32	-1,53
100,40	99,17	1,23	61,20	64,38	-5,20	64,00	62,85	1,79	63,20	65,36	-3,42
105,60	105,14	0,44	65,60	66,92	-2,01	68,40	69,52	-1,64	71,20	72,01	-1,14
66,00	68,80	-4,24	73,20	72,09	1,52	74,00	75,54	-2,08	74,00	74,55	-0,75
72,00	70,99	1,40	92,00	91,15	0,92	81,20	79,94	1,55	78,80	78,00	1,02
74,67	73,20	1,96	100,40	95,91	4,47	85,20	84,42	0,91	50,00	51,60	-3,20
77,00	77,70	-0,91	102,40	101,72	0,67	40,33	44,12	-9,39	54,33	52,86	2,70
80,00	80,75	-0,93	47,67	48,98	-2,75	43,00	46,57	-8,30	58,33	56,72	2,77
82,33	84,61	-2,77	49,00	52,21	-6,54	47,00	50,96	-8,44	59,67	59,33	0,56
87,33	88,53	-1,37	54,67	56,84	-3,97	54,00	54,18	-0,34	62,00	60,66	2,17
92,33	91,71	0,67	57,33	58,87	-2,67	57,67	58,80	-1,96	65,00	64,68	0,49
48,00	52,30	-8,97	61,00	62,29	-2,12	65,33	64,22	1,70	68,00	68,11	-0,16
58,57	56,33	3,82	66,67	65,79	1,32	70,33	69,10	1,75	71,33	69,49	2,58
70,29	68,38	2,71	71,33	69,34	2,79	74,67	73,37	1,73	74,67	75,12	-0,61
73,43	71,51	2,61	77,33	75,16	2,81	78,67	77,00	2,12	78,67	76,56	2,68
76,57	77,27	-0,91	80,33	80,38	-0,05	37,14	37,45	-0,82	84,33	83,84	0,58
48,75	49,49	-1,51	82,33	83,41	-1,31	40,29	40,44	-0,39	87,33	87,57	-0,27
51,00	49,98	2,01	36,29	38,87	-7,11	91,20	91,76	-0,62	39,71	39,95	-0,60
54,50	53,45	1,93	38,86	41,43	-6,62	94,00	96,45	-2,61	45,71	45,52	0,42
56,50	55,97	0,94	40,86	43,52	-6,51	31,50	31,87	-1,17	47,71	47,08	1,32
60,00	58,53	2,44	45,71	45,11	1,33	32,50	33,52	-3,13	32,00	35,16	-9,89
62,75	61,14	2,57	72,29	72,33	-0,07	34,00	35,19	-3,51	34,75	37,68	-8,45
63,50	63,77	-0,43	35,25	35,19	0,18	37,50	37,33	0,47	36,25	38,54	-6,31
64,25	65,37	-1,75	38,75	37,36	3,60	61,50	58,30	5,21	40,00	39,40	1,51
67,00	70,26	-4,86							43,25	41,57	3,88

Tableau III.41 : Erreur relative en (%) entre Lj/h_1 expérimentale et Lj/h_1 relation selon (la rugosité 10 mm)

Rugosité 10 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1} \%$
77,60	77,53	0,09	84,00	82,97	1,22	60,80	61,56	-1,24	57,20	59,34	-3,74
80,00	78,44	1,96	85,60	84,80	0,94	66,80	66,48	0,48	62,40	63,32	-1,48
83,60	82,08	1,81	89,60	87,56	2,28	70,80	68,99	2,56	68,80	69,04	-0,35
90,40	85,79	5,10	95,20	93,17	2,14	73,60	71,53	2,82	79,20	80,08	-1,11
101,60	101,13	0,46	100,80	97,93	2,85	78,80	78,45	0,45	88,00	88,04	-0,05
108,80	107,10	1,57	105,60	104,72	0,83	87,20	85,57	1,86	51,33	51,26	0,14
114,40	114,20	0,17	111,20	114,69	-3,14	103,20	102,35	0,82	54,33	53,78	1,01
118,00	121,46	-2,93	55,00	57,67	-4,86	52,67	53,77	-2,09	57,33	58,29	-1,67
64,33	67,40	-4,77	56,67	59,70	-5,35	55,33	56,37	-1,87	62,67	62,25	0,66
65,67	68,12	-3,73	59,67	61,74	-3,48	59,33	60,34	-1,70	76,67	76,06	0,80
68,67	70,29	-2,36	63,33	63,81	-0,76	76,00	74,24	2,32	36,57	37,74	-3,20
71,67	71,75	-0,11	68,67	68,02	0,94	81,33	81,54	-0,25	41,71	40,68	2,48
75,00	74,69	0,41	73,33	72,32	1,39	88,00	88,30	-0,34	44,57	43,19	3,11
80,67	77,68	3,70	79,33	76,70	3,32	91,33	92,91	-1,72	46,86	46,26	1,28
87,67	85,32	2,68	93,33	89,57	4,03	40,57	42,16	-3,90	56,29	54,79	2,67
91,67	90,02	1,80	96,67	93,48	3,30	42,00	44,21	-5,26	65,71	66,10	-0,59
94,00	93,99	0,01	96,67	99,05	-2,46	45,71	45,25	1,01	34,25	34,93	-2,00
99,00	101,29	-2,32	44,29	48,45	-9,41	49,14	47,89	2,56	36,00	36,18	-0,50
54,86	56,94	-3,79	48,57	49,00	-0,88	33,50	37,04	-10,56	38,50	38,71	-0,55
57,43	58,69	-2,19	51,43	51,74	-0,61	38,00	41,39	-8,93	41,00	41,74	-1,80
59,43	60,46	-1,73	54,29	54,54	-0,47	42,50	43,63	-2,66	45,75	44,84	1,99
64,29	62,84	2,25	56,57	57,39	-1,44	44,50	45,91	-3,16	48,50	47,56	1,94
70,57	65,87	6,66	57,14	59,12	-3,45	47,00	47,75	-1,60	52,00	51,73	0,51
77,14	75,23	2,49	62,57	64,41	-2,94	51,50	51,52	-0,04	55,50	54,10	2,52
80,00	79,73	0,34	67,14	67,41	-0,40	57,00	56,37	1,11			
43,75	47,08	-7,60	72,00	70,46	2,13	60,00	60,34	-0,57			
45,00	48,03	-6,74	75,71	74,18	2,02	63,75	62,88	1,37			
47,50	50,46	-6,22	78,29	78,60	-0,40						
50,00	51,44	-2,87	37,50	41,00	-9,33						
51,00	52,92	-3,76	39,25	42,35	-7,90						
52,00	53,91	-3,68	40,50	44,18	-9,09						
53,50	54,91	-2,64	47,50	47,91	-0,87						
55,25	56,43	-2,13	43,75	44,64	-2,04						
56,00	57,95	-3,49	48,75	50,30	-3,17						
56,50	58,47	-3,48	50,00	51,74	-3,49						

Tableau III.42 : Erreur relative en (%) entre Lj/h_1 expérimentale et Lj/h_1 relation selon (la rugosité 12 mm)

Rugosité 12 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1}$ %	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1}$ %	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1}$ %	Lj/h_1 exp	Lj/h_1 rel	$\frac{\Delta Lj/h_1}{Lj/h_1}$ %
80,80	83,09	-2,83	70,00	71,67	-2,39	51,60	53,99	-4,63	60,00	58,95	1,75
92,40	91,47	1,00	74,80	75,14	-0,45	55,60	57,89	-4,12	70,80	68,58	3,13
97,20	96,24	0,98	76,80	76,01	1,02	73,20	74,38	-1,61	74,00	72,74	1,70
58,67	61,82	-5,37	80,00	80,44	-0,55	76,80	78,71	-2,49	78,40	76,98	1,82
63,00	63,21	-0,33	83,60	84,95	-1,62	80,80	83,12	-2,87	81,20	81,29	-0,11
67,67	66,02	2,44	88,00	89,54	-1,75	88,00	87,61	0,44	43,00	43,07	-0,16
70,67	69,58	1,53	93,60	94,21	-0,66	99,20	101,56	-2,37	45,00	45,44	-0,98
74,67	73,21	1,94	70,67	70,96	-0,41	47,00	47,08	-0,16	48,67	50,31	-3,37
77,67	76,91	0,98	73,33	75,28	-2,66	49,67	50,18	-1,03	53,00	53,43	-0,81
80,00	80,66	-0,82	76,67	78,22	-2,02	51,33	53,35	-3,92	56,33	57,91	-2,80
83,67	84,47	-0,96	80,67	82,69	-2,50	55,00	56,58	-2,87	62,67	63,17	-0,80
86,33	88,34	-2,32	84,33	86,47	-2,54	60,00	59,88	0,21	68,00	66,54	2,15
53,43	54,08	-1,22	93,33	93,43	-0,10	63,00	63,23	-0,37	72,00	70,65	1,87
54,00	55,79	-3,32	40,86	43,27	-5,90	68,00	66,65	1,98	35,43	35,59	-0,44
57,43	56,94	0,85	43,71	44,83	-2,56	75,67	76,53	-1,14	37,14	37,01	0,35
59,71	58,10	2,70	46,86	47,49	-1,34	83,00	84,61	-1,94	38,86	40,41	-4,00
60,86	61,03	-0,28	48,00	49,10	-2,29	38,86	39,82	-2,48	42,00	42,40	-0,95
64,57	64,01	0,88	53,14	51,83	2,46	41,43	41,32	0,26	47,14	45,95	2,52
66,57	67,03	-0,69	55,43	54,06	2,48	44,00	43,87	0,30	50,57	50,66	-0,18
71,43	71,96	-0,75	58,57	56,88	2,90	47,14	45,94	2,55	55,43	56,07	-1,15
39,25	41,05	-4,60	60,86	59,17	2,78	55,14	54,54	1,09	57,43	57,72	-0,51
41,50	43,34	-4,43	61,43	60,90	0,86	68,00	65,96	3,00	63,43	62,79	1,01
43,75	45,20	-3,31	68,29	66,81	2,16	70,57	70,13	0,63	27,50	29,90	-8,74
45,50	45,67	-0,36	69,43	68,62	1,16	36,50	34,24	6,20	29,50	31,08	-5,36
47,00	46,47	1,13	73,71	71,67	2,77	38,50	36,75	4,55	32,00	32,67	-2,11
47,75	46,61	2,39	34,25	35,41	-3,40	40,25	38,03	5,52	34,50	35,94	-4,18
50,00	47,55	4,89	35,25	37,56	-6,55	42,25	40,19	4,87	37,75	37,19	1,48
50,75	49,47	2,52	37,25	38,43	-3,17	43,50	41,95	3,55	41,75	40,17	3,79
52,50	50,92	3,01	38,00	39,31	-3,44	45,75	44,64	2,42	44,50	44,10	0,90
60,00	58,39	2,68	41,00	41,98	-2,38	60,00	58,88	1,87			
64,75	62,51	3,46	43,75	43,33	0,96	62,75	61,88	1,38			
65,75	66,73	-1,48	45,50	45,62	-0,27						
67,25	69,40	-3,20	48,25	47,02	2,55						
			51,50	49,85	3,21						
			53,50	52,73	1,43						
			56,25	55,18	1,91						
			61,00	59,67	2,18						
			62,75	62,22	0,85						

III.2.4 La variation de la hauteur relative du seuil « s/h_1 » en fonction du nombre de Froude F_1 et de l'angle d'inclinaison du canal « α »

Les figures III.31 à III.34 illustrent de manière détaillée la relation entre la hauteur relative du seuil, exprimée par le rapport s/h_1 , et le nombre de Froude F_1 . Cette analyse repose sur une série de nuages de points, chacun correspondant à une rugosité absolue fixée du lit majeur, permettant ainsi de visualiser l'impact de la texture du lit sur le comportement de l'écoulement.

Les rugosités absolues considérées sont les suivantes : ε (mm) : 0 ; 6 ; 8 ; 10 ; 12 . En parallèle, l'étude prend en compte quatre valeurs d'inclinaison de pente, définies par les tangentes de l'angle α : $\tan(\alpha)$: 0 % ; 0,5 % ; 1 % ; 1,5 %

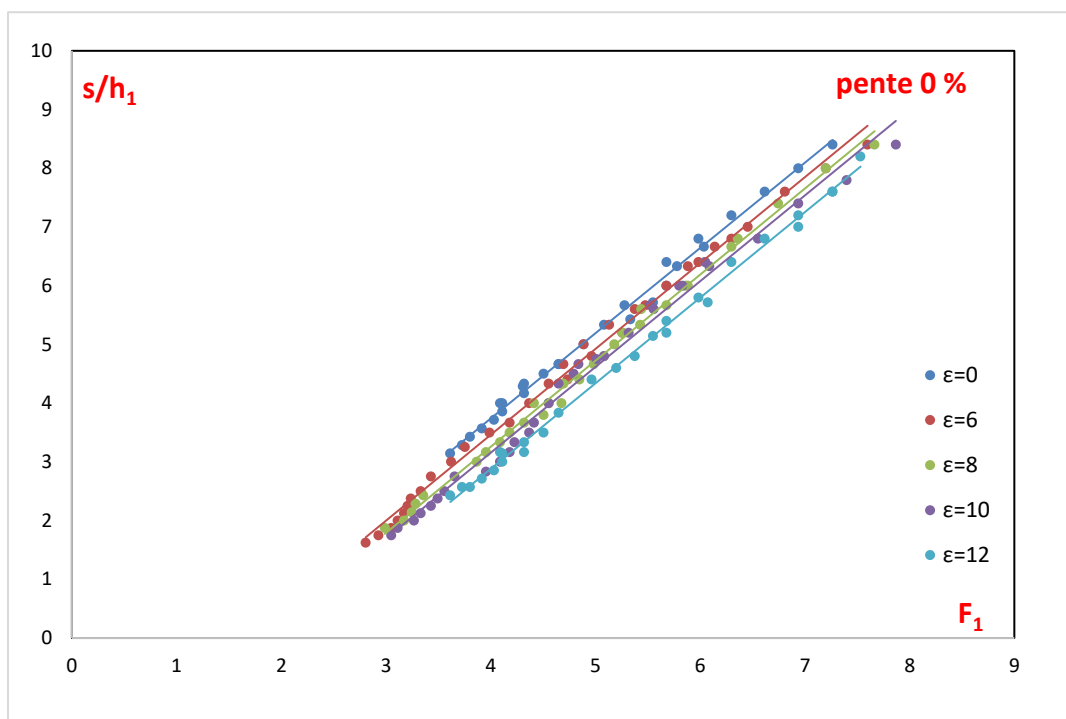


Figure III.31 : Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm.

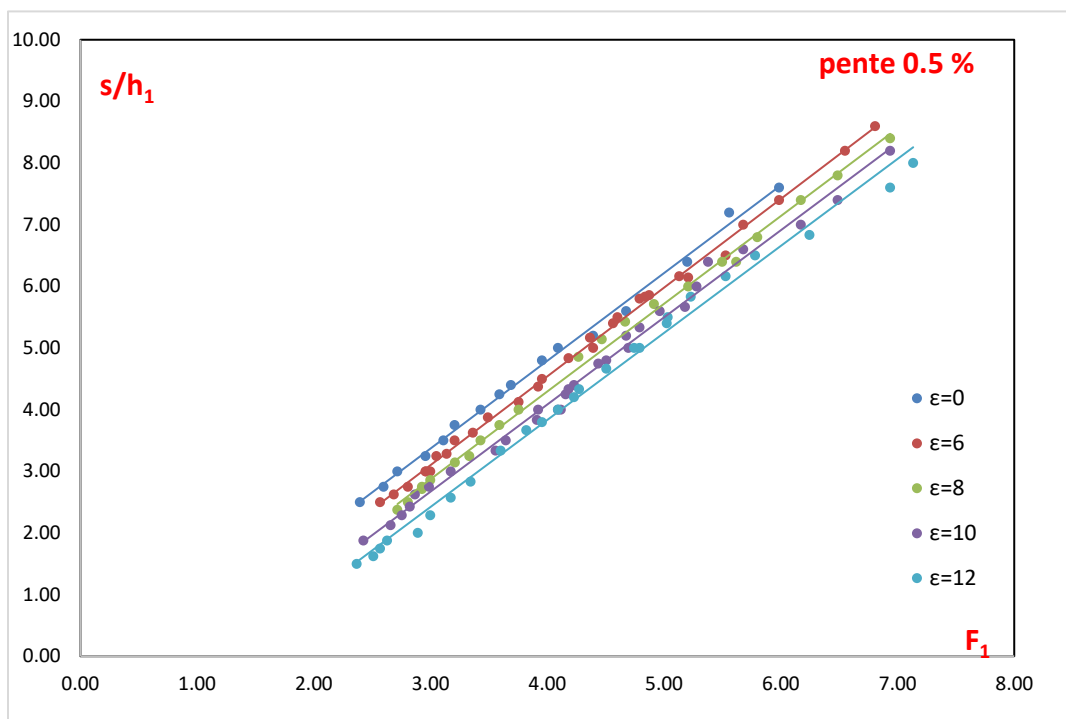


Figure III.32 : Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm.

