



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



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

أطروحة دكتوراه

مقدمة لنيل شهادة الدكتوراه في الطور الثالث (LMD)

الشعبة: الري

التخصص: ري حضري

العنوان:

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

إعداد الطالب: خشيبة هارون

إشراف: غمري علي

نوقشت أمام لجنة المناقشة:

الاسم واللقب	الرتبة	الجامعة	الصفة
وقواق عبد القادر	Pr	جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي	رئيساً
غمري علي	Pr	جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي	مشرفاً
كاتب سمير	Pr	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة	مساعداً مشرفاً
هاشمي علي	Directeur de recherche	CRSTRA - بسكرة	مناقشاً
باوية قيس	Pr	جامعة قاصدي مرباح - ورقلة	مناقشاً
خشانة سليم	Pr	جامعة الشهيد حمه لخضر - الوادي	مناقشاً

لسنة الجامعية: 1446-1447 هـ / 2024-2025 م



Dédicace

*Je remercie tout d'abord « **ALLAH** » de
m'avoir donné la capacité de savoir et de
réussir afin de réaliser ce projet.*

*Je dédie ce mémoire à **mon père** et **ma mère***

Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

*A tous **mes amis** qui m'ont toujours encouragé, et à qui je*

Souhaite plus de succès.

*À **mon encadrant, M. Ali Ghomri**, pour son accompagnement*

Précieux et ses conseils éclairés tout au long de ce projet.

*À **mes chers amis Djamel Besser et Ibtissam Herri**, avec qui*

J'ai partagé des moments inoubliables.

À toutes les personnes que j'aime et qui occupent

Une place particulière dans ma vie

Merci à vous tous.



ملخص

تتناول هذه الدراسة التحليل التجريبي والنظري للقفزة الهيدروليكية في القنوات المستطيلة ذات المقطع المركب (المجرى الرئيسي والمجرى الفيضي) ومنحدر صفري. وعلى عكس الأعمال التقليدية حول القنوات الموشورية، تركز هذه الأطروحة على تأثير الخشونة على خصائص القفزة المائية (مثل الأعماق المترافقة وطول القفزة). أُجريت التجارب في قناة مخبرية مستطيلة ذات مقطع مركب، حيث جرت محاكاة خشونات مختلفة باستخدام حبيبات بلاستيكية. وتُظهر النتائج التجريبية أن الزيادة في الخشونة، خاصة خشونة المجرى الرئيسي، أدت إلى نقصان في الأعماق المائية وطول القفزة، مقابل زيادة في تبديد الطاقة. وقد طُوّرت علاقة شبه نظرية تعتمد على نظرية أويلر لحساب نسبة العمق المترافق كدالة تتغير بدلالة عدد فرود والخشونة المطلقة. كما تم إيجاد معادلات تجريبية لا بُدعية لطول القفزة المائية بدلالة الخشونة النسبية وعدد فرود. وأظهر التحقق الإحصائي ارتباطاً جيداً بين العلاقات النظرية المُطوّرة والنتائج التجريبية.

الكلمات المفتاحية: القفزة الهيدروليكية؛ قناة مستطيلة مركبة؛ خشونة؛ ميل معدوم؛ تبديد الطاقة؛ أحواض التهدة.

RÉSUMÉ

Cette étude aborde l'analyse expérimentale et théorique du ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires à section composée (lit mineur rugueux et lit majeur rugueux) et pente nulle. Contrairement aux travaux ordinaires sur les canaux prismatiques, cette thèse se concentre sur l'effet de la rugosité sur des caractéristiques du ressaut hydraulique telles que : le rapport des profondeurs conjuguées, la longueur du ressaut, la dissipation d'énergie, etc ... Les expériences ont été menées sur un banc d'essai au laboratoire où différentes rugosités ont été testées à l'aide de granulats en plastique. Les résultats expérimentaux montrent que l'augmentation de la rugosité, en particulier celle du lit mineur, réduit le rapport des profondeurs conjuguées et raccourcit la longueur du ressaut, ce qui entraîne une augmentation de la dissipation d'énergie. Une approche semi-théorique, basée sur la théorie d'Euler, a été développée pour trouver le rapport des profondeurs conjuguées en fonction de diverses variables telles que le nombre de Froude incident, et la rugosité absolue. Des équations adimensionnelles ont été établies pour lier la longueur relative du ressaut à la rugosité relative et au nombre de Froude. La validation statistique a montré une forte corrélation entre les approches globales obtenues et les résultats expérimentaux.

MOTS CLÉS : Ressaut hydraulique ; canal rectangulaire de section composée ; rugosité ; pente nulle ; dissipation d'énergie ; bassins d'amortissement.

Abstract

This study addresses the experimental and theoretical analysis of hydraulic jump in rectangular channels with compound section (rough minor bed and rough major bed) and zero slope. Unlike ordinary works on prismatic channels, this thesis focuses on the effect of roughness on characteristics of hydraulic jump such as: conjugate depth ratio, jump length, energy dissipation, etc. ...The experiments were conducted on a laboratory test bench where different roughnesses were tested using plastic aggregates. The experimental results show that increasing roughness, especially that of the minor bed, reduces the conjugate depth ratio and shortens the jump length, which leads to an increase in energy dissipation. A semi-theoretical approach, based on Euler theory, was developed to find the conjugate depth ratio as a function of various variables such as the incident Froude number, and absolute roughness. Dimensionless equations were established to relate the relative jump length to the relative roughness and Froude number. Statistical validation showed a strong correlation between the obtained global approaches and the experimental results.

KEYWORDS: Hydraulic jump; compound rectangular channel; roughness; zero slope; energy dissipation; stilling basins.

Sommaire

Titre	N° de page
Remerciements	
Dédicace	
ملخص	
RÉSUMÉ	
Abstract	
Sommaire	
Liste des figure	
Listes de tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale	1
PREMIÈRE PARTIE	
Introduction à la premiere partie	4
CHAPITRE I : ÉTUDE ANTÉRIEURE DU RESSAUT HYDRAULIQUE ÉVOLUANT EN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSÉ	
Introduction	5
I.1 Approche De Khattaoui Et Achour 2012	5
I.1.1 Rapport Des Hauteurs Conjuguees	5
I.1.2 Rendement Du Ressaut Hydraulique	9
	8
Conclusion :	11
CHAPITRE II : ÉTUDE ANTÉRIEURE DU L'EFFET DE LA SECTION COMPOSÉE SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE	
Introduction	12
II.1 Approche Riguet , Debabeche Et Ghomri 2020	12
II.1.1 La problématique	12
II.1.2 Évaluation des essais expérimentaux	13
II.1.3 Résultats obtenus par l'expérimentation	14
II.1.3.1 Le rapport (Y) des hauteurs conjuguées	14

II.1.3.2 Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1	15
II.1.3.3 Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface par rapport au nombre de Froude F_1	16
II.1.3.4 L'efficacité du rendement (η) du ressaut hydraulique	17
Conclusion	18

CHAPITRE III : ÉTUDE ANTÉRIEURE DE LA CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE SUR FOND RUGUEUX DANS UN CANAL RECTANGULAIRE À SECTION COMPOSÉE