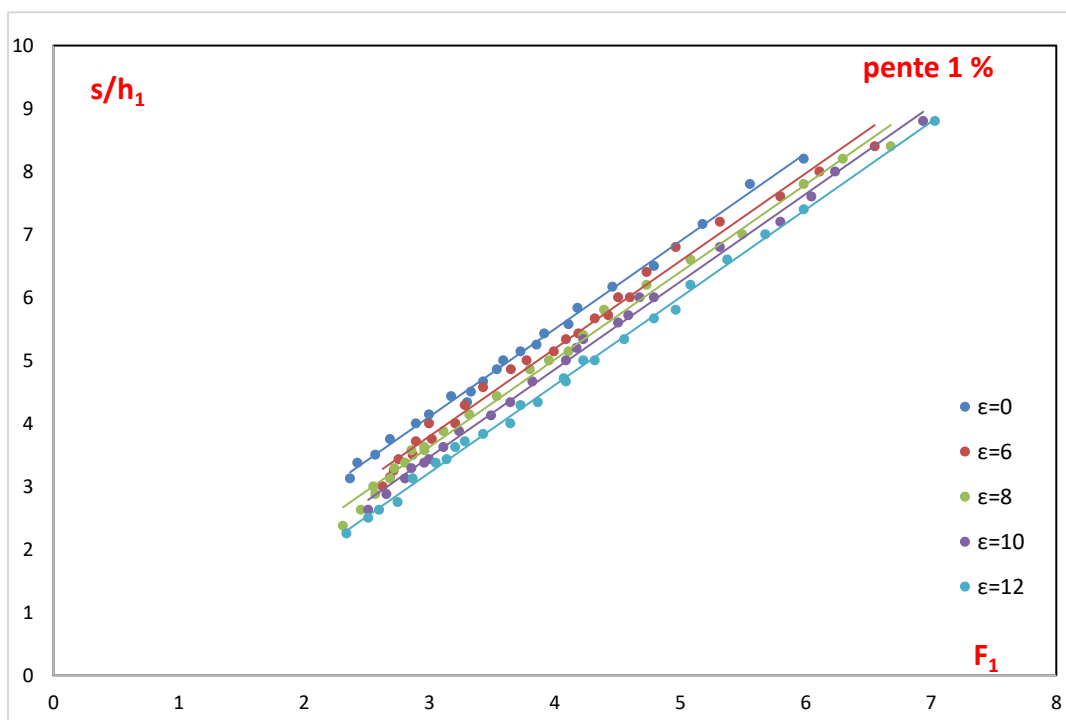


Figure III.33 : Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm.

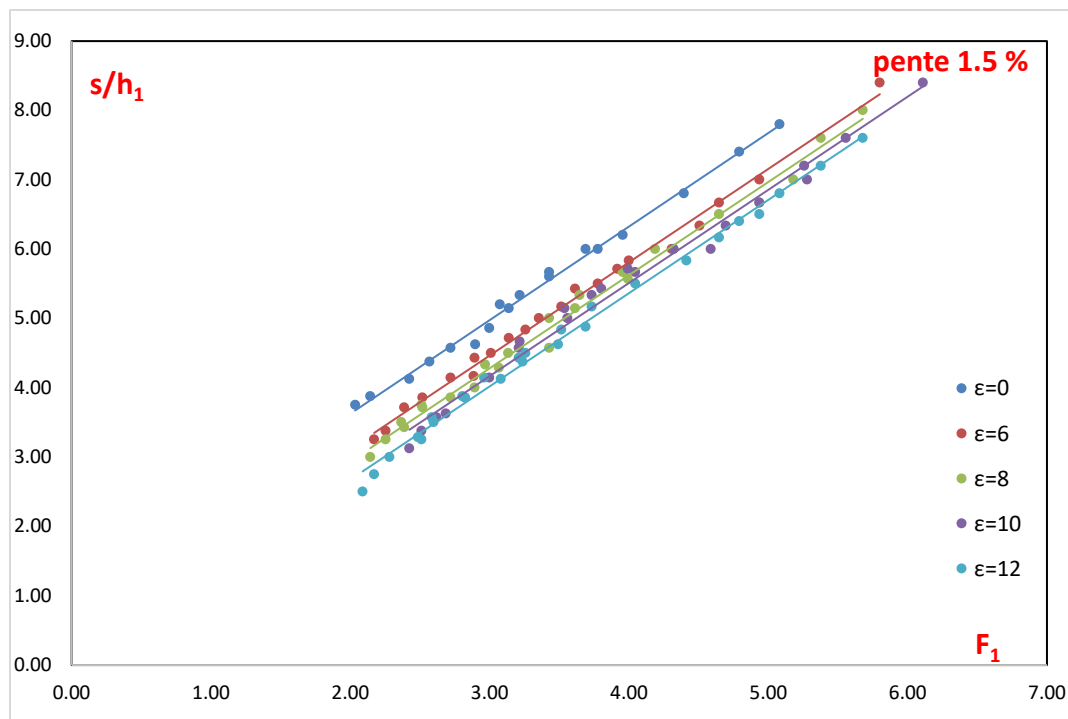


Figure III.34 : Variation de la hauteur relative du seuil en fonction du nombre de Froude pour les rugosités $\varepsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm.

Ces figures illustrent l'évolution du rapport s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 , pour cinq valeurs distinctes de rugosité équivalente. Chaque rugosité présente une tendance propre. L'analyse des mesures expérimentales met en évidence des courbes linéaires décrites par la relation : $s/h_1 = a F_1 + b$.

On constate par ailleurs qu'une augmentation du rapport s/h_1 s'accompagne d'une élévation du nombre de Froude. De plus, pour une valeur fixée de F_1 , la longueur caractéristique (S) de l'écoulement tend à diminuer lorsque le facteur de rugosité ε augmente.

Tableau III.43 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de s/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 0 %									
$\varepsilon = 0$ mm		$\varepsilon = 6$ mm		$\varepsilon = 8$ mm		$\varepsilon = 10$ mm		$\varepsilon = 12$ mm	
F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1
5,68	6,40	4,73	4,40	4,51	3,80	5,08	4,80	4,96	4,40
5,99	6,80	4,96	4,80	4,68	4,00	5,32	5,20	5,20	4,60
6,30	7,20	5,26	5,20	4,85	4,40	5,56	5,60	5,38	4,80
6,62	7,60	5,38	5,60	5,08	4,80	5,80	6,00	5,68	5,20
6,94	8,00	5,68	6,00	5,26	5,20	6,05	6,40	5,68	5,40
7,27	8,40	5,99	6,40	5,44	5,60	6,55	6,80	5,99	5,80
4,09	4,00	6,30	6,80	5,86	6,00	6,94	7,40	6,30	6,40
4,32	4,17	6,81	7,60	6,05	6,40	7,40	7,80	6,62	6,80
4,32	4,33	7,20	8,00	6,36	6,80	7,87	8,40	6,94	7,20
4,51	4,50	7,60	8,40	6,74	7,40	3,96	2,83	7,27	7,60
4,65	4,67	4,18	3,67	7,20	8,00	4,09	3,00	4,09	3,17
4,65	4,67	4,37	4,00	7,67	8,40	4,18	3,17	4,32	3,17

4,89	5,00	4,55	4,33	3,87	3,00	4,23	3,33	4,32	3,33
5,08	5,33	4,70	4,67	3,96	3,17	4,37	3,50	4,51	3,50
5,28	5,67	4,89	5,00	4,09	3,33	4,41	3,67	4,65	3,83
5,68	6,00	5,13	5,33	4,18	3,50	4,55	4,00	3,61	2,43
5,78	6,33	5,48	5,67	4,32	3,67	4,65	4,33	3,73	2,57
6,04	6,67	5,88	6,33	4,41	4,00	4,84	4,67	3,80	2,57
3,61	3,14	6,14	6,67	4,55	4,00	5,53	5,67	3,92	2,71
3,73	3,29	6,46	7,00	4,70	4,33	5,83	6,00	4,03	2,86
3,80	3,43	2,81	1,63	4,98	4,67	6,09	6,33	4,11	3,00
3,92	3,57	2,93	1,75	5,18	5,00	3,05	1,75	4,11	3,14
4,03	3,71	3,05	1,88	5,43	5,33	3,11	1,88	5,55	5,14
4,11	3,86	3,11	2,00	5,68	5,67	3,27	2,00	6,07	5,71
4,11	4,00	3,17	2,13	5,88	6,00	3,33	2,13	6,94	7,00
4,31	4,29	3,21	2,25	6,30	6,67	3,43	2,25	7,27	7,60
5,33	5,43	3,24	2,38	3,17	2,00	3,49	2,38	7,53	8,20
5,55	5,71	3,33	2,50	3,25	2,14	3,56	2,50		
		3,43	2,75	3,28	2,29	3,66	2,75		
		3,62	3,00	3,36	2,43				
		3,75	3,25	2,99	1,88				
		3,99	3,50						

Tableau III.44 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de s/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 0,5 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1
3,69	4,40	4,39	5,00	5,50	6,40	4,12	4,00	3,96	3,80
3,96	4,80	4,56	5,40	5,62	6,40	4,23	4,40	4,23	4,20
4,39	5,20	4,79	5,80	5,80	6,80	4,51	4,80	4,79	5,00
4,68	5,60	5,68	7,00	6,17	7,40	4,68	5,20	5,02	5,40
5,20	6,40	5,99	7,40	6,49	7,80	4,96	5,60	6,94	7,60
5,56	7,20	6,55	8,20	6,94	8,40	5,38	6,40	7,13	8,00
5,99	7,60	6,81	8,60	2,93	2,71	5,68	6,60	3,34	2,83
4,09	5,00	3,96	4,50	3,00	2,86	6,17	7,00	3,60	3,33
2,40	2,50	4,18	4,83	3,21	3,14	6,49	7,40	3,82	3,67
2,60	2,75	4,37	5,17	4,27	4,86	6,94	8,20	4,09	4,00
2,72	3,00	4,60	5,50	4,47	5,14	3,56	3,33	4,27	4,33
2,96	3,25	4,84	5,83	4,67	5,43	3,64	3,50	4,51	4,67
3,11	3,50	5,13	6,17	4,91	5,71	3,91	3,83	4,74	5,00
3,21	3,75	5,53	6,50	5,21	6,00	4,09	4,00	5,03	5,50
3,43	4,00	2,96	3,00	2,72	2,38	4,18	4,33	5,23	5,83
3,59	4,25	3,00	3,00	2,81	2,50	4,70	5,00	5,53	6,17
		3,14	3,29	2,93	2,75	4,79	5,33	5,78	6,50
		4,87	5,86	3,33	3,25	5,18	5,67	6,25	6,83
		5,21	6,14	3,43	3,50	5,28	6,00	2,89	2,00
		2,57	2,50	3,59	3,75	2,75	2,29	3,00	2,29
		2,69	2,63	3,75	4,00	2,82	2,43	3,17	2,57
		2,81	2,75			2,42	1,88	2,37	1,50
		2,96	3,00			2,66	2,13	2,51	1,63
		3,05	3,25			2,87	2,63	2,57	1,75
		3,21	3,50			2,99	2,75	2,63	1,88
		3,36	3,63			3,17	3,00		
		3,49	3,88			3,92	4,00		
		3,75	4,13			4,16	4,25		
		3,92	4,38			4,44	4,75		

Tableau III.45 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de s/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 1 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1
5,56	7,80	4,51	6,00	3,96	5,00	4,17	5,20	4,96	5,80
5,99	8,20	4,73	6,40	4,23	5,40	4,51	5,60	5,08	6,20
3,30	4,33	4,96	6,80	4,39	5,80	4,68	6,00	5,38	6,60
3,43	4,67	5,32	7,20	4,73	6,20	5,32	6,80	5,68	7,00
4,18	5,83	5,80	7,60	5,08	6,60	5,80	7,20	5,99	7,40
4,46	6,17	6,11	8,00	5,50	7,00	6,05	7,60	7,03	8,80
4,79	6,50	6,55	8,40	5,99	7,80	6,24	8,00	3,43	3,83
5,18	7,17	3,78	5,00	6,30	8,20	6,94	8,80	3,64	4,00
2,89	4,00	4,09	5,33	6,68	8,40	3,64	4,33	3,87	4,33
3,00	4,14	4,32	5,67	2,55	3,00	3,82	4,67	4,09	4,67
3,17	4,43	4,60	6,00	2,72	3,29	4,09	5,00	4,32	5,00
3,54	4,86	2,69	3,14	2,86	3,57	4,23	5,33	4,55	5,33
3,73	5,14	2,75	3,43	2,96	3,57	2,86	3,29	4,79	5,67
3,92	5,43	2,89	3,71	3,32	4,14	3,00	3,43	3,14	3,43
4,11	5,57	3,00	4,00	3,54	4,43	4,59	5,71	3,28	3,71
2,37	3,13	3,28	4,29	3,80	4,86	4,79	6,00	3,73	4,29
2,42	3,38	3,43	4,57	4,11	5,14	2,51	2,63	4,07	4,71
2,57	3,50	3,65	4,86	2,31	2,38	2,66	2,88	4,23	5,00
2,69	3,75	3,99	5,14	2,45	2,63	2,81	3,13	2,34	2,25
3,33	4,50	4,19	5,43	2,57	2,88	2,96	3,38	2,51	2,50
3,59	5,00	4,43	5,71	2,69	3,13	3,11	3,63	2,60	2,63
3,85	5,25	2,63	3,00	2,81	3,38	3,24	3,88	2,75	2,75
		2,72	3,25	2,96	3,63	3,49	4,13	2,87	3,13
		2,87	3,50	3,11	3,88			3,05	3,38
		3,02	3,75					3,21	3,63
		3,21	4,00						

Tableau III.46 : Données expérimentales employées pour établir les courbes de s/h_1 en fonction de F_1 .

Pente 1,5 %									
$\varepsilon = 0 \text{ mm}$		$\varepsilon = 6 \text{ mm}$		$\varepsilon = 8 \text{ mm}$		$\varepsilon = 10 \text{ mm}$		$\varepsilon = 12 \text{ mm}$	
F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1	F_1	s/h_1
3,07	5,20	5,80	8,40	5,38	7,60	5,26	7,20	4,79	6,40
3,43	5,60	2,89	4,17	5,68	8,00	5,56	7,60	5,08	6,80
3,69	6,00	3,01	4,50	2,97	4,33	6,11	8,40	5,38	7,20
3,96	6,20	3,26	4,83	3,13	4,50	3,22	4,67	5,68	7,60
4,39	6,80	3,51	5,17	3,43	5,00	3,56	5,00	3,26	4,50
4,79	7,40	3,78	5,50	3,64	5,33	3,73	5,33	3,51	4,83
5,08	7,80	4,00	5,83	3,96	5,67	4,05	5,67	3,73	5,17
3,22	5,33	4,51	6,33	4,32	6,00	4,32	6,00	4,05	5,50
3,43	5,67	4,65	6,67	4,65	6,50	4,70	6,33	4,41	5,83
3,78	6,00	4,94	7,00	4,94	6,67	4,94	6,67	4,65	6,17
2,72	4,57	2,39	3,71	5,18	7,00	5,28	7,00	4,94	6,50
3,00	4,86	2,52	3,86	2,39	3,43	2,62	3,57	2,49	3,29
3,14	5,14	2,72	4,14	2,52	3,71	2,82	3,86	2,59	3,57
2,03	3,75	2,89	4,43	2,72	3,86	3,00	4,14	2,82	3,86
2,14	3,88	3,14	4,71	2,89	4,00	3,21	4,57	2,96	4,14
2,42	4,13	3,36	5,00	3,07	4,29	3,54	5,14	3,21	4,43
2,57	4,38	3,61	5,43	3,43	4,57	3,80	5,43	2,09	2,50
2,90	4,63	3,92	5,71	3,61	5,14	3,99	5,71	2,17	2,75
		4,31	6,00	3,99	5,57	4,59	6,00	2,28	3,00

		2,17	3,25	4,19	6,00	2,42	3,13	2,51	3,25
		2,25	3,38	2,14	3,00	2,51	3,38	2,60	3,50
				2,25	3,25	2,69	3,63	2,81	3,88
				2,37	3,50			3,08	4,13
				2,51	3,75			3,24	4,38
								3,49	4,63
								3,69	4,88

Les tableaux (III.47) à (III.50) représentent le paramètre « a » et « b » pour les cinq valeurs des rugosités considérées.

Tableau III.47 : Facteur a et b_1 de corrélations

$\varepsilon/(B-b)$	a	b_1	R^2
0,000	1,4521	-2,0695	0,9942
0,057	1,4623	-2,3877	0,9958
0,075	1,4660	-2,6068	0,9962
0,094	1,4607	-2,6870	0,9902
0,113	1,4578	-2,9508	0,9964

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, b_1) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $b_1 = -7,5313 \varepsilon/(B-b) - 2,0297$, avec le moyen arithmétique des valeurs de 'a' est : $a \approx 1,45978$

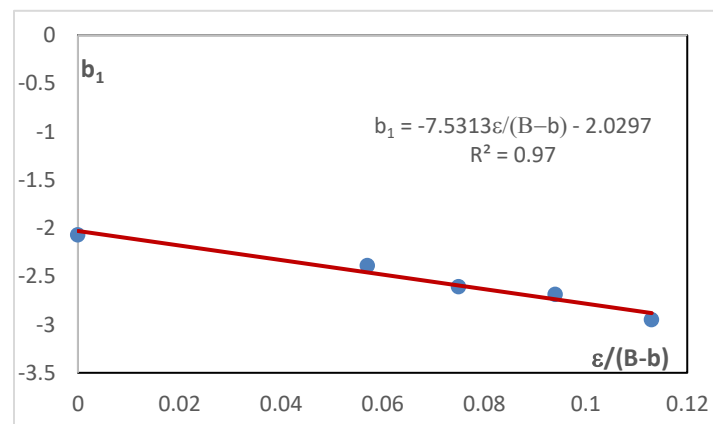


Figure III.35 : Corrélation du facteur b_1 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

Tableau III.48 : Facteur a et b_2 de corrélations

$\varepsilon/(B-b)$	a	b_2	R^2
0,000	1,4226	-0,8977	0,9964
0,057	1,4390	-1,2162	0,9977
0,075	1,4223	-1,3945	0,9972
0,094	1,4129	-1,5682	0,9934
0,113	1,4111	-1,8111	0,9932

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, b_2) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $b_2 = -7,8708 \varepsilon/(B-b) - 0,8439$, avec le moyen arithmétique des valeurs de 'a' est $a \approx 1,42158$

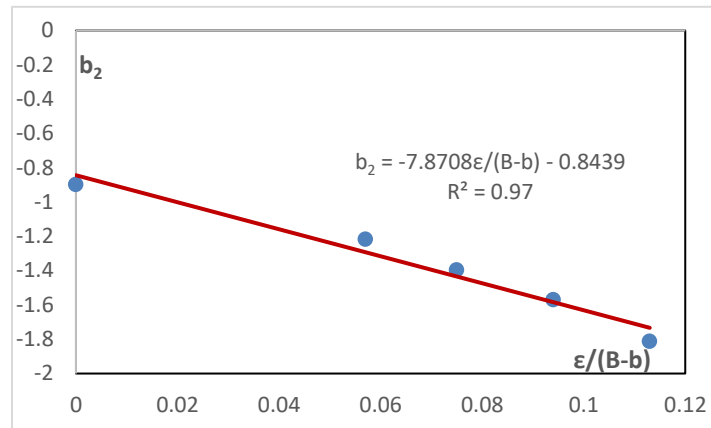


Figure III.36 : Corrélation du facteur b_2 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

Tableau III.49 : Facteur a et b_3 de corrélations

$\varepsilon/(B-b)$	a	b_3	R^2
0,000	1,3937	-0,0743	0,9968
0,057	1,3909	-0,3763	0,9902
0,075	1,3891	-0,5407	0,994
0,094	1,3918	-0,7092	0,9969
0,113	1,3921	-0,9593	0,9979

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, b_3) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $b_3 = -7,5696 \varepsilon/(B-b) - 0,0187$, avec le moyen arithmétique des valeurs de 'a' est $a \approx 1,39152$

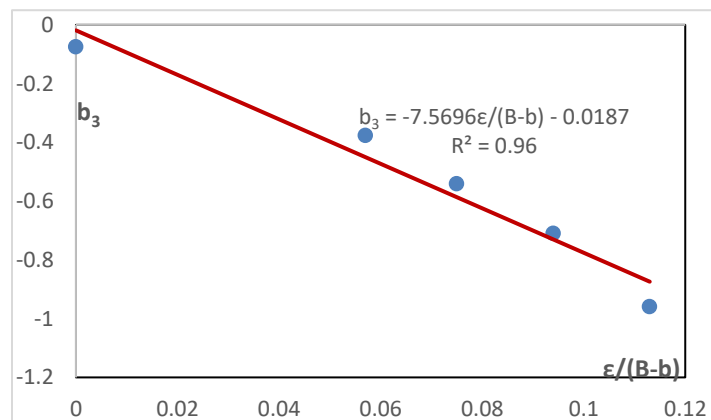
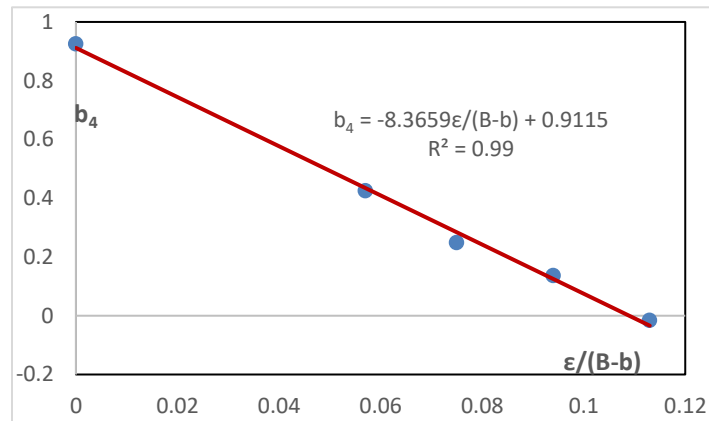


Figure III.37 : Corrélation du facteur b_3 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$

Tableau III.50 : Facteur a et b_4 de corrélations

$\varepsilon/(B-b)$	a	b_4	R^2
0,000	1,3497	0,9258	0,9944
0,057	1,3461	0,4255	0,9941
0,075	1,3438	0,2490	0,9920
0,094	1,3434	0,1372	0,9878
0,113	1,3451	-0,0160	0,9938

L'analyse des mesures expérimentales des paires de valeurs ($\varepsilon/(B-b)$, b_4) conduit à l'élaboration de l'approche explicite suivante : $b_4 = -8,3659 \varepsilon/(B-b) + 0,9115$, avec le moyen arithmétique des valeurs de a est $a \approx 1,34562$

**Figure III.38 : Corrélation du facteur b_4 avec le rapport $\varepsilon/(B-b)$**

Les figures (III.35) à (III.38) montrent clairement que la variation de b en fonction de la rugosité du Lit majeur de canal suit également une loi linéaire selon la relation suivante :

$$b_1 = -7,5313\varepsilon/(B-b) - 2,0297 ; R^2 = 0,97 ; \tan \alpha = 0\% \quad (3.22)$$

$$b_2 = -7,8708\varepsilon/(B-b) - 0,8439 ; R^2 = 0,97 ; \tan \alpha = 0,5\% \quad (3.23)$$

$$b_3 = -7,5696\varepsilon/(B-b) - 0,0187 ; R^2 = 0,96 ; \tan \alpha = 1\% \quad (3.24)$$

$$b_4 = -8,3659\varepsilon/(B-b) + 0,9115 ; R^2 = 0,99 ; \tan \alpha = 1,5\% \quad (3.25)$$

Pendant que nous pouvons nous corréler les moyens arithmétiques des valeurs de ' a ' comme suit :

Tableau III.51 : Facteur ' a ' de corrélations

Tan (α)	a
0,000	1,45978
0,005	1,42158
0,010	1,39152
0,015	1,34562

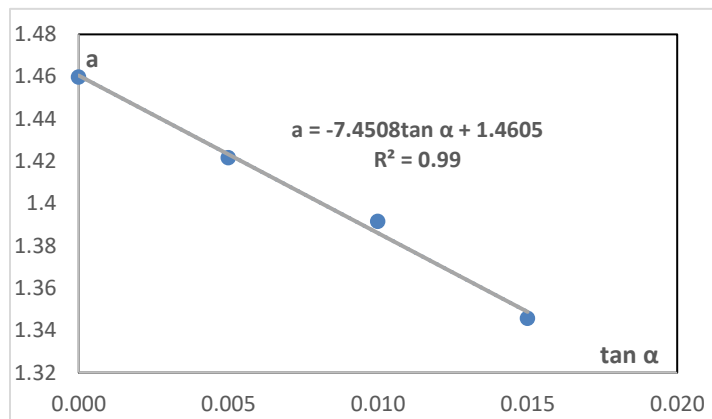


Figure III.39 : Corrélation du facteur a avec le $\tan (\alpha)$

Remplaçant les paramètres 'a' par leurs expressions respectives dans la relation $s/h_1 = a F_1 + b$

On :

$$\frac{s}{h_1} = [-7,4508 \tan(\alpha) + 1,4605]F_1 - 7,5313\varepsilon/(B - b) - 2,0297 \quad ; \tan \alpha = 0\% \quad (3.26)$$

$$\frac{s}{h_1} = [-7,4508 \tan(\alpha) + 1,4605]F_1 - 7,8708\varepsilon/(B - b) - 0,8439 \quad ; \tan \alpha = 0,5\% \quad (3.27)$$

$$\frac{s}{h_1} = [-7,4508 \tan(\alpha) + 1,4605]F_1 - 7,5696\varepsilon/(B - b) - 0,0187 \quad ; \tan \alpha = 1\% \quad (3.28)$$

$$\frac{s}{h_1} = [-7,4508 \tan(\alpha) + 1,4605]F_1 - 8,3659\varepsilon/(B - b) + 0,9115 \quad ; \tan \alpha = 1,5\% \quad (3.29)$$

Le tableau représente les valeurs « b' » du coefficient de rugosité avec l'angle d'inclinaison du Canal.

Tableau III.52 : Facteur b' de corrélations

Tan (α)	a'	b'	R^2
0,000	-7,5313	-2,0297	0,97
0,005	-7,8708	-0,8439	0,97
0,010	-7,5696	-0,0187	0,96
0,015	-8,3659	0,9115	0,99
	$a' \approx -7,8344$		

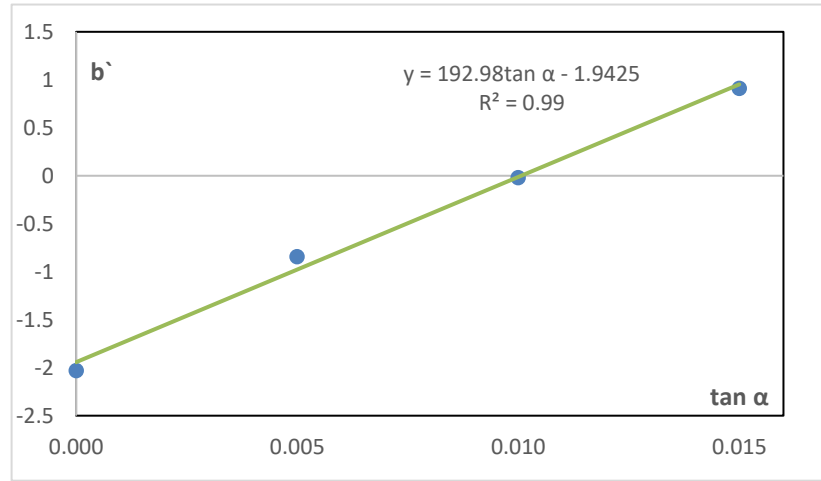


Figure III.40 : Corrélation du facteur b' avec le tang (α)

Il serait pratique de reformuler les quatre relations en une équation inclusive sous la forme approximative suivante :

$$s/h_1 = [-7,4508 \tan(\alpha) + 1,4605]F_1 - 7,8344 \frac{\varepsilon}{B-b} + 192,98 \tan \alpha - 1,9425 \quad (3.30)$$

$$2,03 \leq F_1 \leq 7,87 \quad 0,000 \leq \frac{\varepsilon}{B-b} \leq 0,113 \quad 0 \leq \tan(\alpha) \leq 0,015$$

La validité de la comparaison entre l'approche globale adimensionnelle $s/h_{1\text{relation}}$ et les valeurs expérimentales $s/h_{1\text{exp}}$ est clairement démontrée dans la Figure III.43. L'excellente superposition des points expérimentaux sur la première bissectrice atteste de la robustesse et de la cohérence du modèle proposé. Par ailleurs, les écarts relatifs observés, majoritairement inférieurs à 5 %, confirment la précision satisfaisante des estimations numériques tout en garantissant une exploitation fiable des résultats. Le très fort coefficient de corrélation ($R^2 = 0,9991$) traduit une concordance quasi parfaite entre les prédictions du modèle et les données expérimentales. La haute précision de la modélisation est également mise en évidence par la faible valeur de l'erreur absolue moyenne (MAE = 0,105). Enfin, la faible erreur relative moyenne (MRE = 0,023) ainsi que son écart-type réduit ($\sigma_{RE} = 0,019$) soulignent la cohérence interne et la fiabilité globale du modèle développé.

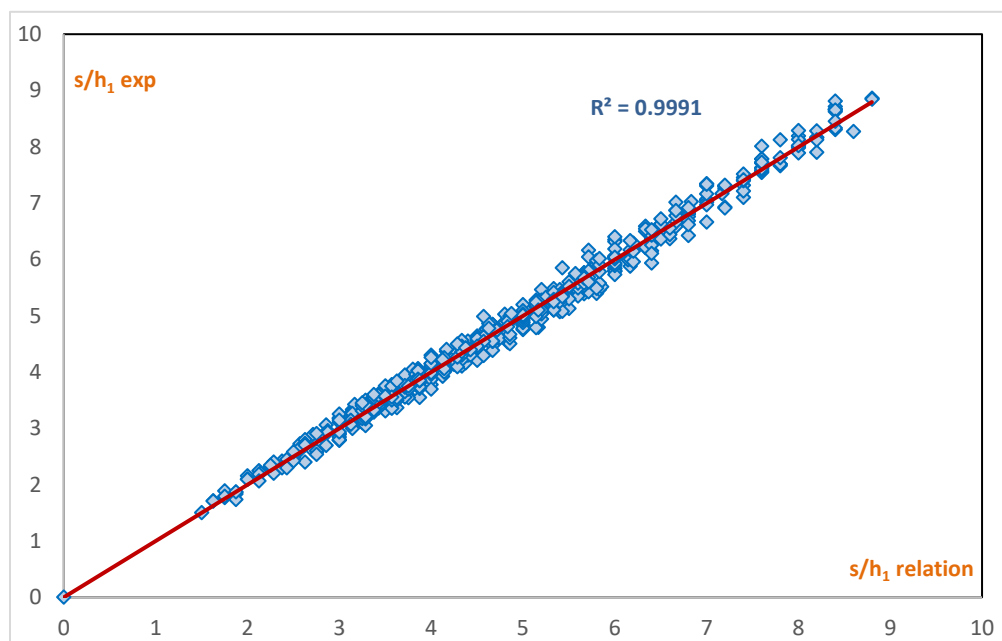


Figure III.41 : Comparaison entre s/h_1 expérimentale et l'approche globale $f(\tan(\alpha), \varepsilon/(B-b), F_1)$

Tableau III.53 : Erreur relative en (%) entre s/h_1 expérimentale et s/h_1 relation selon (la rugosité 00 mm)

Rugosité 00 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$
6,40	6,35	0,76	4,40	4,27	2,91	7,80	7,69	1,41	5,20	5,10	4,66
6,80	6,80	0,00	4,80	4,65	3,09	8,20	8,28	-1,02	5,60	5,58	5,14
7,20	7,26	-0,77	5,20	5,28	-1,47	4,33	4,56	-5,27	6,00	5,93	5,49
7,60	7,72	-1,57	5,60	5,68	-1,40	4,67	4,74	-1,54	6,20	6,29	5,85
8,00	8,19	-2,38	6,40	6,42	-0,34	5,83	5,78	0,86	6,80	6,88	6,44
8,40	8,67	-3,21	7,20	6,93	3,72	6,17	6,17	-0,03	7,40	7,41	6,97
4,00	4,03	-0,80	7,60	7,54	0,77	6,50	6,63	-1,96	7,80	7,81	7,37
4,17	4,37	-4,81	5,00	4,84	3,11	7,17	7,17	0,01	5,33	5,29	4,85
4,33	4,37	-0,77	2,50	2,43	2,71	4,00	4,00	0,10	5,67	5,58	5,14
4,50	4,64	-3,09	2,75	2,72	1,08	4,14	4,14	0,04	6,00	6,05	5,61
4,67	4,85	-3,84	3,00	2,89	3,72	4,43	4,39	0,94	4,57	4,62	4,18
4,67	4,85	-3,84	3,25	3,23	0,56	4,86	4,89	-0,72	4,86	4,99	4,55
5,00	5,20	-3,90	3,50	3,45	1,39	5,14	5,15	-0,17	5,14	5,19	4,75
5,33	5,48	-2,73	3,75	3,58	4,40	5,43	5,42	0,24	3,75	3,70	3,26
5,67	5,77	-1,75	4,00	3,90	2,46	5,57	5,68	-2,02	3,88	3,84	3,40
6,00	6,35	-5,86	4,25	4,13	2,78	3,13	3,27	-4,59	4,13	4,22	3,78
6,33	6,50	-2,63				3,38	3,35	0,82	4,38	4,42	3,98
6,67	6,88	-3,13				3,50	3,55	-1,36	4,63	4,86	4,42
3,14	3,33	-6,11				3,75	3,71	1,04			
3,29	3,50	-6,51				4,50	4,61	-2,35			
3,43	3,61	-5,30				5,00	4,96	0,74			

3,57	3,78	-5,78				5,25	5,33	-1,51			
3,71	3,95	-6,26									
3,86	4,06	-5,27									
4,00	4,06	-1,51									
4,29	4,35	-1,44									
5,43	5,85	-7,74									
5,71	6,16	-7,83									

Tableau III.54 : Erreur relative en (%) entre s/h_1 expérimentale et s/h_1 relation selon (la rugosité 06 mm)