Introduction	19
III.1 Analyse des propriétés de l'écoulement hydraulique	19
III.1.1 Analyse de la variation du rapport L_j/h_1 selon le nombre de Froude F_1	19
III.1.1.1 Analyse de la longueur adimensionnelle du ressaut (L_j/h_1) en relation avec le nombre de Froude (F_1) en lit mineur (pour $0 < h_2 < 20$ cm)	19
III.1.1.2 Analyse de l'évolution de la longueur relative du ressaut (L_j/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1) dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$ cm).	22
III.1.2 Étude de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude incident (F_1)	26
III.1.2.1 Étude de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude incident (F_1) pour le lit mineur ($0 < h_2 < 20$ cm)	26
III.1.2.2 Étude de la variation de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1) dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$ cm)	29
III.1.3 La variation du rapport Y (h_2/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1)	33
III.1.3.1 Rapport des hauteurs caractéristiques du ressaut (Y) en fonction du nombre de Froude (F_1) dans le lit mineur ($0 < h_2 < 20$ cm)	33
III.1.3.2 Étude de la variation du rapport $Y = h_1/h_2$ avec le nombre de Froude (F_1) dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$ cm)	36
III.1.4 La variation de la hauteur relative du seuil (S/h_1) en fonction du nombre de Froude incident (F_1)	40
III.1.4.1 Étude de la variation du seuil (S/h_1) avec le nombre de Froude (F_1) dans le lit mineur ($0 < h_2 < 20$ cm)	40
III.4.2 Étude de la variation du seuil (S/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1) dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$ cm)	43
Conclusion	47

Conclusion de la première partie	48
----------------------------------	----

DEUXIÈME PARTIE

Introduction de la deuxième partie	50
------------------------------------	----

CHAPITRE I : DISPOSITIF ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Introduction	51
I.1 Description du canal expérimental utilisé pour les expériences du ressaut hydraulique	51
I.2 Les appareillages de mesure	
I.2.1 Le calcul du débit	54
I.2.2 Limnimètre pour la mesure du niveau d'eau	56
I.2.3 Description des Parois de Contrôle et de la Hauteur d'Ouverture en Amont dans l'Expérimentation du Ressaut Hydraulique	57
I.2.4 Procédure de préparation des tapis rugueux	58
I.3 Protocol d'étude expérimentale	59
Conclusion	60

CHAPITRE II : ÉTUDE SEMI-THÉORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE SUR LITS RUGUEUX

Introduction	61
II.1 Analyse Théorique	61
II.2 Protocol d'étude expérimentale	65
Conclusion	72

CHAPITRE III : ETUDE EXPÉRIMENTALE

Introduction	73
III.1 Analyse des propriétés de l'écoulement hydraulique	73
III.1.1 Analyse de la variation du rapport L_j/h_1 avec le nombre de Froude F_1	73
III.1.2 Analyse de la variation du rapport (L_r/h_1) selon le nombre de Froude F_1	79
III.1.3 Analyse de la variation du rapport Y selon le nombre de Froude F_1	86
III.1.4 Analyse de l'influence du nombre de Froude incident sur la hauteur relative du seuil S/h_1	92
III.1.5 Efficacité énergétique du ressaut hydraulique	99
III.1.6 Exercice de calcul des caractéristiques de l'écoulement	102

Récapitulation des résultats	107
CONCLUSION GENERALE	110
Références bibliographiques	113
Annexe	118

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I : ÉTUDE ANTÉRIEURE DU RESSAUT HYDRAULIQUE ÉVOLUANT EN CANAL RECTANGULAIRE COMPOSÉ

- Figure I.1 : Montre la configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée. 6
- Figure I.2 : La variation Y , calculée en utilisant l'équation (I.7) 8
- Figure I.3 : La variation Y par rapport au nombre de Froude F_1 , (o) : équation (I.9), (+) : équation (I.7). 9
- Figure I.4 : La variation η , calculée en utilisant l'équation (I.9) par rapport au nombre de Froude F_1 , 10
- Figure I.5 : Représentation de l'efficacité (η) en fonction F_1 . 11

CHAPITRE II : ÉTUDE ANTÉRIEURE DU L'EFFET DE LA SECTION COMPOSÉE SUR LE RESSAUT HYDRAULIQUE

- Figure II.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince en canal rectangulaire de section composée. 13
- Figure II.2 : Le canal ayant servi à l'expérimentation. 14
- Figure II.3 : Rapport des hauteurs conjuguées Y par rapport au nombre de Froude F_1 . 15
- Figure II.4 : Rapport des hauteurs conjuguées Y par rapport au nombre de Froude F_1 . 16
- Figure II.5 : Représentation du graphique de la variation de la longueur relative du rouleau 17
- Figure II.6 : Représentation de l'efficacité (η) par rapport au nombre de Froude F_1 . 18

CHAPITRE III : ÉTUDE ANTÉRIEURE DE LA CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE SUR FOND RUGUEUX DANS UN CANAL RECTANGULAIRE À SECTION COMPOSÉE

- Figure III.1 : Illustration de la variation de la longueur adimensionnelle L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude pour un écoulement en lit mineur ($0 < h_2 < 20$ cm), en considérant cinq valeurs distinctes de rugosité (ϵ), à savoir 12 mm ($\diamond$), 10 mm ($\square$), 8 mm (Δ), 6 mm (o) et 0 mm (*). (—) Courbes d'ajustements. 20

Figure III.2 : Représentation du coefficient « a1 » avec rugosité (ε/b).	21
Figure III.3 : Représentation de l'approche globale expérimentale $L_j / h_1 = f(\varepsilon/b, F_1)$ avec les points expérimentaux L_j/h_1 . (—) Première bissectrice.	22
Figure III.4 : Illustration de la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour cinq valeurs distinctes de rugosité « ε » : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et (*) 0 mm.	23
Figure III.5 : Représentation du coefficient " b1" et de rugosité relative ε/B dans le lit majeur.	24
Figure III.6 : illustration des mesures expérimentales de la longueur relative L_j/h_1 ainsi que la relation fonctionnelle $f(\varepsilon/B, F_1)$. ($\square$) Les points correspondent aux données expérimentales du ressaut contrôlé sur fond rugueux dans le lit majeur.	25
Figure III.7 : Illustration expérimentale de l'évolution de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 en fonction de $f(\varepsilon/b, F_1)$ pour les deux configurations (lit mineur et lit majeur).	26
Figure III.8 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1), pour cinq rugosités différentes « ε » : ($\square$) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm ; (*) 0 mm ; ($\diamond$) 12 mm et ($\square$) 10 mm. (—) Courbes de corrélation.	27
Figure III.9 : Représentation du coefficient « a2 » en fonction de la rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur.	28
Figure III.10 : Représentation de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction de $f(\varepsilon/b, F_1)$. ($\square$) Données expérimentales obtenues pour le ressaut hydraulique sur lit rugueux. (—) Première bissectrice.	29
Figure III.11 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1), pour cinq rugosités testées : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustement.	30
Figure III.12 : Représentation du coefficient b2 en fonction de la rugosité relative (ε/B) dans le lit majeur.	31
Figure III.13 : Représentation graphique de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) mesurée expérimentalement, comparée à l'équation globale $f(\varepsilon/b, F_1)$. ($\square$) Points expérimentaux obtenus pour le ressaut formé dans le lit majeur et dans le lit mineur rugueux. (—) Première bissectrice.	32
Figure III.14 : Représentation de l'équation générale $f(\varepsilon/b, F_1)$ appliquée à la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1), obtenue expérimentalement pour les deux cas ($\square$ lit mineur ; $\square$ lit majeur).	33