Rugosité 06 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$
4,40	4,53	-2,90	5,00	4,83	3,34	6,00	5,79	3,50	8,40	8,33	7,89
4,80	4,86	-1,35	5,40	5,07	6,05	6,40	6,10	4,61	4,17	4,40	3,96
5,20	5,29	-1,80	5,80	5,40	6,93	6,80	6,42	5,52	4,50	4,57	4,13
5,60	5,47	2,36	7,00	6,66	4,84	7,20	6,91	3,97	4,83	4,90	4,46
6,00	5,91	1,53	7,40	7,10	4,08	7,60	7,58	0,21	5,17	5,25	4,81
6,40	6,36	0,68	8,20	7,90	3,62	8,00	8,01	-0,15	5,50	5,60	5,16
6,80	6,81	-0,18	8,60	8,27	3,85	8,40	8,62	-2,67	5,83	5,90	5,46
7,60	7,56	0,55	4,50	4,21	6,49	5,00	4,78	4,43	6,33	6,59	6,15
8,00	8,13	-1,62	4,83	4,53	6,26	5,33	5,21	2,25	6,67	6,78	6,34
8,40	8,71	-3,71	5,17	4,79	7,22	5,67	5,53	2,39	7,00	7,17	6,73
3,67	3,72	-1,50	5,50	5,13	6,78	6,00	5,92	1,33	3,71	3,73	3,29
4,00	3,99	0,22	5,83	5,47	6,30	3,14	3,27	-3,96	3,86	3,91	3,47
4,33	4,26	1,59	6,17	5,88	4,64	3,43	3,36	1,95	4,14	4,18	3,74
4,67	4,47	4,17	6,50	6,45	0,83	3,71	3,55	4,36	4,43	4,41	3,97
5,00	4,75	4,96	3,00	2,79	6,85	4,00	3,70	7,56	4,71	4,74	4,30
5,33	5,11	4,25	3,00	2,84	5,19	4,29	4,09	4,49	5,00	5,03	4,59
5,67	5,61	0,94	3,29	3,05	7,30	4,57	4,30	6,04	5,43	5,38	4,94
6,33	6,21	2,01	5,86	5,52	5,84	4,86	4,60	5,21	5,71	5,79	5,35
6,67	6,58	1,25	6,14	5,99	2,48	5,14	5,08	1,24	6,00	6,32	5,88
7,00	7,04	-0,62	2,63	2,40	8,47	5,43	5,35	1,47	3,25	3,44	3,00
1,63	1,71	-5,36	2,75	2,57	6,46	5,71	5,68	0,62	3,38	3,55	3,11
1,75	1,89	-7,94	3,00	2,79	7,06	3,00	3,19	-6,18			
2,00	2,16	-7,95	3,63	3,37	7,12	3,25	3,31	-1,80			
2,13	2,25	-5,89	3,88	3,55	8,39	3,50	3,52	-0,47			
2,25	2,30	-2,04	4,13	3,92	4,91	3,75	3,73	0,58			
2,38	2,34	1,39	4,38	4,16	4,91	4,00	3,99	0,33			
2,50	2,48	0,77									
2,75	2,62	4,69									
3,00	2,91	3,16									
3,25	3,10	4,69									
3,50	3,44	1,72									

Tableau III.55 : Erreur relative en (%) entre s/h_1 expérimentale et s/h_1 relation selon (la rugosité 08 mm)

Rugosité 08 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$
3,80	4,05	-6,52	6,40	6,26	2,26	5,00	4,88	2,45	7,60	7,61	7,17
4,00	4,30	-7,41	6,40	6,43	-0,42	5,40	5,26	2,67	8,00	8,02	7,58
4,40	4,55	-3,36	6,80	6,69	1,66	5,80	5,49	5,41	4,33	4,36	3,92
4,80	4,89	-1,82	7,40	7,22	2,49	6,20	5,96	3,92	4,50	4,59	4,15
5,20	5,15	1,04	7,80	7,66	1,73	6,60	6,44	2,44	5,00	4,98	4,54
5,60	5,41	3,44	8,40	8,31	1,12	7,00	7,02	-0,22	5,33	5,28	4,84
6,00	6,03	-0,47	2,71	2,60	4,32	7,80	7,69	1,38	5,67	5,70	5,26
6,40	6,30	1,58	2,86	2,70	5,62	8,20	8,13	0,91	6,00	6,19	5,75
6,80	6,76	0,64	3,14	3,00	4,54	8,40	8,65	-3,02	6,50	6,63	6,19
7,40	7,32	1,14	4,86	4,50	7,26	3,00	2,93	2,22	6,67	7,02	6,58
8,00	7,98	0,23	5,14	4,79	6,90	3,29	3,17	3,63	7,00	7,35	6,91
8,40	8,66	-3,12	5,43	5,08	6,51	3,57	3,36	6,01	3,43	3,58	3,14
3,00	3,11	-3,73	5,71	5,43	5,04	3,57	3,50	1,96	3,71	3,76	3,32
3,17	3,24	-2,40	6,00	5,84	2,62	4,14	4,00	3,56	3,86	4,03	3,59
3,33	3,44	-3,22	2,38	2,30	3,28	4,43	4,30	2,88	4,00	4,26	3,82
3,50	3,57	-2,11	2,50	2,42	3,01	4,86	4,67	3,94	4,29	4,50	4,06
3,67	3,78	-2,97	2,75	2,60	5,56	5,14	5,09	0,98	4,57	4,98	4,54
4,00	3,91	2,22	3,25	3,17	2,35	2,63	2,80	-6,51	5,14	5,23	4,79
4,21	4,12	2,22	3,50	3,31	5,42	2,88	2,96	-2,83	5,57	5,75	5,31
4,33	4,32	0,21	3,75	3,54	5,58	3,13	3,12	0,17	6,00	6,01	5,57
4,67	4,75	-1,69	4,00	3,77	5,63	3,38	3,29	2,67	3,00	3,25	2,81
5,00	5,03	-0,61				3,63	3,50	3,58	3,25	3,40	2,96
5,33	5,39	-1,11				3,88	3,71	4,28	3,50	3,55	3,11
5,67	5,76	-1,65							3,75	3,75	3,31
6,00	6,06	-0,97									
6,67	6,66	0,03									
2,00	2,10	-5,12									
2,14	2,21	-3,01									
2,29	2,26	1,12									
2,43	2,37	2,57									
1,88	1,83	2,37									

Tableau III.56 : Erreur relative en (%) entre s/h_1 expérimentale et s/h_1 relation selon (la rugosité 10 mm)

Rugosité 10 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$
4,80	4,74	1,26	4,00	4,14	-3,60	5,20	5,03	4,59	7,20	7,31	6,87
5,20	5,08	2,21	4,40	4,30	2,26	5,60	5,49	5,05	7,60	7,71	7,27
5,60	5,44	2,94	4,80	4,70	2,14	6,00	5,73	5,29	8,40	8,45	8,01
6,00	5,79	3,49	5,20	4,94	5,02	6,80	6,62	6,18	4,67	4,55	4,11
6,40	6,15	3,89	5,60	5,35	4,48	7,20	7,29	6,85	5,00	5,01	4,57
6,80	6,89	-1,28	6,40	5,94	7,24	7,60	7,63	7,19	5,33	5,25	4,81
7,40	7,45	-0,70	6,60	6,37	3,55	8,00	7,89	7,45	5,67	5,67	5,23

7,80	8,12	-4,15	7,00	7,07	-0,97	8,80	8,86	8,42	6,00	6,04	5,60
8,40	8,81	-4,88	7,40	7,52	-1,58	4,33	4,30	3,86	6,33	6,55	6,11
3,17	3,43	-8,19	8,20	8,16	0,51	4,67	4,54	4,10	6,67	6,87	6,43
3,33	3,49	-4,79	3,33	3,35	-0,40	5,00	4,92	4,48	7,00	7,33	6,89
3,50	3,70	-5,59	3,50	3,47	0,84	5,33	5,11	4,67	3,57	3,75	3,31
3,67	3,76	-2,64	3,83	3,85	-0,40	3,29	3,21	2,77	3,86	4,02	3,58
4,00	3,97	0,78	4,00	4,11	-2,63	3,43	3,40	2,96	4,14	4,26	3,82
4,33	4,11	5,23	4,33	4,24	2,26	5,71	5,61	5,17	4,57	4,54	4,10
4,67	4,39	6,02	5,00	4,97	0,68	6,00	5,89	5,45	5,14	4,99	4,55
5,67	5,39	4,86	5,33	5,10	4,33	2,63	2,73	2,29	5,43	5,34	4,90
6,00	5,84	2,74	5,67	5,65	0,21	2,88	2,93	2,49	5,71	5,60	5,16
6,33	6,21	1,92	6,00	5,80	3,41	3,13	3,14	2,70	6,00	6,40	5,96
1,75	1,77	-1,30	2,29	2,20	3,59	3,38	3,35	2,91	3,38	3,60	3,16
1,88	1,86	0,62	2,43	2,30	5,24	3,63	3,56	3,12	3,63	3,84	3,40
2,00	2,09	-4,62	1,88	1,73	7,53	3,88	3,73	3,29			
2,13	2,19	-2,83	2,13	2,06	2,83	4,13	4,09	3,65			
2,25	2,33	-3,35	2,75	2,54	7,77	3,13	3,14	2,70			
2,38	2,42	-1,87	3,00	2,80	6,63	3,38	3,35	2,91			
2,50	2,51	-0,57	4,00	3,86	3,39	3,63	3,56	3,12			
2,75	2,66	3,37	4,25	4,20	1,11	3,88	3,73	3,29			
			4,75	4,60	3,22	4,13	4,09	3,65			

Tableau III.57 : Erreur relative en (%) entre s/h_1 expérimentale et s/h_1 relation selon (la rugosité 12 mm)

Rugosité 12 mm											
Tang (α) = 0			Tang (α) = 0,005			Tang (α) = 0,01			Tang (α) = 0,015		
s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$	s/h_1 exp	s/h_1 rel	$\frac{\Delta s/h_1}{s/h_1} \%$
4,40	4,42	-0,48	3,80	3,76	0,93	5,80	5,98	5,54	6,40	6,53	6,09
4,60	4,76	-3,56	4,20	4,15	1,13	6,20	6,14	5,70	6,80	6,92	6,48
4,80	5,02	-4,67	5,00	4,95	0,91	6,60	6,55	6,11	7,20	7,32	6,88
5,20	5,46	-5,09	5,40	5,28	2,14	7,00	6,97	6,53	7,60	7,72	7,28
5,40	5,46	-1,19	7,60	8,01	-5,40	7,40	7,40	6,96	4,50	4,46	4,02
5,80	5,91	-1,94	8,00	8,29	-3,62	8,80	8,85	8,41	4,83	4,81	4,37
6,40	6,37	0,49	2,83	2,89	-2,11	3,83	3,85	3,41	5,17	5,10	4,66
6,80	6,83	-0,48	3,33	3,26	2,18	4,00	4,15	3,71	5,50	5,52	5,08
7,20	7,30	-1,44	3,67	3,57	2,53	4,33	4,46	4,02	5,83	6,02	5,58
7,60	7,78	-2,40	4,00	3,96	1,06	4,67	4,77	4,33	6,17	6,33	5,89
3,17	3,15	0,68	4,33	4,22	2,66	5,00	5,09	4,65	6,50	6,72	6,28
3,33	3,48	-4,40	4,67	4,55	2,51	5,33	5,41	4,97	3,29	3,42	2,98
3,50	3,75	-7,21	5,00	4,89	2,27	5,67	5,74	5,30	3,57	3,55	3,11
3,83	3,96	-3,28	5,50	5,30	3,67	3,43	3,45	3,01	3,86	3,87	3,43
2,43	2,45	-0,80	5,83	5,58	4,39	3,71	3,65	3,21	4,14	4,06	3,62
2,57	2,61	-1,61	6,17	6,00	2,67	4,29	4,26	3,82	4,43	4,39	3,95
2,57	2,72	-5,91	6,50	6,36	2,11	4,71	4,74	4,30	3,00	3,14	2,70
2,71	2,89	-6,50	6,83	7,02	-2,80	5,00	4,96	4,52	3,25	3,45	3,01
2,86	3,06	-7,10	2,29	2,40	-5,04	2,25	2,34	1,90	3,50	3,57	3,13
3,00	3,17	-5,78	2,57	2,65	-3,19	2,50	2,58	2,14	3,88	3,85	3,41
3,14	3,17	-0,97	1,50	1,50	-0,31	2,63	2,70	2,26	4,13	4,22	3,78
5,14	5,27	-2,57	1,63	1,71	-5,16	2,75	2,91	2,47	4,38	4,43	3,99
5,71	6,04	-5,74	1,75	1,79	-2,38	3,13	3,07	2,63	4,63	4,78	4,34
7,00	7,30	-4,34	1,88	1,88	0,00	3,38	3,33	2,89	4,88	5,04	4,60
7,60	7,78	-2,40				3,63	3,54	3,10			
8,20	8,17	0,36									

III.2.5 Rendement du ressaut hydraulique :

Le ressaut hydraulique est le passage brutal d'un écoulement supercritique (rapide, torrentiel) à un écoulement subcritique (lent, fluvial). Ce phénomène entraîne une forte dissipation d'énergie sous forme de turbulences, de remous et de pertes de charge.

Le rendement du ressaut hydraulique est une notion utilisée en hydraulique pour évaluer l'efficacité énergétique du ressaut, c'est-à-dire la proportion d'énergie dissipée par rapport à l'énergie initiale de l'écoulement.

Le rendement du ressaut se définit généralement comme :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} \quad (3.31)$$

ΔH : perte de charge (différence d'énergie spécifique entre l'amont et l'aval du ressaut).

H_1 : énergie spécifique initiale en amont du ressaut.

Autrement dit, c'est le rapport entre l'énergie dissipée par le ressaut et l'énergie totale disponible avant celui-ci.

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad (3.32)$$

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 :

$$H_1 = h_1 \cos \alpha + \frac{V_1^2}{2g} \quad (3.33)$$

$$H_2 = h_2 \cos \alpha + \frac{V_2^2}{2g} \quad (3.34)$$

V_1 et V_2 étant respectivement les vitesses à l'amont et à l'aval du ressaut en (m/s).

g : L'accélération de la pesanteur en (m/s²).

On a : $Q = V \cdot A$ donc $V = \frac{Q}{A}$

Nous substituons la valeur de V dans les équations (3.33) et (3.34) respectivement.

$$H_1 = h_1 \cos \alpha + \frac{Q^2}{2gA_1^2} \quad (3.35)$$

$$H_2 = h_2 \cos \alpha + \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (3.36)$$

Sachant que : $A_1 = b \cdot h_1$ et $A_2 = B(h_2 - h) + b \cdot h$

$$F_1 = Q/\sqrt{b^2 h_1^3 g} \quad \text{avec : } \beta = \frac{b}{B}, \quad \tau = \frac{h_1}{h} \quad \text{et} \quad Y = \frac{h_2}{h_1}$$

Le facteur F_1 s'écrit comme suit :

$$F_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 h_1^3 g}} \Rightarrow Q = F_1 \sqrt{b^2 h_1^3 g} = F_1 b h_1^{3/2} \sqrt{g}$$

$$Q^2 = F_1^2 b^2 h_1^3 g$$

L'expression de vitesse V_1 :

$$A_1 = b \cdot h_1$$

$$V_1 = Q/A_1 = \frac{F_1 b h_1^{3/2} \sqrt{g}}{b h_1} = F_1 h_1^{1/2} \sqrt{g}$$

$$\frac{V_1^2}{2g} = \frac{(F_1 h_1^{1/2} \sqrt{g})^2}{2g} = \frac{F_1^2 h_1 g}{2g} = \frac{F_1^2 h_1}{2}$$

L'expression de vitesse V_2 :

Exprimons A_2 en utilisant Y et τ

$$h_2 = Y h_1, \quad h = \frac{h_1}{\tau}$$

$$\begin{aligned} A_2 &= B(h_2 - h) + b \cdot h = B\left(Y h_1 - \frac{h_1}{\tau}\right) + b \frac{h_1}{\tau} \\ &= B h_1 \left(Y - \frac{1}{\tau}\right) + \beta B \frac{h_1}{\tau} = B h_1 \left[Y - \frac{1}{\tau} + \frac{\beta}{\tau}\right] \\ &= B h_1 \left[Y + \frac{\beta - 1}{\tau}\right] \end{aligned}$$

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{F_1 b h_1^{3/2} \sqrt{g}}{B h_1 \left[Y + \frac{\beta - 1}{\tau}\right]} = \frac{F_1 \beta B h_1^{3/2} \sqrt{g}}{B h_1 \left[Y + \frac{\beta - 1}{\tau}\right]} = \frac{F_1 \beta h_1^{1/2} \sqrt{g}}{Y + \frac{\beta - 1}{\tau}}$$

$$\frac{V_2^2}{2g} = \frac{\left(\frac{F_1 \beta h_1^{1/2} \sqrt{g}}{Y + \frac{\beta - 1}{\tau}}\right)^2}{2g} = \frac{F_1^2 \beta^2 h_1 g}{2g \left[Y + \frac{\beta - 1}{\tau}\right]^2} = \frac{F_1^2 \beta^2 h_1}{2 \left[Y + \frac{\beta - 1}{\tau}\right]^2}$$

Expression de H_1 et H_2

Pour H_1 :

$$H_1 = h_1 \cos \alpha + \frac{V_1^2}{2g} = h_1 \cos \alpha + \frac{F_1^2 h_1}{2} = h_1 \left(\cos \alpha + \frac{F_1^2}{2}\right)$$

Pour H_2 :

$$H_2 = h_2 \cos \alpha + \frac{V_2^2}{2g} = Y h_1 \cos \alpha + \frac{F_1^2 \beta^2 h_1}{2 \left[Y + \frac{\beta-1}{\tau} \right]^2} = h_1 \left(Y \cos \alpha + \frac{F_1^2 \beta^2}{2 \left[Y + \frac{\beta-1}{\tau} \right]^2} \right)$$

$$\frac{H_2}{H_1} = \frac{h_1 \left(Y \cos \alpha + \frac{F_1^2 \beta^2}{2 \left[Y + \frac{\beta-1}{\tau} \right]^2} \right)}{h_1 \left(\cos \alpha + \frac{F_1^2}{2} \right)} = \frac{Y \cos \alpha + \frac{F_1^2 \beta^2}{2 \left[Y + \frac{\beta-1}{\tau} \right]^2}}{\cos \alpha + \frac{F_1^2}{2}}$$

Récapitulons la détermination du rendement η en remplaçant chaque paramètre par son expression dans la relation :

$$\eta = \frac{\Delta H}{H_1} = 1 - \frac{H_2}{H_1} = 1 - \frac{Y \cos \alpha + \frac{F_1^2 \beta^2}{2 \left[Y + \frac{\beta-1}{\tau} \right]^2}}{\cos \alpha + \frac{F_1^2}{2}}$$

Le rendement devient ainsi :

$$\eta = 1 - \frac{Y \cos \alpha + \frac{F_1^2 \beta^2}{2 \left[Y + \frac{\beta-1}{\tau} \right]^2}}{\cos \alpha + \frac{F_1^2}{2}} \quad (3.37)$$

La relation (3.37) définit le rendement du ressaut hydraulique, lorsqu'il est contrôlé par un seuil, dans un canal rectangulaire de section composée à pente positive. Ce rendement est exprimé en fonction de Y , le rapport des hauteurs conjuguées, de F_1 , le nombre de Froude de l'écoulement incident, ainsi que de α , l'angle d'inclinaison du canal par rapport à l'horizontale.