Figure III.15 : Présentation du rapport des hauteurs conjuguées (h_2/h_1) en fonction du nombre de Froude, pour cinq rugosités distinctes : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustement. 34

Figure III.16 : Représentation du coefficient a_3 en fonction de la rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur. 35

Figure III.17 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées (h_2/h_1) en fonction de la relation $f(\varepsilon/b, F_1)$. ($\square$) Points expérimentaux du ressaut hydraulique formé sur fond rugueux. (—) Première bissectrice. 36

Figure III.18 : Représentation du rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude dans le lit majeur, pour cinq rugosités testées : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustement. 37

Figure III.19 : Variation du coefficient b_3 en fonction de la rugosité relative (ε/B) dans le lit majeur. 38

Figure III.20 : Représentation du rapport Y_{exp} et de la fonction $f(\varepsilon/b, F_1)$. ($\square$) Points expérimentaux du ressaut contrôlé sur fond rugueux dans le lit majeur. (—) Première bissectrice. 39

Figure III.21 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées (h_2/h_1) mesuré expérimentalement en fonction de la relation $f(\varepsilon/b, F_1)$, pour les deux configurations : ($\square$ lit mineur ; $\square$ lit majeur). 40

Figure III.22 : Variation de la hauteur relative du seuil (S/h_1) en fonction du nombre de Froude, pour cinq valeurs de rugosité : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustement. 41

Figure III.23 : Représentation du coefficient a_4 en fonction de la rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur. 42

Figure III.24 : Représentation de la hauteur relative du seuil (S/h_1) obtenue expérimentalement et de la relation globale $f(\varepsilon/b, F_1)$. ($\square$) Données expérimentales du ressaut hydraulique formé sur fond rugueux. (—) Première bissectrice. 43

Figure III.25 : Variation de la hauteur relative du seuil (S/h_1) en fonction du nombre de Froude, pour cinq rugosités distinctes : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustement 44

Figure III.26 : Représentation du coefficient b_4 en fonction de la rugosité relative (ε/B) dans le lit majeur. 45

Figure III.27 : Évolution de la hauteur relative du seuil (S/h_1) en fonction de la relation $f(\varepsilon/b, F_1)$. (□) Données expérimentales du ressaut hydraulique formé sur fond rugueux. (—) Première bissectrice. 46

Figure III.28 : Illustration de la hauteur relative S/h_1 obtenue expérimentalement et de la relation empirique $f(\varepsilon/b, F_1)$, considérées pour les deux configurations (□ lit mineur ; □ lit majeur). 47

CHAPITRE I : DISPOSITIF ET PROTOCOLE EXPÉRIMENTAL

Photo I.1 : le canal expérimental destiné à l'étude de ressaut hydraulique	51
Photo I.2 : La pompe utilisée pour générer le débit.	52
Photo I.3 : Bras de réglage de pente expérimentale.	53
Photo I.4 : Bassin d'accumulation dans le canal expérimental.	53
Photo I.5 : Débitmètre d'eau dans le canal expérimental.	54
Photo I.6 : Déversoir rectangulaire inséré dans le canal expérimental.	54
Photo I.7 : Déversoir rectangulaire avec contraction latérale pour mesurer les débits.	55
Photo I.8 : Le limnimètre utilisé pour mesurer la hauteur d'eau dans le canal expérimental.	56
Photo I.9 : Parois minces de contrôle pour la formation du ressaut hydraulique.	57
Photo I.10 : Ouvertures h_1 du canal utilisé à l'étude du ressaut hydraulique.	58
Photo I.11 : - 1. Adhésif Mitreapel utilisé pour la fixation 2. Application de l'adhésif sur les tapis rugueux.	58
Photo I.12 : - 1. Adhésif Tekasil utilisé pour la fixation 2. Tapis rugueux installé dans le canal expérimental.	59

CHAPITRE II : ÉTUDE SEMI-THÉORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE SUR LITS RUGUEUX

Figure II.1 : Représentation schématique d'un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince.	62
Figure II.2 : Variation de l'expression $f(Y)$ en fonction de F_{12} pour différentes valeurs de rugosité des lits.	66
Figure II.3 : Variation de Cr en fonction de ε/B .	68
Figure II.4 : Variation de $f(Y)$ par rapport à $F_{12}(1 - 0.4166 (\varepsilon/B)\beta)$.	69
Figure II.5 : Variation de Y expérimental par rapport à $F_{12}(1 - 0.4166 (\varepsilon/B)\beta)$.	70

CHAPITRE III : ETUDE EXPÉRIMENTALE

Figure III.1 : Variation de la longueur relative du ressaut hydraulique dans le lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm) en fonction du nombre de Froude. 74

Figure III.2 : Variation de la longueur relative du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude, pour le lit majeur : ($15,5 < h_2 < 28$ cm). 74

Figure III.3 : Variation du coefficient (a_1) avec la rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur. 76

Figure III.4 : Variation du coefficient a_2 en fonction de la rugosité relative (ε/B) dans le lit majeur. 76

Figure III.5 : Illustration graphique de la corrélation entre les valeurs expérimentales de la longueur du ressaut (L_j/h , exp) et les valeurs issues de l'équation globales (1). 77

Figure III.6 : Représentation des rapports expérimentaux de la longueur du ressaut (L_j/h , exp) et celles obtenues par l'équation globale 2. 78

Figure III.7 : Graphique illustrant la corrélation entre les rapports expérimentaux de longueur de ressaut (L_j/H_1 exp) et les valeurs obtenues par les équations globales pour les lits majeur et mineur. 79

Figure III.8 : Relation entre la longueur normalisée du rouleau de surface du ressaut hydraulique (L_r/h_1) et le nombre de Froude amont (F_1) dans le lit mineur pour différentes rugosités du lit. 80

Figure III.9 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface du ressaut hydraulique (L_r/h_1) dans le lit majeur en fonction du nombre de Froude amont (F_1) pour différentes rugosités du lit. 81

Figure III.10 : Relation linéaire entre la rugosité relative (ε/b) et le coefficient a_1 dans le lit mineur. 83

Figure III.11 : Variation du coefficient de régression a_2 en fonction de la rugosité relative (ε/B) pour le lit majeur. 83

Figure III.12 : Comparaison entre les valeurs expérimentales L_r/h_1 et les valeurs issues de la relation globale obtenue. 96

Figure III.13 : Concordance entre les données expérimentales L_r/h_1 et les valeurs issues de la relation globale pour le lit majeur. 85

Figure III.14 : Comparaison entre les valeurs des deux relations globales obtenues (L_r/h_1) et celles expérimentales de la longueur du rouleau du ressaut hydraulique pour les lits majeur et mineur. 86

Figure III.15 : Relation entre le rapport des hauteurs conjuguées (Y) et le nombre de Froude amont (F_1) dans le lit mineur, sous différentes conditions de rugosité du lit.	87
Figure III.16 : Relation entre le rapport des hauteurs conjuguées (Y) et le nombre de Froude amont (F_1) dans le lit majeur, sous différentes rugosités du lit majeur.	88
Figure III.17 : Corrélation linéaire entre la rugosité relative (ε/b) et le coefficient a_1 dans le lit mineur.	89
Figure III.18 : Variation du coefficient de régression a_2 en fonction de la rugosité relative (ε/B).	89
Figure III.19 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs issues de la relation globale de Y pour le lit mineur selon l'équation de régression $Y = f(\varepsilon/b, F_1)$.	90
Figure III.20 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs issues de $Y = f(\varepsilon/B, F_1)$. Pour le lit majeur,	91
Figure III.21 : présentation de la relation entre les valeurs expérimentales (Y_{exp}) et les équations pour les lits majeur et mineur de la section rectangulaire composé.	92
Figure III.22 : Variation du rapport S/h_1 dans le lit mineur en fonction du nombre de Froude amont (F_1) pour différentes rugosités du lit.	93
Figure III.23 : Évolution du rapport S/h_1 en fonction du nombre de Froude amont (F_1) dans le lit majeur, selon différentes rugosités du lit.	94
Figure III.24 : Évolution du coefficient de régression a_1 en fonction de la rugosité relative (ε/b).	96
Figure III.24 : Évolution du coefficient de régression a_2 en fonction de la rugosité relative (ε/B).	96
Figure III.25 : Concordance entre les données expérimentales et les valeurs estimées de S/h_1 dans le cas du lit mineur.	97
Figure III.26 : Concordance entre les données expérimentales et les valeurs estimées de la relation d'ajustement global S/h_1 pour le lit majeur.	97
Figure III.27 : Représentation de la relation entre les valeurs expérimentales S/h_1 et les valeurs prédites par les équations de régression pour les lits mineur et majeur.	99
Figure III.28 : La relation entre le rendement η théorique et le nombre de Froude amont (F_1) pour deux types de lits : lit majeur et lit mineur.	

Listes de tableaux

CHAPITRE III : ÉTUDE ANTÉRIEURE DE LA CARACTÉRISATION EXPÉRIMENTALE DU RESSAUT HYDRAULIQUE SUR FOND RUGUEUX DANS UN CANAL RECTANGULAIRE À SECTION COMPOSÉE

Tableau III.1 : présentation de synthèse des valeurs obtenues pour le coefficient α_1 .	20
Tableau III.2 : récapitulation des valeurs obtenues du coefficient b_1 .	23
Tableau III.3 : Coefficient a_2 des courbes d'ajustements.	27
Tableau III.4 : Coefficients b_2 des Courbes d'ajustements.	30
Tableau III.5 : Coefficient a_3 des courbes d'ajustements.	34
Tableau III.6 : Coefficient b_3 des courbes d'ajustements.	37
Tableau III.7 : Coefficient a_4 des courbes d'ajustements.	42
Tableau III.8 : Coefficient b_4 des courbes d'ajustements.	44

CHAPITRE II : ÉTUDE SEMI-THÉORIQUE DU RESSAUT HYDRAULIQUE SUR LITS RUGUEUX

Tableau II.1 : Les valeurs du Cr	67
------------------------------------	----

CHAPITRE III : ETUDE EXPÉRIMENTALE

Tableau III.1 : Rugosité relative et coefficients de régression pour les lits mineur et majeur.	75
Tableau III.2 : Écarts relatifs entre les longueurs normalisées de ressaut hydraulique (L_j/h_1), issues des mesures expérimentales et celles estimées à partir de l'équation d'ajustement, pour le lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm).	125
Tableau III.3 : Écarts relatifs entre les longueurs relatives du ressaut hydraulique (L_j/h_1), obtenues expérimentalement et celles obtenues par l'équation d'ajustement globales, dans le cas du lit majeur ($15,5 \leq h_2 < 28$ cm).	126
Tableau III.4 : Coefficients de régression (a_1, a_2) et coefficients de détermination (R^2) pour les différentes configurations remarquées aux lits mineur et majeur.	81
Tableau III.5 : Écarts relatifs entre les mesures expérimentales des longueurs du rouleau de surface du ressaut hydraulique (L_r/h_1), et celles estimées à partir de l'équation globale d'ajustement, pour le lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm).	130

Tableau III.6 : Écarts relatifs entre les longueurs du rouleau du ressaut hydraulique (L_r/h_1), issues des mesures expérimentales et celles estimées à partir de l'équation d'ajustement, pour le lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm).	132
Tableau III.7 : Rugosité relative et coefficients de régression pour les lits mineur et majeur.	88
Tableau III.8 : Écarts relatifs entre les rapports Y du ressaut hydraulique, déduites des mesures expérimentales et ceux estimés à partir de l'équation globale pour le lit mineur.	136
Tableau III.9 : Écarts relatifs entre les rapports Y du ressaut hydraulique, issues des mesures expérimentales et ceux estimés à partir de selon l'équation pour le lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm).	138
Tableau III.10 : La rugosité relative et coefficients de régression obtenus pour les différents ajustements aux lits mineur et majeur.	94
Tableau III.11 : Les écarts relatifs entre les rapports S/h_1 , issues des mesures expérimentales et ceux estimés par l'équation d'ajustement pour le lit mineur.	142
Tableau III.12 : Écarts relatifs entre les rapports S/h_1 obtenus expérimentalement et ceux estimés par l'équation d'ajustement pour le lit majeur.	143

Nomenclature

Paramètres géométriques

A_1, A_2 : Respectivement, l'aire de la section d'écoulement à l'amont (initiale) et à l'aval (finale) du ressaut, en mètres carrés (m^2).

b, B : Respectivement, la largeur du lit mineur et la largeur du lit majeur du canal, en mètres (m).

h : Profondeur d'écoulement à plein bord dans le lit mineur, en mètres (m).

h_1, h_2 : Profondeurs conjuguées du ressaut ; **h_1** est la profondeur supercritique à l'amont et **h_2** est la profondeur subcritique à l'aval, en mètres (m).

P : Le périmètre mouillé de la section d'écoulement, en mètres (m).

R_h : Le rayon hydraulique, défini par le rapport A/P , en mètres (m).

s, X : Respectivement, la hauteur et la position longitudinale d'un seuil, en mètres (m).

ε : La rugosité absolue du lit (majeur et mineur) du canal, généralement exprimée en millimètres (mm) ou en mètres (m).

Paramètres cinématiques et dynamiques

Q : Le débit volumétrique total de l'écoulement, en mètres cubes par seconde (m^3/s).

V_1, V_2 : La vitesse moyenne de l'écoulement dans la section à l'amont (V_1) et à l'aval (V_2) du ressaut, en mètres par seconde (m/s).

F_1 : Le nombre de Froude de l'écoulement en amont du ressaut, critère de l'état supercritique, sans dimension.

Re : Le nombre de Reynolds, caractérisant le régime d'écoulement (laminaire ou turbulent), sans dimension.

• Forces et pressions

F_1, F_2 : Les résultantes des forces de pression hydrostatique agissant sur les sections d'écoulement amont et aval, en newtons (N).

f_1, f_2 : Termes parfois employés pour désigner les forces hydrostatiques à l'amont et à l'aval du ressaut, en newtons (N).

f_x : La force de résistance exercée par la rugosité du fond et des parois sur le volume de contrôle du ressaut, en newtons (N).

ΣF_{ext} : La somme vectorielle de toutes les forces extérieures appliquées au volume de contrôle, en newtons (N).

Grandeurs énergétiques

H_1, H_2 : La charge hydraulique totale (hauteur piézométrique + énergie cinétique) dans les sections amont et aval, en mètres (m).

ΔH : La perte de charge singulière due au ressaut hydraulique, représentant l'énergie dissipée, en mètres (m).