L'étude expérimentale du rendement du ressaut hydraulique η pour les rugosités considérées a conduit aux figures (III.42) - (III.45), laquelle illustre son évolution en fonction du nombre de Froude pour les différentes rugosités à diverses pentes d'inclinaison.

On observe que, pour un même nombre de Froude F_1 , le rendement η augmente à mesure que la rugosité diminue dans les pentes étudiées.

Ainsi, on peut en conclure que la rugosité du lit majeur du canal rectangulaire composé favorise la dissipation de l'énergie.

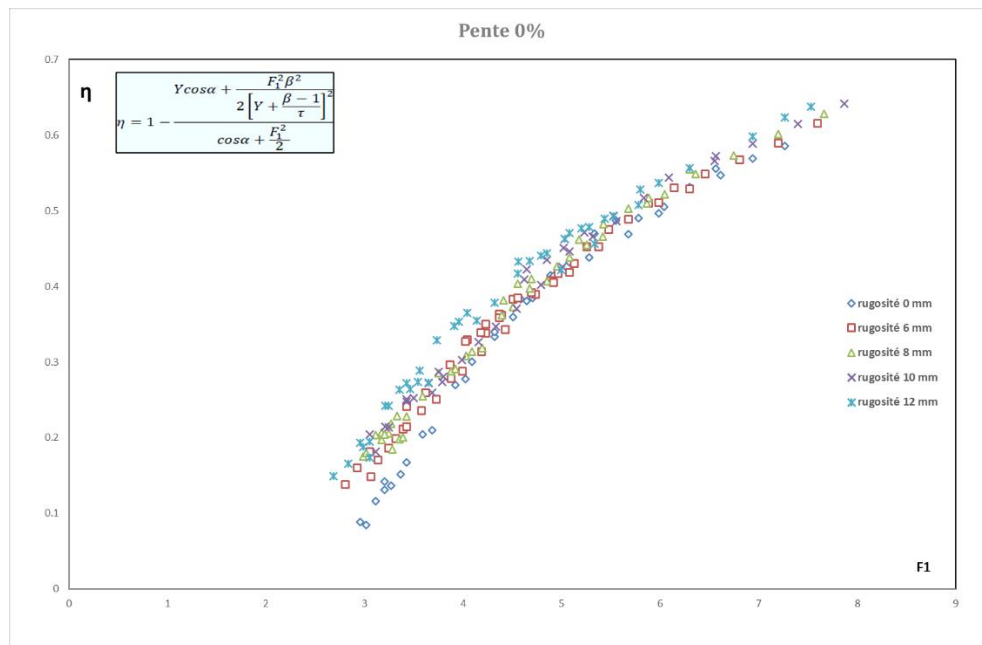


Figure III.42: Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour la pente 0%.

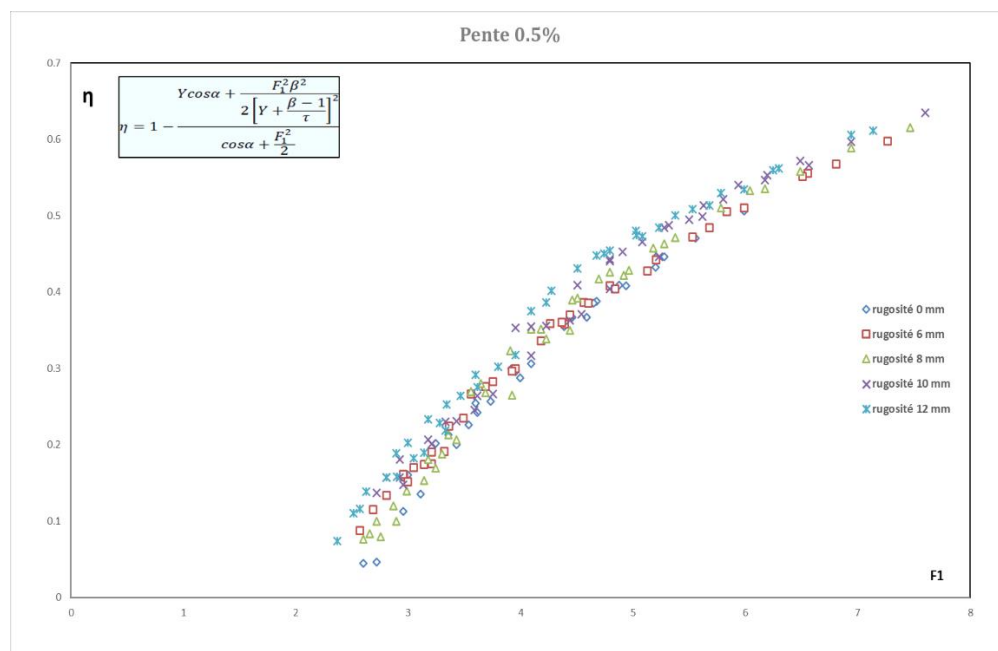


Figure III.43 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour la pente 0.5%

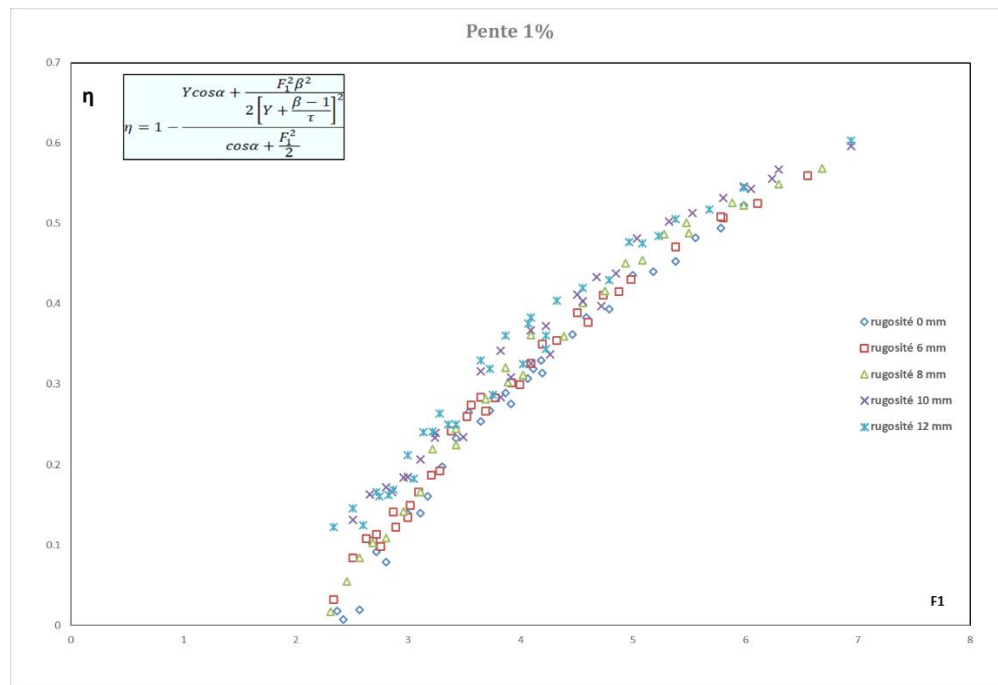


Figure III.44 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour la pente 1%

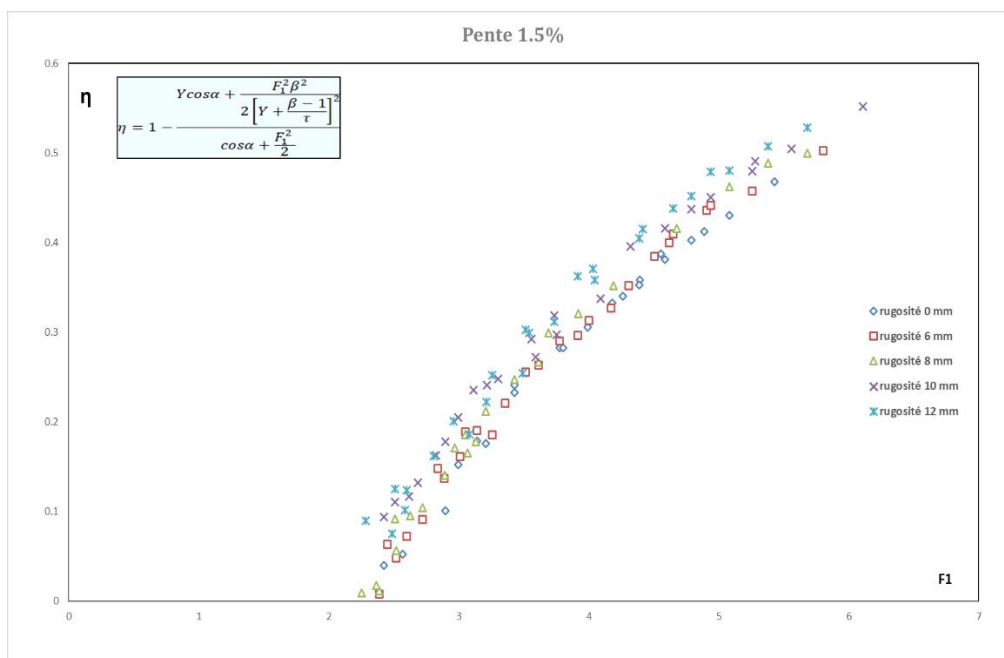


Figure III.45 : Variation du rendement η en fonction du nombre de Froude F_1 pour la pente 1.5%

Tableau III.58 : Données expérimentales de rendement en fonction de nombre de Froude*pour la pente 0 %*

Pente 0 %									
Rugosité 0 mm		Rugosité 6 mm		Rugosité 8 mm		Rugosité 10 mm		Rugosité 12 mm	
F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η
5,68	0,47	4,23	0,34	4,39	0,36	4,62	0,41	4,56	0,43
5,99	0,50	4,39	0,36	4,51	0,37	4,85	0,44	4,68	0,43
6,30	0,53	4,51	0,38	4,68	0,40	5,02	0,45	4,85	0,44
6,62	0,55	4,73	0,39	4,85	0,41	5,08	0,45	5,08	0,47
6,94	0,57	4,96	0,42	5,08	0,44	5,32	0,47	5,20	0,48
7,27	0,59	5,26	0,45	5,26	0,45	5,56	0,49	5,44	0,49
4,09	0,30	5,38	0,45	5,86	0,51	6,55	0,57	5,80	0,53
4,32	0,33	5,68	0,49	6,05	0,52	6,94	0,59	5,99	0,54
4,32	0,34	5,99	0,51	6,36	0,55	7,40	0,61	6,30	0,56
4,51	0,36	6,30	0,53	6,74	0,57	7,87	0,64	6,94	0,60
4,65	0,38	6,81	0,57	7,20	0,60	4,65	0,42	7,27	0,62
4,89	0,41	7,20	0,59	7,67	0,63	5,03	0,46	7,53	0,64
5,08	0,43	7,60	0,62	4,41	0,38	5,23	0,47	3,56	0,29
5,28	0,44	3,87	0,30	4,55	0,40	5,53	0,49	3,73	0,33
5,68	0,49	4,05	0,33	4,70	0,41	5,83	0,52	3,91	0,35
5,78	0,49	4,18	0,34	5,18	0,46	6,09	0,54	3,96	0,35
6,04	0,51	4,37	0,36	5,43	0,48	6,56	0,57	4,05	0,36
6,56	0,56	4,55	0,38	5,68	0,50	3,21	0,21	4,14	0,35
4,39	0,36	4,70	0,39	5,88	0,52	3,25	0,21	4,32	0,38
4,59	0,38	4,89	0,41	6,30	0,56	3,43	0,25	4,55	0,42
4,71	0,38	5,13	0,43	3,17	0,20	3,43	0,25	4,79	0,44
4,91	0,41	5,48	0,47	3,25	0,21	3,50	0,25	5,03	0,46
5,33	0,47	5,88	0,51	3,28	0,18	3,65	0,27	5,28	0,48
5,55	0,49	6,14	0,53	3,36	0,20	3,69	0,26	5,53	0,49
2,96	0,09	6,46	0,55	3,39	0,20	3,80	0,28	5,78	0,51
3,02	0,08	3,07	0,15	3,88	0,29	3,05	0,20	3,21	0,24
3,11	0,12	3,14	0,17	4,03	0,31	3,11	0,18	3,25	0,24
3,21	0,14	3,25	0,19	4,96	0,43	3,75	0,29	3,36	0,26
3,21	0,13	3,32	0,20	5,42	0,47	3,79	0,27	3,43	0,27
3,27	0,14	3,39	0,21	2,99	0,17	3,99	0,30	3,46	0,26
3,36	0,15	3,43	0,21	3,02	0,18	4,16	0,33	3,54	0,27
3,43	0,17	3,58	0,24	3,11	0,20	4,33	0,35	3,65	0,27
3,59	0,20	3,73	0,25	3,17	0,21	4,54	0,37	5,00	0,42
3,69	0,21	3,88	0,28	3,21	0,20	4,79	0,40	5,33	0,46
3,92	0,27	3,99	0,29	3,27	0,22	5,01	0,43	2,69	0,15
4,02	0,28	4,19	0,31	3,33	0,23			2,84	0,17
4,19	0,31	4,43	0,34	3,43	0,23			2,96	0,19
		4,91	0,41	3,59	0,25			2,99	0,19
		5,08	0,42	3,75	0,29			3,05	0,19
		2,81	0,14	3,92	0,29			3,05	0,17
		2,93	0,16	4,09	0,31				
		3,05	0,18	4,19	0,32				
		3,43	0,24						
		3,62	0,26						
		4,02	0,33						
		4,23	0,35						
		4,37	0,36						

Tableau III.59 : Données expérimentales de rendement en fonction de nombre de Froude
pour la pente 0,5 %

Pente 0,5 %									
Rugosité 0 mm		Rugosité 6 mm		Rugosité 8 mm		Rugosité 10 mm		Rugosité 12 mm	
F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η
4,68	0,39	4,39	0,36	4,23	0,34	4,79	0,44	4,23	0,39
5,20	0,43	4,56	0,39	4,51	0,39	4,91	0,45	4,68	0,45
5,56	0,47	4,79	0,41	4,96	0,43	5,32	0,49	4,79	0,45
5,99	0,51	5,68	0,48	5,38	0,47	5,50	0,49	5,02	0,48
3,43	0,20	5,99	0,51	6,17	0,54	5,62	0,50	5,08	0,47
3,60	0,25	6,55	0,56	6,49	0,56	5,80	0,52	5,38	0,50
3,73	0,26	6,81	0,57	6,94	0,59	6,17	0,55	5,68	0,51
3,96	0,30	7,27	0,60	7,47	0,62	6,49	0,57	5,99	0,53
4,09	0,31	3,56	0,27	3,56	0,27	6,94	0,60	6,30	0,56
4,46	0,37	3,69	0,28	3,64	0,28	7,60	0,63	6,94	0,61
4,65	0,39	3,96	0,30	3,91	0,32	3,96	0,35	7,13	0,61
4,94	0,41	4,18	0,34	4,09	0,35	4,09	0,35	3,34	0,25
5,28	0,45	4,37	0,36	4,18	0,35	4,23	0,36	3,60	0,29
5,53	0,47	4,60	0,39	4,46	0,39	4,51	0,41	4,09	0,38
3,00	0,16	4,84	0,40	4,70	0,42	4,79	0,44	4,27	0,40
3,25	0,20	5,13	0,43	4,79	0,43	5,08	0,47	4,51	0,43
3,36	0,21	5,53	0,47	5,18	0,46	5,28	0,48	4,74	0,45
3,54	0,23	5,83	0,51	5,28	0,46	5,63	0,51	5,03	0,47
3,61	0,24	6,51	0,55	5,78	0,51	5,93	0,54	5,23	0,48
3,92	0,30	2,96	0,16	6,04	0,53	6,19	0,55	5,53	0,51
3,99	0,29	3,00	0,15	2,75	0,08	6,56	0,57	5,78	0,53
4,39	0,35	3,14	0,17	2,89	0,10	2,93	0,16	6,25	0,56
4,59	0,37	3,21	0,18	3,14	0,15	3,21	0,20	2,89	0,19
4,87	0,41	3,32	0,19	3,25	0,17	3,61	0,26	3,00	0,20
5,21	0,45	5,21	0,44	3,36	0,21	2,72	0,14	3,17	0,23
2,60	0,04	2,57	0,09	3,69	0,27	2,81	0,16	3,28	0,23
2,72	0,05	2,69	0,12	4,91	0,42	2,93	0,18	3,46	0,26
2,96	0,11	2,81	0,13	2,60	0,08	3,17	0,21	3,61	0,28
3,11	0,14	2,96	0,16	2,66	0,08	2,96	0,15	3,80	0,30
		3,05	0,17	2,72	0,10	3,33	0,23	3,96	0,32
		3,21	0,19	2,87	0,12	3,43	0,23	2,37	0,07
		3,36	0,22	2,99	0,14	3,59	0,25	2,51	0,11
		3,49	0,24	3,17	0,18	3,75	0,27	2,57	0,12
		3,75	0,28	3,30	0,19	4,09	0,32	2,63	0,14
		3,92	0,30	3,43	0,21	4,44	0,36	2,81	0,16
		4,26	0,36	3,92	0,27	4,54	0,37	2,90	0,16
		4,44	0,37	4,44	0,35	4,79	0,40	3,05	0,18
						5,23	0,45	3,14	0,19
								3,33	0,22