η : Le rendement du ressaut, caractérisant l'efficacité de la dissipation d'énergie, sans dimension.

Caractéristiques du ressaut et coefficients adimensionnels

L_j : La longueur du ressaut hydraulique, en mètres (m).

L_r : La longueur du rouleau de surface, du ressaut, en mètres (m).

Y : Le rapport des profondeurs conjuguées (h_2/h_1), sans dimension.

C_r : Un coefficient de résistance ou de frottement, sans dimension.

β : Le rapport d'élargissement du canal (par exemple, b/B), sans dimension.

Propriétés du fluide et constantes

g : L'accélération de la pesanteur, environ 9.81 m/s^2 .

ρ : La masse volumique du fluide (pour l'eau, environ 1000 kg/m^3).

Introduction générale

Dans le domaine de l'ingénierie hydraulique, la gestion des écoulements à haute vitesse est un enjeu majeur, notamment pour prévenir l'érosion des lits de canaux et assurer l'intégrité des structures. Le ressaut hydraulique, phénomène d'une importance capitale, se caractérise par une transition turbulente d'un écoulement supercritique à un écoulement subcritique. Cette transition est accompagnée d'une dissipation massive de l'énergie cinétique, rendant le ressaut indispensable dans la conception d'ouvrages tels que les déversoirs, les ouvertures de vannes et, plus spécifiquement, les bassins de tranquillisation (Felder, S. & Chanson, H. (2011)). L'efficacité d'un bassin de tranquillisation est directement liée à sa capacité à contenir le ressaut et à dissiper l'énergie de manière optimale, un paramètre intrinsèquement lié à la longueur du rouleau de ce ressaut (Mohamed Ali, 1991).

L'étude des ressauts hydrauliques a fait l'objet de nombreuses recherches depuis plus d'un siècle, en commençant par des analyses fondamentales sur des canaux à lits lisses et de section simple. Ces travaux ont permis d'établir des relations empiriques et des équations adimensionnelles reliant la longueur du ressaut, la hauteur conjuguée, et le nombre de Froude amont (Gupta et al., 2013).

Pour améliorer l'efficacité des bassins de tranquillisation et réduire leurs dimensions, des chercheurs ont ensuite parcouru l'impact de la rugosité du lit. Les études ont démontré que l'introduction d'éléments de rugosité sur le fond du canal augmente la turbulence et l'échange de quantité de mouvement, ce qui se traduit par une réduction significative de la longueur du rouleau et du rapport de profondeur conjuguée (Ead & Rajaratnam, 2002 ; Carollo et al., 2007 ; Abbaspour et al., 2009 ; Mohamed Ali, 1991 ; Djamaa et al., 2021). Selon Ead et Rajaratnam (2002), les lits uniformément rugueux peuvent réduire la longueur du ressaut jusqu'à 35% par rapport à un canal lisse. De même, Carollo et al. (2007) ont confirmé que l'augmentation de la rugosité réduit le rapport de profondeur conjuguée. Ces découvertes ont posé les bases de la conception de structures plus compactes et économiquement stables.

Cependant, la plupart de ces recherches se sont concentrées sur des canaux de section prismatique, un modèle qui ne reflète pas la complexité des systèmes hydrauliques réels. En pratique, de nombreux canaux naturels ou artificiels sont de section composée, c'est-à-dire qu'ils comportent un lit mineur principal pour les écoulements de base et des lits majeurs (ou plaines d'inondation) pour les crues. Les études sur le ressaut hydraulique dans ces canaux à section

composée sont moins nombreuses (Khattaoui & Achour, 2012 ; Benabdesselam, 2020 ; Riguet et al., 2020), et ont principalement porté sur les lits lisses ou partiellement rugueux. Khattaoui et Achour (2012) et Benabdesselam (2020) ont montré que la géométrie composée influence la profondeur conjuguée et la dissipation d'énergie, tandis que Riguet et al. (2020) ont étudié le rapport de profondeur. Plus récemment, Djamaa et Ghomri (2020) ont examiné l'effet d'un fond rugueux sur la longueur du rouleau dans ce type de configuration, bien que leur approche soit restée exploratoire. De plus, Djamaa et al. (2021) ont démontré que la rugosité du lit mineur peut influencer le nombre de Froude pour la formation du ressaut. Néanmoins, ces études se limitent souvent à des rugosités appliquées à une seule partie du canal composé (généralement le lit mineur), laissant une lacune significative dans la compréhension globale du phénomène.

Malgré l'existence d'une littérature riche sur les ressauts hydrauliques, il subsiste une lacune majeure et non résolue : l'influence conjointe d'une rugosité uniformément appliquée à la fois sur le lit mineur et le lit majeur d'un canal composé. Dans des conditions réelles (lits gravier, plaines inondables avec végétation), une telle configuration est courante mais demeure non-étudiée. La plupart des recherches existantes ne tiennent pas compte en considération l'effet de la rugosité sous une pente nulle, qui est pourtant la condition la plus représentative des bassins de tranquillisation.

L'objectif principal de cette thèse est de combler cette lacune en traitant une étude expérimentale complète du ressaut hydraulique qui se produit dans un canal rectangulaire à section composée avec un lit mineur et un lit majeur uniformément rugueux, et sous une pente nulle.

Plus spécifiquement, les objectifs de recherche sont les suivants :

- Caractériser le comportement hydrodynamique du ressaut hydraulique pour différentes valeurs de rugosité et nombres de Froude.
- Développer des relations empiriques adimensionnelles en fonction du nombre de Froude et de la rugosité relative, offrant ainsi des outils prédictifs pour les concepteurs.
- Quantifier l'efficacité de la dissipation d'énergie en fonction de la rugosité du lit, afin de démontrer le potentiel de cette technique pour la conception de bassins

de tranquillisation plus compacts.

Cette thèse est scindée en deux parties principales :

La première partie est une étude bibliographique approfondie. Elle synthétise les travaux antérieurs pour établir la base théorique de la recherche.

- Le Chapitre 1 présente les contributions majeures sur les ressauts en canaux composés (Khattaoui & Achour, 2012 ; Riguet et al., 2020), en se concentrant sur les rapports de hauteurs et l'efficacité du ressaut.
- Le Chapitre 2 est consacré aux études expérimentales sur les ressauts en section composée, abordant leur formation et les méthodologies de mesure.
- Le Chapitre 3 examine l'influence de la rugosité sur des caractéristiques fondamentales comme la longueur du rouleau et le rapport de hauteurs conjuguées, dans le contexte des canaux composés.

La deuxième partie est consacrée à l'étude pratique et appliquée.

- Le Chapitre 1 décrit en détail le dispositif expérimental et la méthodologie de mesure.
- Le Chapitre 2 développe un modèle semi-théorique qui intègre des paramètres adimensionnels comme le nombre de Froude et la rugosité relative pour prédire les caractéristiques du ressaut.
- Le Chapitre 3 présente les résultats expérimentaux et les relations empiriques obtenues pour la longueur du ressaut et la dissipation d'énergie.

L'originalité de cette thèse réside dans son étude systématique de l'effet d'une rugosité relative uniforme sous pente nulle, offrant ainsi des outils de dimensionnement pratiques et fiables pour les ouvrages hydrauliques notamment les bassins d'amortissement.

Introduction à la première partie

Dans les canaux rectangulaires de section composée, le ressaut hydraulique montre une complexité particulière : l'interaction entre le lit mineur et le lit majeur modifie les mécanismes classiques de dissipation, et la présence éventuelle de rugosité accentue cette hétérogénéité. L'étude de ce phénomène est donc essentielle pour améliorer les modèles existants et développer des outils fiables pour le dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Cette première partie est consacrée à l'étude bibliographique et à la synthèse des travaux antérieurs. Elle vise à identifier les approches théoriques et expérimentales qui ont permis de caractériser le ressaut hydraulique dans des configurations prismatiques simples, puis à mettre en lumière les recherches plus récentes concernant les canaux rectangulaires composés.

Le premier chapitre présente les contributions majeures de Khattaoui et Achour (2012), qui se sont intéressés au rapport des hauteurs conjuguées et à l'efficacité du ressaut dans les sections composées, ainsi que celles de F. Riguet et al., qui ont apporté une base expérimentale précieuse sur l'évolution du ressaut hydraulique dans ce type de canal.

Le deuxième chapitre est dédié à l'étude expérimentale de l'effet de la section composée sur le ressaut hydraulique, en abordant les conditions de formation, la méthodologie de mesure et les principaux résultats relatifs aux rapports de hauteurs et aux longueurs caractéristiques.

Enfin, le troisième chapitre examine l'influence de la rugosité du lit sur le ressaut hydraulique dans les canaux à section composée. Une attention particulière est portée à l'effet de la rugosité relative et du nombre de Froude incident sur des caractéristiques principales tels que : la longueur du ressaut, la longueur du rouleau de surface, le rapport des hauteurs conjuguées et la hauteur relative du seuil.

Ainsi, cette première partie constitue le socle théorique et scientifique sur lequel repose la suite du travail. Elle met en évidence les acquis de la littérature, les perspectives d'amélioration qui justifient l'approche expérimentale développée dans la seconde partie.

Chapitre I : Étude antérieure du ressaut hydraulique hydraulique évoluant en canal rectangulaire composé

Introduction

Dans ce chapitre nous allons étudier les travaux de khattaoui et achour 2012 réalisés concernant le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée s'intéressant à étudier le rapport des hauteurs conjuguées dans une section composée et l'efficacité du ressaut.

I.1 APPROCHE DE KHATTAOUI ET ACHOUR 2012

La recherche porte sur la complexité de l'étude des écoulements uniformes et non-uniformes dans les sections composées en raison de la dissipation d'énergie causée par le transfert de masse dans les lits mineurs et majeurs. L'importance de ces dissipations lors d'un ressaut hydraulique est examinée, en utilisant le développement théorique de : Achour (2000) sur les ressauts hydrauliques dans une galerie circulaire brusquement agrandie. une méthode théorique est inspirée dans cette étude pour calculer le rapport Y dans une section composée. L'efficacité du ressaut est également mesuré.

I.1.1 RAPPORT DES HAUTEURS CONJUGUEES

Les diverses propriétés géométriques et hydrauliques du ressaut hydraulique en lit de section composée rectiligne sont exposées dans la figure (I.1).

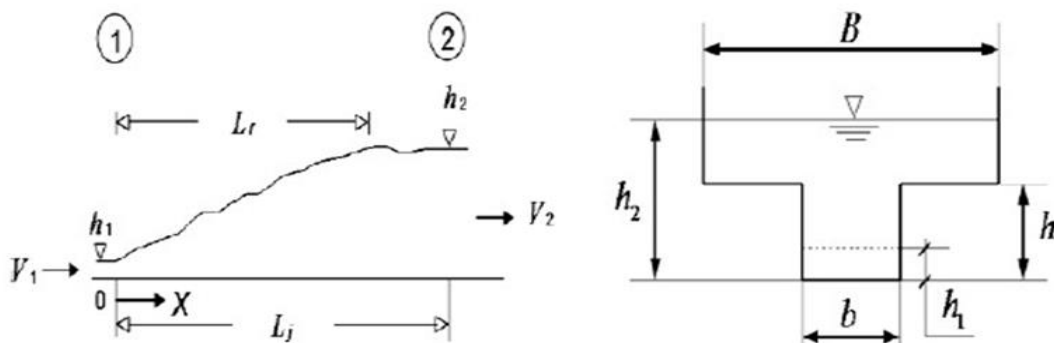


Figure I.1 : la configuration du ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire de section composée. (Achour, 2000)

D'après Bousmar et al. (2004), un transfert de quantité de mouvement et de masse apparaît entre le lit mineur et le lit majeur d'un canal rectangulaire à section composée. La théorie présentée par la figure (I.1) indique que ce transfert se fait entre l'amont et l'aval du ressaut. L'équation suivante représente la quantité de mouvement entre 1 et 2 :

$$\rho Q (\beta_2 \cdot V_2 - \beta_1 \cdot V_1) = f_1 - f_2 \quad (I.1)$$

Où :

f_1 et f_2 : les forces hydrostatiques situées au pied et à la fin du ressaut.

Q : le débit volumique (m³/s).

V_1 et V_2 : les vitesses au pied et à la fin du ressaut. (m/s)

ρ : La masse volumique (kg/m³).

β_1 et β_2 : se sont les coefficients de correction de la quantité de mouvement.

En utilisant l'article de Achour (2000) et en considérant la forme de la relation (I.2) ainsi que l'analogie avec la relation de Borda-Carnot, il est possible d'ajouter une force de résistance dont la projection selon l'axe horizontal de l'écoulement serait exprimée comme suit :

$$F_x = -k \cdot \bar{\omega} (h_2 - h)^x \cdot h_1^y (B - b)^z \quad (I.2)$$

Où :

h_1 et h_2 : se réfèrent aux niveaux d'eau au début et à la fin du ressaut.

h : correspond à la hauteur de la crête du lit mineur. (m)

$\bar{\omega}$: Le poids spécifique du liquide. (N/m³)

Le "coefficient" noté " b " représente la largeur du lit mineur et " B " représente la largeur du lit majeur.

La perte de charge entre les lits mineur et majeur est représentée par cette expression. Les variables d'exposant x , y et z sont reliés par la formule : $x + y + z = 3$, tandis que le facteur k est exprimé comme : $k = \varphi(L_j, L_r, h_1, h_2, h)$. En utilisant la formule : f_x , on peut simplifier

l'équation de la quantité de mouvement d'Euler ainsi :

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = f_1 - f_2 - F_x \quad (I.3)$$

L'équation suivante représente la force de résistance F_x :

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \bar{\omega} (h_2 - h) \cdot h_1 (B - b) \quad (I.4)$$

On a $\beta_1 = \beta_2 = 1$ car les vitesses dans les sections transversales au début et à la fin du ressaut sont uniformément réparties et les sections A_1 et A_2 sont déterminées par les équations :

$$A_1 = b h_1$$

$$A_2 = B(h_2 - h) + b h$$

La pression est distribuée de manière hydrostatique f_1 et f_2 dans les deux parties 1 et 2 du ressaut, ce qui permet d'obtenir les formules des forces :

$$F_1 = \rho Q \left(\frac{h_1}{2} \right) b h_1 \quad (I.5)$$

$$F_2 = \rho Q (h_2 - h/2) b h + \rho Q [(h_2 - h)/2] B (h_2 - h) \quad (I.6)$$

Complément de l'équation de continuité $V_1 \cdot A_1 = V_2 \cdot A_2 = Q$. Après en l'organisant puis la formuler l'équation finale (I.7) comme suit :