Tableau III.60 : Données expérimentales de rendement en fonction de nombre de Froude
pour la pente 1 %

Pente 1 %									
Rugosité 0 mm		Rugosité 6 mm		Rugosité 8 mm		Rugosité 10 mm		Rugosité 12 mm	
F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η
4,06	0,31	4,51	0,39	5,08	0,45	4,51	0,41	4,96	0,48
5,56	0,48	4,73	0,41	5,50	0,49	4,68	0,43	5,08	0,48

5,99	0,52	5,80	0,51	5,99	0,52	4,85	0,44	5,38	0,51
3,30	0,20	6,11	0,52	6,30	0,55	5,32	0,50	5,68	0,52
3,43	0,23	6,55	0,56	6,68	0,57	5,80	0,53	5,99	0,54
3,64	0,25	3,09	0,17	3,22	0,22	6,05	0,54	6,94	0,60
3,87	0,29	3,39	0,24	3,43	0,24	6,24	0,56	3,22	0,24
4,18	0,33	3,56	0,27	3,87	0,32	6,94	0,60	3,64	0,33
4,46	0,36	3,64	0,28	4,09	0,36	3,64	0,32	3,87	0,36
4,79	0,39	3,78	0,28	4,55	0,40	3,82	0,34	4,09	0,38
5,18	0,44	4,09	0,33	4,94	0,45	4,09	0,37	4,32	0,40
5,38	0,45	4,32	0,35	5,28	0,49	4,23	0,37	4,55	0,42
5,78	0,49	4,60	0,38	5,48	0,50	4,55	0,40	5,23	0,48
2,72	0,09	4,98	0,43	5,88	0,53	5,03	0,48	2,72	0,17
2,89	0,12	5,38	0,47	4,39	0,36	5,53	0,51	2,82	0,16
3,00	0,14	5,78	0,51	4,75	0,42	5,99	0,55	3,00	0,21
3,17	0,16	2,69	0,11	2,31	0,02	6,30	0,57	3,14	0,24
3,54	0,27	2,75	0,10	2,45	0,05	2,86	0,17	3,28	0,26
3,73	0,27	2,89	0,12	2,57	0,08	3,00	0,18	3,36	0,25
3,92	0,28	3,00	0,13	2,69	0,10	3,25	0,24	3,73	0,32
4,11	0,32	3,28	0,19	2,81	0,11	3,92	0,31	4,07	0,38
4,59	0,38	3,99	0,30	2,96	0,14	2,51	0,13	4,23	0,36
5,00	0,44	4,87	0,42	3,11	0,17	2,66	0,16	4,79	0,43
2,37	0,02	2,34	0,03	3,43	0,22	2,81	0,17	2,34	0,12
2,42	0,01	2,51	0,08	3,69	0,28	2,96	0,18	2,51	0,15
2,57	0,02	2,63	0,11	3,89	0,30	3,11	0,21	2,60	0,12
2,81	0,08	2,72	0,11	4,02	0,31	3,24	0,23	2,75	0,16
3,11	0,14	2,87	0,14			3,49	0,23	2,87	0,17
4,19	0,31	3,02	0,15			3,82	0,28	3,05	0,18
		3,21	0,19			4,09	0,33	3,43	0,25
		3,53	0,26			4,26	0,34	3,75	0,29
		3,69	0,27			4,72	0,40	4,02	0,33
		3,92	0,30					4,23	0,34
		4,19	0,35						

Tableau III.61 : Données expérimentales de rendement en fonction de nombre de Froude
pour la pente 1.5 %

Pente 1,5 %									
Rugosité 0 mm		Rugosité 6 mm		Rugosité 8 mm		Rugosité 10 mm		Rugosité 12 mm	
F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η	F _{1exp}	η
4,39	0,36	4,17	0,33	4,68	0,42	4,79	0,44	4,79	0,45
4,79	0,40	4,62	0,40	5,08	0,46	5,26	0,48	5,08	0,48
5,08	0,43	4,91	0,44	5,38	0,49	5,56	0,50	5,38	0,51
3,43	0,24	5,26	0,46	5,68	0,50	6,11	0,55	5,68	0,53
3,78	0,28	5,80	0,50	2,97	0,17	3,22	0,24	3,26	0,25
4,18	0,33	2,89	0,14	3,13	0,18	3,56	0,29	3,51	0,30
4,55	0,39	3,01	0,16	2,39	0,01	3,73	0,32	3,73	0,31
4,89	0,41	3,26	0,19	2,52	0,06	4,32	0,40	4,05	0,36
5,43	0,47	3,51	0,26	2,72	0,10	4,94	0,45	4,41	0,42
2,72	0,09	3,78	0,29	2,89	0,14	5,28	0,49	4,65	0,44
3,00	0,15	4,00	0,31	3,07	0,17	2,62	0,12	4,94	0,48
3,14	0,18	4,51	0,38	3,43	0,25	2,82	0,16	2,49	0,07
3,43	0,23	4,65	0,41	3,61	0,27	3,00	0,21	2,59	0,10
3,80	0,28	4,94	0,44	4,19	0,35	4,59	0,42	2,96	0,20

3,99	0,31	2,39	0,01	2,25	0,01	2,42	0,09	3,21	0,22
4,39	0,35	2,52	0,05	2,37	0,02	2,51	0,11	3,54	0,30
4,59	0,38	2,72	0,09	2,51	0,09	2,69	0,13	3,92	0,36
2,42	0,04	3,14	0,19	2,63	0,10	2,90	0,18	4,03	0,37
2,57	0,05	3,36	0,22	3,05	0,19	3,11	0,24	4,39	0,41
2,90	0,10	3,61	0,26	3,21	0,21	3,30	0,25	2,28	0,09
3,21	0,18	3,92	0,30	3,69	0,30	3,59	0,27	2,51	0,13
4,26	0,34	4,31	0,35	3,92	0,32	3,75	0,30	2,60	0,12
		2,45	0,06			4,09	0,34	2,81	0,16
		2,60	0,07					3,08	0,19
		2,84	0,15					3,49	0,25
		3,05	0,19						

III.3 EXEMPLE D'APPLICATION :

En nous appuyant sur différentes approches fonctionnelles et sur des relations adimensionnelles générales, nous proposons un exercice destiné à vérifier et appliquer les méthodes de calcul des rapports caractéristiques d'un écoulement dans un canal rectangulaire composé, avec lit majeur rugueux et pente positive. Deux voies seront explorées : d'abord, des expériences en laboratoire pour comprendre comment la rugosité et la pente influencent les propriétés géométriques du ressaut hydraulique ; ensuite, des exemples concrets pour calculer la longueur des bassins de dissipation à partir des données de débit et des dimensions des canaux.

La première voie :

Dans ce cadre, deux cas d'étude seront analysés afin de mettre en évidence l'effet réducteur de la rugosité du lit majeur ainsi que celui de la pente positive du canal sur les propriétés hydrauliques du ressaut hydraulique.

- ✓ Premier cas la rugosité absolue de valeur $\varepsilon = 0$ mm, 12mm, et la pente du canal égale 0,5%.
- ✓ Deuxième cas où la rugosité absolue de valeur $\varepsilon = 0$ mm, 12 mm, et la pente du canal égale 1,5%.

Les données :

- Le débit d'écoulement de valeur égale $Q = 25$ l/s
- L'ouverture initiale $h_1 = 4$ cm
- Les largeurs du canal ($b = 14,4$ cm et $B = 25$ cm)

Calcul du nombre de Froude F_1 :

$$F_1^2 = \frac{Q^2}{gb^2(h_1 \cos \alpha)^3}$$

Le calcul a donné

- $F_1=6,928850149$, dans le cas $\tan \alpha = 0,5\%$.
- $F_1=6,929889606$, dans le cas $\tan \alpha = 1,5\%$.

Rapport des hauteurs conjuguées du ressaut :

L'analyse des résultats expérimentaux du ressaut évoluant dans un canal rectangulaire composé à pente positive a permis d'établir une relation entre le rapport des hauteurs conjuguées et le nombre de Froude amont F_1 , formulée comme suit :

$$Y = [(4,132(\tan(\alpha)) - 1,2482)\varepsilon/(B - b) - 3,002(\tan(\alpha)) + 1,5587]F_1$$

- 1^{er} cas : $\varepsilon = 0$ mm, et $\tan \alpha = 0,5\%$, $Y = 10,70$, donc $h_2 = 42,8$ cm

$$\varepsilon = 12 \text{ mm, et } \tan \alpha = 0,5\%, Y = 9,73 \text{ , donc } h_2 = 38,92 \text{ cm}$$

- 2^{eme} cas : $\varepsilon = 0$ mm, et $\tan \alpha = 1,5\%$, $Y = 10,49$, donc $h_2 = 41,96$ cm

$$\varepsilon = 12 \text{ mm, et } \tan \alpha = 1,5\%, Y = 9,56 \text{ , donc } h_2 = 38,24 \text{ cm}$$

Cependant, selon la relation théorique :

$$Y = 1,914 F_1^{0,904} ((15,9 (\tan \alpha) - 1,3413)\varepsilon/(B - b) - 6,85(\tan \alpha) + 1,1242)^{0,452}$$

- 1^{er} cas : $\varepsilon = 0$ mm, et $\tan \alpha = 0,5\%$, $Y = 11,45$, donc $h_2 = 45,8$ cm (avec une erreur relative $(\Delta Y/Y) = 6,59\%$)

$$\varepsilon = 12 \text{ mm, et } \tan \alpha = 0,5\%, Y = 10,75 \text{ , donc } h_2 = 43 \text{ cm (avec une erreur relative } (\Delta Y/Y) = 9,42\%)$$

- 2^{eme} cas : $\varepsilon = 0$ mm, et $\tan \alpha = 1,5\%$, $Y = 11,12$, donc $h_2 = 44,48$ cm (avec une erreur relative $(\Delta Y/Y) = 5,67\%$)

$\varepsilon = 12$ mm, et $\tan \alpha = 1,5\%$, $Y = 10,48$, donc $h_2 = 41,92$ cm (avec une erreur relative $(\Delta Y/Y) = 8,82\%$)

Longueur relative du ressaut hydraulique L_j/h_1

Les résultats expérimentaux conduisent également à une relation reliant la longueur relative du ressaut hydraulique au nombre de Froude amont F_1 exprimée comme suit :

$$L_j/h_1 = [(210,02 \tan(\alpha) - 8,1746)\varepsilon/(B - b) - 88,22 \tan(\alpha) + 16,207]F_1$$

- 1^{er} cas : $\varepsilon = 0$ mm, et $\tan \alpha = 0,5\%$, $L_j/h_1 = 109,24$, donc $L_j = 436,96$ cm

$$\varepsilon = 12 \text{ mm, et } \tan \alpha = 0,5\%, L_j/h_1 = 103,65 \text{ , donc } L_j = 414,6 \text{ cm}$$

- 2^{ème} cas : $\varepsilon = 0$ mm, et $\tan \alpha = 1,5\%$, $L_j/h_1 = 103,14$, donc $L_j = 412,56$ cm

$$\varepsilon = 12 \text{ mm, et } \tan \alpha = 1,5\%, L_j/h_1 = 99,20 \text{ , donc } L_j = 396,8 \text{ cm}$$

Longueur relative du rouleau du ressaut hydraulique L_r/h_1

Les résultats expérimentaux ont également permis d'établir une relation entre la longueur relative du rouleau du ressaut hydraulique et le nombre de Froude amont F_1 exprimée comme suit : $L_r/h_1 = [(99,91(\tan(\alpha)) - 10,75)\varepsilon/(B - b) - 40,8(\tan(\alpha)) + 12,175]F_1$

- 1^{er} cas : $\varepsilon = 0$ mm, et $\tan \alpha = 0,5\%$, $L_r/h_1 = 82,95$, donc $L_r = 331,8$ cm

$$\varepsilon = 12 \text{ mm, et } \tan \alpha = 0,5\%, L_r/h_1 = 74,90 \text{ , donc } L_r = 299,6 \text{ cm}$$

- 2^{ème} cas : $\varepsilon = 0$ mm, et $\tan \alpha = 1,5\%$, $L_r/h_1 = 80,13$, donc $L_r = 320,52$ cm

$$\varepsilon = 12 \text{ mm, et } \tan \alpha = 1,5\%, L_r/h_1 = 72,87 \text{ , donc } L_r = 291,48 \text{ cm}$$

La deuxième voie :

Dans cet exemple, les équations seront mises en œuvre sur deux cas pratiques, issus de mesures de bassins réels. Cette démarche vise à analyser le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé doté d'un lit majeur rugueux et avec une pente positive, tout en évaluant l'opportunité de ces équations pour estimer les longueurs optimales des bassins d'amortissement.

➤ **1^{er} cas :** On fixe la rugosité et on augmente la pente

- Le débit d'écoulement de pratique est de $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Le canal rectangulaire principal présente une largeur minimale $b = 25 \text{ m}$

et une largeur maximale $B = 30 \text{ m}$.

Nous commençons par définir la rugosité correspondant aux conditions d'écoulement et par fixation d'une hauteur initiale (h_1), sur la base de mesures expérimentales. Le rapport $\varepsilon/(B-b)$ varie de 0,0566 à 0,1132 ; une valeur de cette plage est choisie pour traduire les conditions réelles d'écoulement.

- $\varepsilon/(B-b) = 0,1132 \rightarrow \varepsilon = (B-b) \cdot 0,1132 = (30-25)\text{m} \cdot 0,1132 = 0,566 \text{ m}$, **$\varepsilon_{\text{pratique}} = 0,566\text{m}$**

Le rapport $h_1/(B-b)$ varie entre 0,2358 et 0,3774 ; nous sélectionnons une valeur dans cette fourchette pour refléter les conditions réelles d'écoulement.

- $h_1/(B-b) = 0,3774 \rightarrow h_1 = (B-b) \cdot 0,3774 = (30-25)\text{m} \cdot 0,3774 = \mathbf{h_1 = 1,887 \text{ m}}$
- Ainsi le calcul du facteur Froude F_1 est : $F_1 = \frac{Q}{\sqrt{g b^2 (h_1 \cos \alpha)^3}} \approx \mathbf{7,39}$

❖ La hauteur relative du ressaut hydraulique, exprimée par le rapport $Y = h_2/h_1$, se déduit de méthodes élaborées à partir de données expérimentales.

$$Y = [(4,132(\tan(\alpha)) - 1,2482)\varepsilon/(B-b) - 3,002(\tan(\alpha)) + 1,5587]F_1$$

L'application de cette relation conduit à la détermination d'une valeur pour

$Y \approx 10,47$, et donc la hauteur **$h_2 = 19,76 \text{ m}$** , ($\tan \alpha = 0\%$, $\varepsilon_{\text{pratique}} = 0,566\text{m}$)

$Y \approx 10,20$, et donc la hauteur **$h_2 = 19,25 \text{ m}$** , ($\tan \alpha = 1,5\%$, $\varepsilon_{\text{pratique}} = 0,566\text{m}$)

- ❖ La longueur relative du ressaut, exprimée sous forme adimensionnelle, est donnée par la relation suivante : $L_j/h_1 = [(210,02 \tan(\alpha) - 8,1746)\varepsilon/(B-b) - 88,22 \tan(\alpha) + 16,207]F_1$

Lorsque l'on applique cette relation, on obtient directement une valeur numérique pour

$L_j/h_1=112,94$, donc **$L_j=213,12 \text{ m}$** ($\tan \alpha = 0\%$, $\varepsilon_{\text{pratique}} = 0,566\text{m}$)

$L_j/h_1=105,79$, donc **$L_j=199,63 \text{ m}$** ($\tan \alpha = 1,5\%$, $\varepsilon_{\text{pratique}} = 0,566\text{m}$)

- ❖ L'approche adimensionnelle de la longueur du rouleau obtenue s'exprime de la manière suivante:

$$L_r/h_1 = [(99,91(\tan(\alpha)) - 10,75)\varepsilon/(B-b) - 40,8(\tan(\alpha)) + 12,175]F_1$$

Par l'application de cette relation, une valeur de

$L_r/h_1 = 80,98$, par conséquent : **$L_r = 152,81 \text{ m}$** ($\tan \alpha = 0\%$, $\varepsilon_{\text{pratique}} = 0,566\text{m}$)

$L_r/h_1 = 77,71$, par conséquent : **$L_r = 146,64 \text{ m}$** ($\tan \alpha = 1,5\%$, $\varepsilon_{\text{pratique}} = 0,566\text{m}$)

➤ **2^{eme} cas** : On fixe la pente et on augmente la rugosité

- ❖ Le canal est horizontal (pente = 0%)
- ❖ Le débit d'écoulement de pratique est de $Q = 1500 \text{ m}^3/\text{s}$.
- ❖ Le canal rectangulaire principal présente une largeur minimale $b = 27 \text{ m}$

et une largeur maximale $B = 35 \text{ m}$.