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{b h_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + b h} \right) = -\bar{\omega} \left(\frac{h_1}{2} \right) b h_1 + \bar{\omega} \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) b h + \bar{\omega} \left[\frac{(h_2 - h)}{2} \right] B (h_2 - h) \quad (I.7)$$

$$F_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 \cdot h_1^3 g}} \quad (I.8)$$

En utilisant $\tau = h_1 / h$, qui représente le rapport des hauteurs, et $\beta = b / B$, qui représente le rapport d'élargissement, en mettant la force de résistance f_x , on obtient la formule suivante :

$$F_1^2 \left(-1 + \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \right) = \frac{1 - \frac{(2Y - \frac{1}{\tau}) \cdot (Y - \frac{1}{\tau})^2}{\tau \beta}}{2} \quad (I.9)$$

Les équations (I.7) et (I.9) peuvent être considérées comme des équations fonctionnelles ayant pour forme

En effectuant la modification de variable $Y = x - a/3$, l'équation de troisième degré peut être transformée en $Y^3 + pY + q = 0$, qui peut être facilement résolue en utilisant la méthode trigonométrique.

La figure (I.2) montre la variation de Y , calculée par l'équation (I.9), en fonction de F_1 . En fixant une variable, soit β ou τ et, il est possible d'observer des changements dans Y sur une plage de valeurs pour le nombre de Froude F_1 qui sont strictement supérieures à la valeur minimale définie par :

$$F_{1\min} = \left\lfloor \frac{1}{2\sqrt{2}} \right\rfloor \left(\sqrt{\left(\frac{2}{\tau} + 1 \right)^2 - 1} \right) \quad (I.10)$$

Ce seuil correspond à $h_2 = h$ garantissant que le ressaut hydraulique se produit nécessairement dans un canal composé (c'est-à-dire lorsque $h_2 > h$).

En prenant en compte les résultats présentés, il est possible de constater que, pour des valeurs de β et τ données, la valeur de Y augmente de manière continue avec l'augmentation de F_1 . De plus, l'augmentation de la relation entre Y et F_1 est plus rapide pour des valeurs élevées de β . En ce qui concerne l'effet de β et τ sur Y , les résultats indiquent que, pour une valeur fixe de F_1 , Y augmente avec l'augmentation de β et diminue avec l'augmentation de τ .

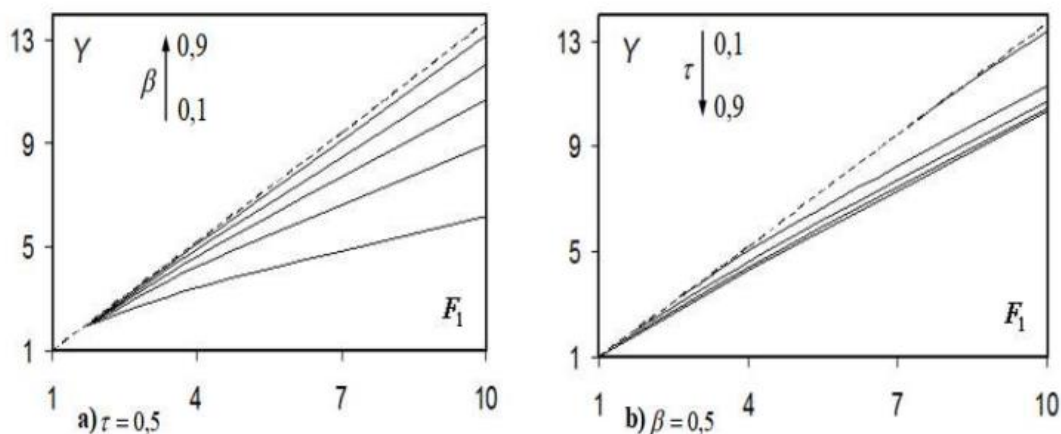


Figure I.2 : La variation Y , calculée en utilisant l'équation (I.7)

par rapport au nombre de F_1 , où la ligne (- -) correspond à $\beta = 1$. (Achour, 2000)

La figure illustre la variation Y par rapport nombre de F_1 avec $\beta = \tau = 0,5$, On peut observer que les rapports Y calculés à l'aide de l'équation (I.4) qui tient compte des forces de

frottement sont inférieurs à ceux obtenus à partir de l'équation (I.8). Cette variation devient plus apparente à mesure que F_1 augmente. La force f_x est utilisée pour exprimer les pertes de charge résultant de l'écoulement vers le haut.

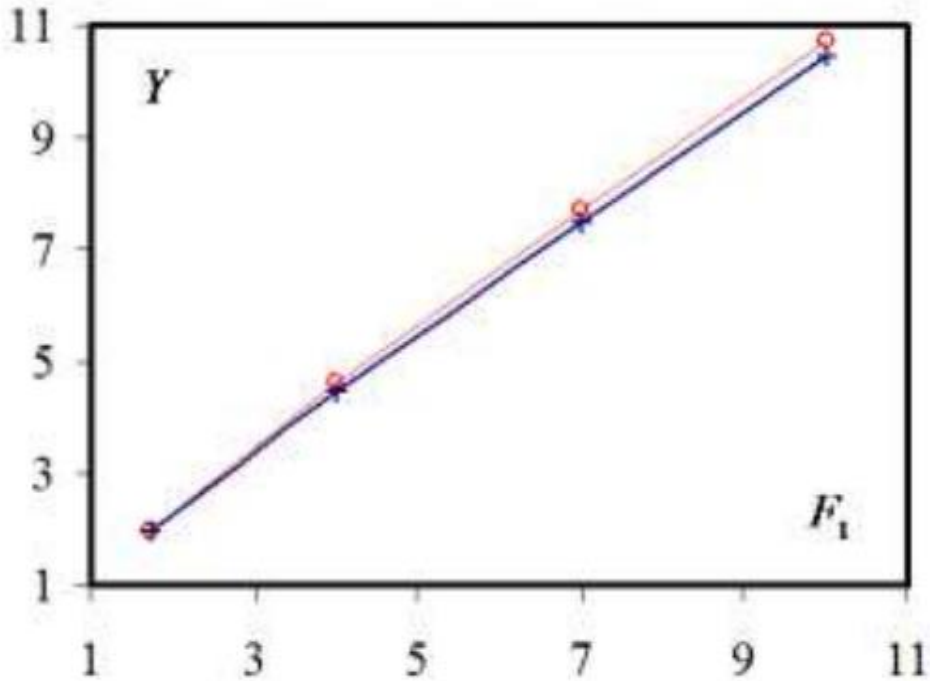


Figure I.3 : La variation Y par rapport de nombre de F_1 , (o) : 0 (I.9), (+) : équation (I.7). (Achour, 2000)

I.1.2 RENDEMENT DU RESSAUT HYDRAULIQUE

En prenant en considération les mêmes suppositions précédentes, on peut exprimer le rendement, $\eta = \Delta H/H_1$, de la manière suivante :

$$\eta = 1 - \frac{Y + \frac{F_1^2}{2} \left[\frac{Y}{\beta - \frac{1}{\tau}} \right]^2}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \quad (I.11)$$

En utilisant l'équation (I.9) il est possible de calculer l'efficacité (η) du ressaut hydraulique se produisant dans un canal rectangulaire de forme composée, à condition que F_1 et Y et β et τ soient connus et que les valeurs de Y puissent être calculées en tenant compte de la relation (I.8).