❖ Rugosité $\varepsilon/(B-b)$: $0,1132 \rightarrow \varepsilon = (35-27) * 0,1132 = 0,906 \text{ m}$, **$\varepsilon_{\text{pratique}} = 0,906\text{m}$**

❖ Hauteur initiale $h_1/(B-b) = 0,3774 \rightarrow h_1 = (B-b)*0,3774 = (35-27) \text{ m} * 0,3774 = \text{h}_1 = 3,019 \text{ m}$

❖ Ainsi le calcul du facteur Froude F_1 est : $F_1 = \frac{Q}{\sqrt{gb^2(h_1 \cos \alpha)^3}} \approx \text{3,38}$

- On augmente la rugosité en changeant les dimensions du canal, de sorte qu'il devienne $b = 33 \text{ m}$, $B = 43 \text{ m}$.

- Rugosité $\varepsilon/(B-b)$: $0,1132 \rightarrow \varepsilon = (43-33) * 0,1132 = 1,132 \text{ m}$, $\varepsilon_{\text{pratique}} = 1,132 \text{ m}$
- Hauteur initiale $h_1/(B-b) = 0,3774 \rightarrow h_1 = (B-b) * 0,3774 = (43-33) \text{ m} * 0,3774 = h_1 = 3,774 \text{ m}$
- Ainsi le calcul du facteur Froude F_1 est : $F_1 = \frac{Q}{\sqrt{g b^2 (h_1 \cos \alpha)^3}} \approx 1,98$

La hauteur relative du ressaut hydraulique :

$$Y = [(4,132(\tan(\alpha)) - 1,2482)\varepsilon/(B-b) - 3,002(\tan(\alpha)) + 1,5587]F_1$$

L'application de cette relation conduit à la détermination d'une valeur de

$$Y \approx 4,79, \text{ et donc la hauteur } h_2 = 14,46 \text{ m (} \tan \alpha = 0\% , \varepsilon_{\text{pratique}} = 0,906 \text{ m)}$$

$$Y \approx 2,81, \text{ et donc la hauteur } h_2 = 10,60 \text{ m (} \tan \alpha = 0\% , \varepsilon_{\text{pratique}} = 1,132 \text{ m)}$$

La longueur relative du ressaut :

$$L_j/h_1 = [(210,02 \tan(\alpha) - 8,1746)\varepsilon/(B-b) - 88,22 \tan(\alpha) + 16,207]F_1$$

Lorsque l'on applique cette relation, on obtient directement une valeur numérique pour

$$L_j/h_1 = 51,67, \text{ donc } L_j = 155,99 \text{ m (} \tan \alpha = 0\% , \varepsilon_{\text{pratique}} = 0,906 \text{ m)}$$

$$L_j/h_1 = 30,25, \text{ donc } L_j = 114,16 \text{ m (} \tan \alpha = 0\% , \varepsilon_{\text{pratique}} = 1,132 \text{ m)}$$

La longueur du rouleau obtenue s'exprime de la manière suivante :

$$L_r/h_1 = [(99,91(\tan(\alpha)) - 10,75)\varepsilon/(B-b) - 40,8(\tan(\alpha)) + 12,175]F_1$$

Par l'application de cette relation, une valeur de L_r/h_1 est :

$$L_r/h_1 = 37,05, \text{ par conséquent : } L_r = 111,85 \text{ m (} \tan \alpha = 0\% , \varepsilon_{\text{pratique}} = 0,906 \text{ m)}$$

$$L_r/h_1 = 21,69, \text{ par conséquent : } L_r = 81,86 \text{ m (} \tan \alpha = 0\% , \varepsilon_{\text{pratique}} = 1,132 \text{ m)}$$

On conclue que d'après les résultats de calcul expérimental et notamment de pratique, l'influence de la rugosité et celle de la pente est perceptible vis-à-vis la réduction des caractéristiques des ouvrages hydrauliques surtout aux dimensions du bassin d'amortissement.

Ainsi on recommanderait la poursuite des études postérieures pour ce type du ressaut hydraulique étudié notamment, une étude contributive de la simulation du ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire composé avec lit majeur rugueux et pente positive.

III.4 CONCLUSION :

Ce chapitre a été consacré à l'étude expérimentale du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux et pente positive.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis d'établir des relations adimensionnelles explicites. L'analyse a été soutenue sur la variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$ du ressaut en fonction du nombre de Froude incident F_1 , pour cinq valeurs distinctes de rugosité et différentes pentes. Cette approche a conduit à la formulation de relations expérimentales adimensionnelles explicites.

Par ailleurs, nous avons étudié la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude incident. Les résultats ont mis en évidence une relation de type linéaire entre la longueur relative du rouleau et le nombre de Froude.

Dans un second temps, la variation de la longueur relative du ressaut L_j/h_1 dans le lit majeur a été analysée en fonction du nombre de Froude F_1 , pour cinq rugosités et quatre pentes testées. Quatre allures distinctes ont été identifiées, chacun représentant la longueur relative du ressaut sur une pente donnée. Il a été constaté que la longueur relative L_j/h_1 augmente avec le nombre de Froude, mais diminue avec l'augmentation de la pente du canal.

De plus, l'évolution de la hauteur relative du seuil s/h_1 en fonction du nombre de Froude F_1 a également été examinée expérimentalement dans le lit majeur du canal.

L'étude a enfin été maintenue sur la dissipation de l'énergie cinétique, exprimée à travers le rendement du ressaut. Les résultats montrent que le rendement η augmente avec la rugosité du lit majeur pour les différentes pentes étudiées.

En conclusion, il ressort que l'augmentation de la rugosité du lit majeur du canal rectangulaire composé favorise la dissipation de l'énergie du ressaut hydraulique.

CONCLUSION DE LA DEUXIEME PARTIE

Notre contribution de recherche s'articule autour de l'étude expérimentale et théorique des écoulements brusquement variés dans un canal rectangulaire composé avec lit majeur rugueux et pente positive.

Dans le premier chapitre, nous avons présenté en détail le banc d'essai à travers des photographies illustrant les différents équipements utilisés, ainsi que la procédure de mise en œuvre des instruments destinés à mesurer les caractéristiques du ressaut hydraulique. Le débit volumique a été déterminé à l'aide du déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle de (Hachemi Rachedi, L., 2006), inséré dans le canal d'essai pour assurer un contrôle précis des lames déversantes. Par ailleurs, une attention particulière a été portée à la conception et à la préparation des tapis rugueux fixés au lit majeur du canal, indispensables à la présentation réelle des conditions d'écoulement. La production de l'écoulement torrentiel est assurée par l'installation des ouvertures de parois minces insérés dans la boîte sous- pression du canal. L'ensemble de ces dispositifs a permis de produire, observer et analyser de manière systématique les écoulements brusquement variés rencontrés en aval des ouvrages hydrauliques.

Dans le second chapitre, une approche théorique et expérimentale a été menée pour analyser la relation semi-théorique décrivant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux et pente positive. Sur le plan théorique, un développement rigoureux a permis d'établir la relation fonctionnelle implicite $f(F_1, Y, Cr, \lambda, \beta, \tau, \alpha) = 0$, issue de l'application de l'équation de quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut. Lorsque la pente du canal est nulle ($\alpha=0$) et le coefficient ($Cr=0$), cette formulation se réduit à la relation classique de (Khattaoui & Achour, 2012), confirmant la cohérence du modèle élaboré. Sur le plan expérimental, le coefficient de correction k (rapport entre le volume réel et le volume calculé du ressaut) a été déterminé pour trois pentes, donnant une valeur moyenne stable de $k=4,24$. Par ailleurs, la corrélation établie entre les données expérimentales et celles issues de l'approche théorique adimensionnelle $Y_{théo}$, dont elle varie avec Fr et Cr , révèle une erreur relative généralement inférieure à 10 %. Ce constat atteste de la validité et de la fiabilité de la relation semi-théorique (2.34). Ainsi, l'ensemble des résultats obtenus confirme l'affinité scientifique du modèle proposé.

Dans le dernier chapitre de la deuxième partie, nous avons présenté l'ensemble des résultats obtenus lors de nos expérimentations, portant sur le ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire de section composée, caractérisé par un lit majeur rugueux et une pente positive. Les mesures réalisées ont permis d'établir des relations adimensionnelles explicites, notamment pour le rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$, exprimé en fonction du nombre de Froude incident F_1 , de la pente du canal α et de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$ ces facteurs ont joué un effet réducteur significatif aux rapports des profondeurs d'écoulement.

Des approches fonctionnelles adimensionnelles ont ensuite été développées, reliant le rapport L_r/h_1 au paramètre de rugosité $\varepsilon/(B-b)$, à la pente du canal et au nombre de Froude F_1 . Cette approche empirique adimensionnelle met clairement en évidence l'effet réducteur notable de la rugosité sur la longueur du ressaut.

Par ailleurs, l'étude de la longueur relative du ressaut dans le lit majeur a permis d'établir des relations adimensionnelles pour L_j/h_1 , montrant sa dépendance vis-à-vis de F_1 , de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$ et de la pente du canal α . L'influence de ces paramètres se traduit par une réduction significative de la longueur du ressaut.

L'analyse du rapport s/h_1 , en lien avec la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$, la pente $\tan(\alpha)$ et le nombre de Froude F_1 , a conduit à l'établissement d'une relation adimensionnelle importante. Celle-ci constitue un outil important pour le positionnement et le control du ressaut hydraulique optimal permettant le passage du régime torrentiel au régime fluvial.

Enfin, l'évaluation de la dissipation énergétique a montré que le rendement dissipatif du ressaut hydraulique augmente avec la rugosité du lit majeur, confirmant ainsi que cette dernière représente un paramètre primordial vis-à-vis l'aspect économique à la réalisation des ouvrages hydrauliques notamment les bassins d'amortissement.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

Cette recherche vise à analyser, sur les plans théorique et expérimental, le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de section composée, doté d'un lit majeur rugueux et d'une pente positive.

La thèse se scinde en deux axes complémentaires. Le premier axe, d'ordre bibliographique, regroupant les généralités et les notions fondamentales relatives au ressaut hydraulique, suivies d'une présentation des principaux travaux réalisés dans le domaine, notamment ceux portant sur le ressaut en canal rectangulaire de section composée, avec lit majeur rugueux, ainsi que sur les configurations à fond rugueux incliné. Le second axe expose notre contribution nouvelle, fondée sur une étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique se développant dans le canal considéré. Cette double approche a permis d'identifier les mécanismes gouvernant la transition du régime torrentiel au régime fluvial et d'enrichir les connaissances existantes sur la dynamique des écoulements brusquement variés.

- Le premier axe de la synthèse bibliographique est articulé en trois chapitres de référence, considérés comme indispensables à l'établissement du cadre théorique de cette recherche :
 - ❖ Le premier chapitre est consacré à l'exposé des généralités et des concepts fondamentaux relatifs au ressaut hydraulique. Il présente les bases théoriques indispensables à la compréhension de ce phénomène complexe, en décrivant ses conditions d'apparition, ses principales caractéristiques hydrauliques ainsi que les paramètres qui influencent sa formation et son évolution dans les canaux prismatiques. Ce chapitre introduit également les notions essentielles liées à la dynamique des écoulements à surface libre. Il définit les différents types de canaux, propose une classification rigoureuse des écoulements et met en évidence le rôle déterminant du nombre de Froude dans la distinction entre les régimes fluvial et torrentiel. Ce paramètre clé permet de précéder le cas de transitions brusques, telles que le ressaut hydraulique, qui se manifeste par un passage brutal d'un régime supercritique à un régime subcritique et se caractérise notamment par les hauteurs conjuguées et la longueur du ressaut. Enfin, le chapitre expose l'évolution historique des recherches consacrées à ce phénomène, depuis les travaux fondateurs de Bidone et Bélanger jusqu'aux études contemporaines portant sur des géométries plus complexes, mettant ainsi en perspective l'état actuel des connaissances dans ce domaine.

- ❖ Le second chapitre est consacré à l'examen détaillé des travaux menés par (Lacheheb S. 2023) sur le ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince, se développant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux. Dans cette étude, l'auteur a conduit une analyse à la fois semi-théorique et expérimentale du phénomène. Dans un premier temps, l'approche semi-théorique a été confrontée aux observations expérimentales afin d'établir une expression explicite du rapport des hauteurs conjuguées Y . Cette relation permet d'évaluer directement cette caractéristique en fonction du coefficient de rugosité Cr et du nombre de Froude imposé au lit majeur du canal composé. Par la suite, les valeurs expérimentales de Y ont été comparées aux estimations issues de l'expression empirique adimensionnelle développée (Y_{appr}), dépendante de Fr et de Cr . La concordance entre les deux approches, avec des écarts en majorité inférieurs à 5 %, atteste à la fois de la puissance du modèle théorique et de la fiabilité des mesures expérimentales. L'étude expérimentale a également permis de mettre en évidence l'effet significatif de la rugosité du lit majeur sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé. Les relations adimensionnelles obtenues montrent systématiquement que cette rugosité entraîne une diminution notable de la longueur du ressaut (L_j), de la longueur du rouleau (L_r) et du rapport des hauteurs conjuguées (Y). Enfin, l'analyse confirme le rôle déterminant de la rugosité dans l'amélioration du rendement énergétique (η), favorisant ainsi une dissipation plus efficace de l'énergie cinétique.
- ❖ Le troisième chapitre est consacré aux travaux de (Nouacer B. 2023) portant sur le ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire incliné et à fond rugueux. Il propose une approche visant à établir une relation fonctionnelle générale $f(F_1, Y, Cr) = 0$, permettant de décrire le ressaut hydraulique contrôlé par un seuil mince dans un canal rectangulaire à pente positive variable. Pour une pente nulle ($\alpha = 0$), cette relation se réduit à la relation classique, confirmant ainsi la cohérence et la validité du modèle. L'analyse expérimentale menée dans cette étude a permis de déterminer un coefficient de correction volumique $k = 0,92$, assurant une bonne concordance entre les valeurs théoriques et expérimentales du nombre de Froude, les écarts observés dans la plus part demeurant inférieurs à 5 %. La relation implicite en Y ayant exigé une résolution itérative, l'auteur a proposé une formule explicite approchée, dont la précision reste globalement satisfaisante,

avec des écarts ne dépassant généralement pas 5 %. Les mesures du rapport h_2/h_1 ont montré qu'il croît avec le nombre de Froude F_1 et décroît avec l'augmentation de la rugosité, une loi linéaire ayant été ajustée pour décrire cette variation. De même, l'évolution de la longueur relative L_j/h_1 en fonction de F_1 suit une tendance linéaire. Enfin, l'analyse de la variation du rapport s/h_1 selon F_1 a permis de compléter la caractérisation globale du ressaut hydraulique dans cette configuration inclinée et rugueuse.

- Le deuxième axe de notre travail a été consacré à notre propre contribution à l'étude du ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire de section composée, caractérisé par un lit majeur rugueux et une pente positive. Cette partie est structurée en trois chapitres distincts :
 - ❖ Le premier chapitre présente le banc expérimental illustré par des photographies, ainsi que la procédure d'utilisation des instruments destinés à mesurer les caractéristiques du ressaut hydraulique. Le débit volumique est estimé à l'aide d'un déversoir rectangulaire sans hauteur de pelle et de contraction latérale, conformément à la méthode de (Hachemi Rachedi, 2006). L'écoulement brusquement varié, assurant le passage du régime torrentiel au régime tranquille, est généré par des parois (seuils) de contrôle disposé en travers du canal. Enfin, le chapitre décrit de manière synthétique la méthode de préparation et de conception des différents tapis rugueux imposés au lit majeur, ainsi que le dispositif de réglage de l'angle d'inclinaison, assuré par un bras métallique rotatif équipé d'un système vis-écrou.

Dans le second chapitre, une démarche théorique et expérimentale a été conduite pour étudier la relation semi-théorique décrivant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de forme composée, avec lit majeur rugueux et pente positive. Sur le plan théorique, un développement rigoureux a conduit à l'expression implicite $f(F_1, Y, Cr, \lambda, \beta, \tau, \alpha) = 0$, obtenue par l'application de l'équation de quantité de mouvement entre les sections amont et aval du ressaut. Lorsque la pente du canal est nulle ($\alpha = 0$) et que le coefficient ($Cr = 0$), cette approche empirique se réduit à la relation classique de Khattaoui et Achour (2012), ce qui confirme la cohérence du modèle proposé. Sur le plan expérimental, le coefficient de correction k (rapport entre le volume réel et le volume calculé du ressaut) a été déterminé pour trois pentes, donnant une valeur moyenne stable de $k = 4,24$. Par ailleurs, la corrélation établie entre les données expérimentales et celles issues de l'approche théorique adimensionnelle $Y_{théo}$, dont elle varie avec Fr et Cr , révèle une erreur

relative généralement inférieure à 10 %. Ce constat atteste de la validité et de la fiabilité de la relation semi-théorique (2.34). Au total, ces résultats confirment la puissance scientifique du modèle présenté.

- ❖ Dans le dernier chapitre de la deuxième partie, nous avons présenté l'ensemble des résultats issus des mesures expérimentales portant sur le ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire à section composée, caractérisé par un lit majeur rugueux et une pente positive. Les mesures effectuées ont permis d'établir des relations adimensionnelles explicites, notamment celles décrivant la variation du rapport des hauteurs conjuguées $Y=h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude incident F_1 . Ces relations ont été déterminées pour cinq valeurs de rugosité imposées au lit majeur ($\varepsilon = 0 \text{ mm}, 6 \text{ mm}, 8 \text{ mm}, 10 \text{ mm}$ et 12 mm) et pour quatre angles d'inclinaison du canal correspondant à $\tan(\alpha)=0.000, 0.005, 0.010$ et 0.015 . L'analyse des courbes obtenues prouve cinq allures distinctes, chacune associée à une rugosité donnée pour chaque valeur de pente étudiée. Par ailleurs, les résultats montrent que le rapport des hauteurs conjuguées Y augmente avec l'accroissement du nombre de Froude incident, tandis qu'il diminue lorsque la rugosité du lit majeur s'accroît.

Des approches fonctionnelles adimensionnelles explicites ont ensuite été établies afin de caractériser clairement l'influence des paramètres hydrauliques et géométriques sur le développement du ressaut. Dans un premier temps, une relation reliant le rapport L_r/h_1 au paramètre de rugosité $\varepsilon/(B-b)$, à la pente du canal et au nombre de Froude incident F_1 a été formulée. Cette expression met clairement en évidence l'effet réducteur marqué de la rugosité sur la longueur du ressaut, confirmant les tendances dégagées précédemment pour les hauteurs conjuguées. Dans la continuité de cette analyse, l'étude de la longueur relative du ressaut dans le lit majeur a permis de proposer des relations adimensionnelles explicites pour L_j/h_1 , soulignant sa dépendance vis-à-vis du nombre de Froude F_1 , de la rugosité relative $\varepsilon/(B-b)$ et de la pente $\tan(\alpha)$. Les résultats montrent qu'une augmentation de la rugosité et de la pente provoque une diminution notable de la longueur du ressaut dans le lit majeur. Enfin, l'examen du rapport s/h_1 , variant en fonction de la rugosité relative, de la pente du canal et du nombre de Froude incident, a conduit à l'élaboration d'une relation adimensionnelle essentielle. Cette dernière constitue un outil d'aide au positionnement et

au control du ressaut hydraulique permettant le passage du régime torrentiel au régime fluvial, en cohérence avec les comportements hydrauliques observés pour les paramètres précédents.

Enfin, l'analyse de la dissipation énergétique a mis en évidence que le rendement dissipatif du ressaut augmente avec la rugosité du lit majeur. De plus, l'étude expérimentale dédiée à l'évaluation de la dissipation de l'énergie cinétique, à travers le rendement hydraulique η , a montré que ce dernier croît de manière significative avec le nombre de Froude incident F_1 . Cette évolution met clairement en évidence l'efficacité du ressaut hydraulique, formé dans les conditions expérimentales considérées, pour dissiper l'énergie excédentaire de l'écoulement. L'intensité de cette dissipation d'énergie est principalement provoquée par l'importance de la rugosité imposé au lit majeur, lequel joue un rôle essentiel dans la génération et l'amplification des mécanismes dissipatifs observés.

En conclusion, on espère bien qu'on a contribué modestement à développer des différentes approches empiriques adimensionnelles permettant de dimensionner les ouvrages hydrauliques notamment les bassins d'amortissement avec recommandation de la poursuite de cette étude, postérieurement par des travaux de modélisation numérique sur ce type du ressaut hydraulique.

Références bibliographiques

- Abdul Khader, M. H., & Elango, K. (1974). Turbulent pressure field beneath a hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Research*, 12(4), 469–489. <https://doi.org/10.1080/00221687409499725>
- Achour, B., Sedira, N., & Debabeche, M. (2002). Ressaut contrôlé par seuil dans un canal rectangulaire. *LARHYSS Journal*, 1(1), 73–85.
- Andersen, V. M. (1978). Undular Hydraulic Jump. *Journal of the Hydraulics Division*, 104(8), 1185–1188. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005048>
- Bakhmeteff, B. A., & Matzke, A. E. (1936). The Hydraulic Jump in Terms of Dynamic Similarity. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 101(1), 630–647. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0004708>
- Bakhmeteff, B. A., & Matzke, A. E. (1938). The Hydraulic Jump in Sloped Channels. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*, 60(2), 111–118. <https://doi.org/10.1115/1.4020643>
- Basco, D. R. (1971). Energy Dissipation in Forced Hydraulic Jumps. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 97(Hy 11), 1825–1844.
- Belanger, J. B. (1828). Essai sur la solution numérique de quelques problèmes relatifs au mouvement permanent des eaux courantes ; par m. J.-B. Belanger .. Chez Carilian-Goeury, libraire, des corps royaux des ponts et chaussées et des mines.
- Benabdesselam, A. (2020). Approches théoriques et expérimentales du ressaut hydraulique dans un profil de canal compose [Doctoral, Université Mohamed Khider – Biskra]. <http://thesis.univ-biskra.dz/4758/>
- Bidone, G. (1819). Observations on the Height of the Hydraulic Jump. A Report Presented in Meeting of Royal Academy of Science of Turin, 21–80.
- Bradley, J. N., & Peterka, A. J. (1957). Hydraulic Design of Stilling Basins: Hydraulic Jumps on a Horizontal Apron (Basin I). *Journal of the Hydraulics Division*, 83(5), 1401–1424. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000126>
- Brahimi, A. (2024). Etude Théorique Et Expérimentale De l'effet De La Rugosité Sur Le Ressaut Hydraulique Evoluant Dans Un Canal Rectangulaire [Thèse de doctorat en sciences]. Département de Génie civil et Hydraulique, université kasdi merbah Ouargla.
- Bresse, J. A. C. (1860). Cours de mécanique appliquée, professé à l'École des ponts et chaussées. Mallet-Bachelier.

- Chanson, H. (2015). Energy dissipation in hydraulic structures. CRC Press/Taylor & Francis Group.
- Chen-Feng Li. (1995). Determining the location of hydraulic jump by model test and hec-2 flow routing [Master of Science]. College of Engineering and Technology, Ohio University.
- Cherhabil, S. (2010). Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à pente variable [Thèse de doctorat en sciences]. Département de génie-civil et hydraulique, de l'université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- Chow. (1959). Open channel Hydraulics (Int. Student edition,). Mcgraw Hill Book Co. Inc.,.
- Citrini, D. (1939). Il salto di Bidone. L'Energia Elettrica. 16(6), 441–465.
- Daneshfaraz, R., majediasl, M., Mirzaee, R., & Tayfur, G. (2021). Hydraulic Jump in a Rough Sudden Symmetric Expansion Channel. AUT Journal of Civil Engineering, 5(2), 245–256. <https://doi.org/10.22060/ajce.2020.18227.5667>
- De Padova, D., & Mossa, M. (2021). Hydraulic Jump: A Brief History and Research Challenges. Water, 13(13), Article 13. <https://doi.org/10.3390/w13131733>
- 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. (2007). Effect of sill in the hydraulic jump in a triangular channel. Journal of Hydraulic Research, 45, 135–139.
- Debabeche, M., Cherhabil, S., Hafnaoui, A., & Achour, B. (2009). Hydraulic jump in a sloped triangular channel. Canadian Journal of Civil Engineering, 36(4), 655–658. <https://doi.org/10.1139/L08-136>
- Djamaa, W. (2022). Contribution à l'étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur rugueux. [Thèse de doctorat]. Département de Génie civil et Hydraulique, université kasdi merbah Ouargla.
- Ead, S. A., & Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic Jumps on Corrugated Beds. Journal of Hydraulic Engineering, 128(7), 656–663. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2002\)128:7\(656\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:7(656))
- Forster, J. W., & Skrinde, R. A. (1950). Closure to “Forster and Skrinde on Hydraulic Jump.” Transactions of the American Society of Civil Engineers, 115(1), 1007–1022. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0006340>

- Ghomri, A. (2012). Le ressaut hydraulique dans les canaux prismatiques à parois rugueuses [Thèse doctorat en Science Hydraulique, Département d'Hydraulique, Université de Biskra]. [Http://thesis.univ-biskra.dz/2230/7/Chapitre%2003.pdf](http://thesis.univ-biskra.dz/2230/7/Chapitre%2003.pdf)
- Ghomri, A., Lacheheb, S., & Djamaa, W. (2023). Effect of roughness on the characteristics of the hydraulic jump evolving into a rectangular channel of compound section. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 13, 50. <https://doi.org/10.4314/jfas.1300>
- Graf, W. H., Graf, W. H., & Altinakar, M. S. (2000). *Hydraulique fluviale : Écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple*. EPFL Press.
- Gupta, S. K. & Dwivedi, V. K. (2023). Prediction of Depth Ratio, Jump Length and Energy Loss in Sloped Channel Hydraulic Jump for Environmental Sustainability. *Evergreen*, 10(2), 942–952. <https://doi.org/10.5109/6792889>
- Gupta, S. K., & Dwivedi, V. K. (2024). Experimental investigation of hydraulic jump characteristics in sloping rough surfaces for sustainable development. *Engineering Research Express*, 6(2), 025103. <https://doi.org/10.1088/2631-8695/ad3acf>
- Gupta, S. K. & Dwivedi, V. K. (2025). Evaluation of hydraulic jump characteristics in rough sloping surfaces for sustainable environment: A laboratory investigation. *Sigma Journal of Engineering and Natural Sciences – Sigma Mühendislik ve Fen Bilimleri Dergisi*, 148–159. <https://doi.org/10.14744/sigma.2025.00012>
- Hachemi Rachedi, L. (2006). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale [Mémoire de magister en hydraulique, Département d'hydraulique, Université de Biskra.]. <http://thesis.univ-biskra.dz/id/eprint/1102>
- Hager, W. H., Bremen, R., & Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump: Length of roller. *Journal of Hydraulic Research*, 28(5), 591–608. <https://doi.org/10.1080/00221689009499048>
- Hager, W. H., & Bretz, N. V. (1987). Discussion of “Simplified Design of Contractions in Supercritical Flow” by Terry W. Sturm (May, 1985, Vol. 111, No. 5). *Journal of Hydraulic Engineering*, 113(3), 422–424. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1987\)113:3\(422\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1987)113:3(422))
- Hager, W. H., & Castro-Orgaz, O. (2020). Alfred Aimé Flamant: Hydraulician and Textbook Author. *Journal of Hydraulic Engineering*, 146(7), 02520002. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001758](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001758)
- Hager, W. H., & Li, D. (1992). Sill-controlled energy dissipator. *Journal of Hydraulic Research*, 30(2), 165–181. <https://doi.org/10.1080/00221689209498932>

- Hager, W. H., & Sinniger, R. (1985). Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise. *Journal of Hydraulic Research*, 23(2), 101–113. <https://doi.org/10.1080/00221688509499359>
- Harleman, D.R.F. (1959). Discussion of “Turbulence characteristics of the hydraulic jump.” By Rouse, H., Siao, T. T., & Nagaratnam, S. *Trans. ASCE*, 124, 1959.
- Kateb, S. (2006). Ressaut hydraulique contrôlé par seuil dans un canal triangulaire a parois rugueuses. [Thesis]. <Http://archives.univ-biskra.dz:80/handle/123456789/24434>
- Kateb, S., Ghomri, A., & Debabeche, M. (2019). Semi-theoretical approach to the effect of roughness on the relative height of the hydraulic resage evolving in a triangular channel. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 11(1), 513–524.
- Khattaoui & Achour. (2012). Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé, *Revue scientifique et technique. Revue Scientifique et Technique LJEE*, No. 20, 44–51.
- Kherouf Mazouz. (2023). Cours d’aménagements hydrauliques.
- Kindsvater, C. E. (1944). The Hydraulic Jump in Sloping Channels. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 109(1), 1107–1120. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0005733>
- Lacheheb, S. (2023). Contribution à l’étude du ressaut hydraulique contrôlé par seuil à paroi mince évoluant dans un canal rectangulaire de section composée avec lit majeur rugueux [Thèse de doctorat]. Département de Génie civil et Hydraulique, université kasdi merbah Ouargla.
- Laishram, K., Albino Kumar, P., & Tamphasana Devi, T. (2021). Effect of channel slope and roughness on hydraulic jump in open channel flow. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 958, 012014. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/958/1/012014>
- Mahtabi, G., Chaplot, B., Azamathulla, H. M., & Pal, M. (2020). Classification of Hydraulic Jump in Rough Beds. *Water*, 12(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/w12h082249>
- Mikhalev, M. A. & Hoang Ty An. (1976). Kinematic characteristics of a hydraulic jump on a sloping apron. *Hydrotechnical Construction*, 10(7), 686–690. <https://doi.org/10.1007/BF02381815>
- Moore, W. L., & Morgan, C. W. (1959). Hydraulic Jump at An Abrupt Drop. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 124(1), 507–516. <https://doi.org/10.1061/TACEAT.0007723>

- Narayanan, R., & Schizas, L. S. (1980). Force on Sill of Forced Jump. *Journal of the Hydraulics Division*, 106(7), 1159–1172. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0005460>
- Nouacer, B. (2023). Contribution a l'étude théorique et expérimentale de ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire incliné à fond rugueux [Thèse de doctorat]. Département de Génie civil et Hydraulique, université kasdi merbah Ouargla.
- Palermo, M., & Pagliara, S. (2017). A review of hydraulic jump properties on both smooth and rough beds in sloping and adverse channels. *Acta Scientiarum Polonorum - Formatio Circumiectus*, 16, 91–105. <https://doi.org/10.15576/ASP.FC/2017.16.1.91>
- Parsamehr, P., Kuriqi, A., Farsadizadeh, D., Dalir, A. H., Daneshfaraz, R., & Ferreira, R. M. L. (2022). Hydraulic jump over an adverse slope controlled by different roughness elements. *Water Resources Management*, 36(14), 5729–5749. <https://doi.org/10.1007/s11269-022-03330-x>
- Pillai, N. S., & Unny, T. E. (1964). Forced Hydraulic Jump with Roughened Beds. *Journal of the Hydraulics Division, ASCE*, 90(Hy 6).
- Rajaratnam, N. (1965). Hydraulic Jump in horizontal conduit. *Water Power*, 17, 80–83.
- Rajaratnam, N. (1967). Hydraulic Jumps. In *Advances in Hydrosience* (Vol. 4, pp. 197–280). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-1-4831-9935-1.50011-2>
- Rajaratnam, N., & Murahari, V. (1971). A Contribution To Forced Hydraulic Jumps. *Journal of Hydraulic Research*. <https://doi.org/10.1080/00221687109500347>
- Rajaratnam, N., & Murahari, V. (1974). Flow Characteristics of Sloping Channel Jumps. *Journal of the Hydraulics Division*, 100(6), 731–740. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0003975>
- Rajaratnam, N., & Subramanya, K. (1968). Profile of the Hydraulic Jump. *Journal of the Hydraulics Division*, 94(3), 663–674. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001810>
- Rand, W. (1965). Flow Over a Vertical Sill in an Open Channel. *Journal of the Hydraulics Division*, 91(4), 97–121. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0001297>
- Resch, F. J., & Leutheusser, H. J. (1971). Mesures de turbulence dans le ressaut hydraulique. *La Houille Blanche*, 57(1), 17–31. <https://doi.org/10.1051/lhb/1971001>
- Riguet, F. (2012). Étude théorique et expérimentale du ressaut hydraulique évoluent dans un canal trapézoïdal incliné. [Thesis]. <http://archives.univ-biskra.dz:80/handle/123456789/24290>

- Riguet, F, Debabeche . M, & A. Ghomri. (2020). Experimental study of the sequent depth ratio of the hydraulic jump in a straight compound rectangular channel. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 12(IS), 56–65. <http://dx.doi.org/10.4314/jfas.v12i1s.5>
- Riguet, F., F. (2021). Le ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire de forme composée [Thèse de doctorat en sciences]. Département de génie-civil et hydraulique, de l'université Mohamed Khider, Biskra, Algérie.
- Safranez, K. (1927). Wechselsprung und die Energievernichtung des Wassers. *Bauingenieur*, 8.
- Sayyadi, K., Heidarpour, M., & Ghadampour, Z. (2022). Effect of Bed Roughness and Negative Step on Characteristics of Hydraulic Jump in Rectangular Stilling Basin. *Shock and Vibration*, 2022(1), 1722065. <https://doi.org/10.1155/2022/1722065>
- Sharp, J. J. (1974). Hydraulic Jumps in Triangular Channels. *Journal of Hydraulic Research*, 12(3), 223–242.
- Shukry, A. (1957). The Efficacy of Floor Sills Under Drowned Hydraulic Jumps. *Journal of the Hydraulics Division*, 83(3), 1260–18. <https://doi.org/10.1061/JYCEAJ.0000094>
- Stevens, J. C. (1925). The Hydraulic Jump and Energy Dissipation. *Transactions of the American Society of Civil Engineers (ASCE)*, 89, 657–682.
- Subramanya, S. (2009). *Flow in open channels* (Tata mcgraw-Hill Publishing Company Limited).
- USBR. (1958). *Hydraulic Design of Stilling Basins and Energy Dissipators*. Denver, Colorado, USA, 25.
- Venturi, G. B. (1797). *Recherches expérimentales sur le principe de la communication latérale du mouvement dans les fluides, appliqué à l'explication de différens phénomènes hydrauliques*. Par ... J. B. Venturi .. Chez Houel et Ducros.