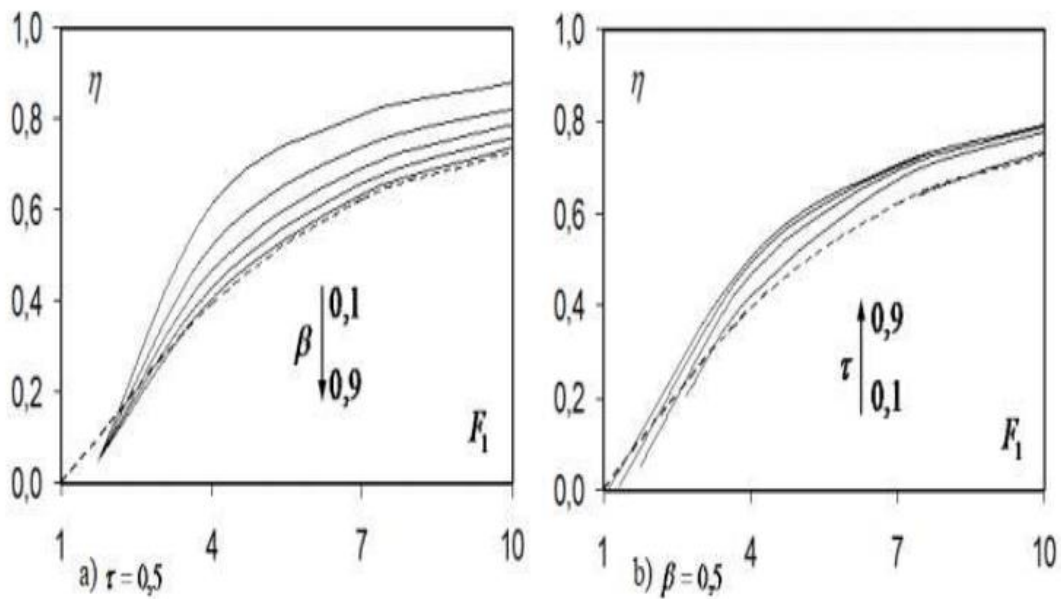


Figure I.4 : La variation η , calculée en utilisant l'équation (I.9) par rapport au nombre de Froude F_1 ,
 Où la ligne (- -) correspond à $\beta = 1$. (Achour, 2000)

La figure (I.4) illustre comment l'efficacité varie par rapport au nombre de Froude F_1 pour des valeurs données de τ et β . Il ressort de cette figure que lorsqu'un ressaut hydraulique se produit dans un canal composé, son efficacité augmente proportionnellement à l'augmentation de F_1 pour des valeurs fixes de τ et β . De plus, maintenir F_1 constant tout en faisant varier τ montre une augmentation de l'efficacité η .

Le graphique (I.5) montre l'augmentation de η par rapport au nombre de Froude F_1 pour $\beta = \tau = 0,5$, ce qui indique que la prise en compte d'une résistance rajoutée entraîne des valeurs calculées plus élevées de η par rapport à sa négligence.

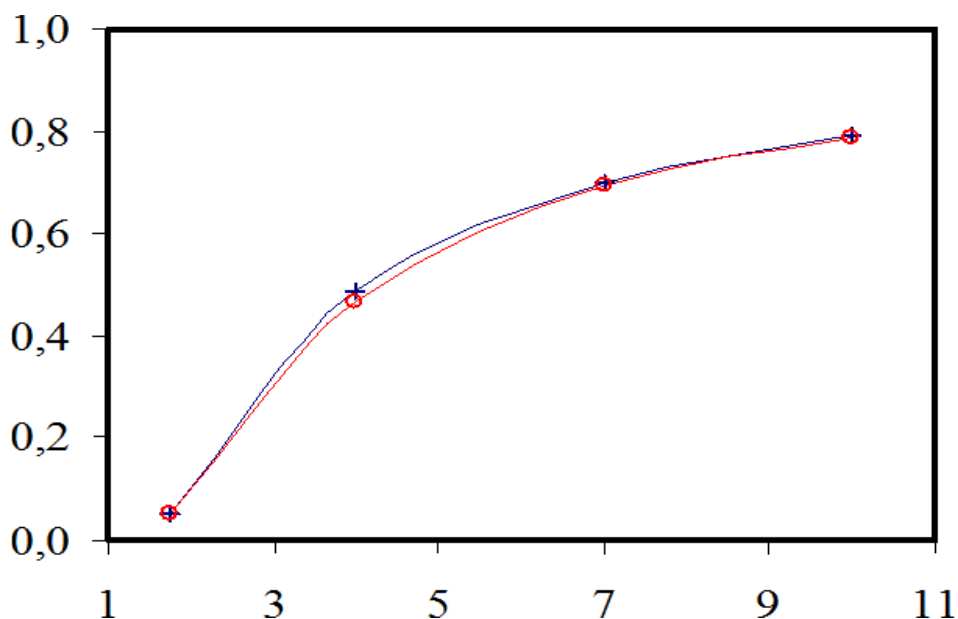


Figure I.5 : Représentation du l'efficacité (η) en fonction $F1$.
(o) : équation (I.10), (+) avec frottement. (Achour, 2000)

Conclusion :

L'application de l'équation de la quantité de mouvement au ressaut hydraulique dans un canal droit de section composée a conduit à une équation fonctionnelle de forme $\varphi(F_1, Y, \beta, \tau) = 0$. Une approche nouvelle est basée sur l'ajout d'une force de résistance associée à la forme composée du canal. L'expression générale de cette force est inspirée du travail théorique réalisé par Achour (2000) concernant le ressaut hydraulique dans une galerie circulaire s'élargissant brusquement. En intégrant cette force dans nos calculs, les valeurs du rapport des hauteurs conjuguées Y , en diminution, et celles du rendement η , en augmentation, se rapprochent très probablement de la réalité.

Chapitre II : Étude antérieure du l'effet de la section composée sur le ressaut hydraulique

Introduction

Ce chapitre est consacré à la présentation de l'étude expérimentale antérieure menée par Riguet (2021) sur le ressaut hydraulique contrôlé dans un canal rectangulaire de section composée. Il présente la problématique de la formation du ressaut sous différentes conditions, décrit la méthodologie expérimentale adoptée et expose les principaux résultats relatifs aux hauteurs conjuguées, aux longueurs caractéristiques et au rendement énergétique.

II.1 APPROCHE Riguet et Debabeche et Ghomri 2021

II.1.1 La problématique

La modification des conditions amont et celles en aval conduit à aboutir à diverses configurations de ressaut hydraulique. Le ressaut hydraulique classique se produit sur un canal rectangulaire sans pente, et il est considéré comme contrôlé lorsque sa formation dépend de la présence d'un obstacle en aval du flux. Il est appelé forcé lorsqu'il est généré de part et d'autre de l'obstacle. Le ressaut hydraulique peut se développer dans des canaux prismatiques ou non prismatiques à fonds lisses ou rugueux.

En effet, la hauteur h_1 restant fixe, une augmentation du débit se traduit à la fois par un déplacement vers l'aval du ressaut et par une augmentation de sa longueur de rouleau de surface L_r . Pour cela s'ajoute une augmentation de la distance Δx sur laquelle s'étend le ressaut. Pour le ramener à sa position initiale à environ 5 cm de la sortie du convergent, il faut augmenter la hauteur de seuil s . Pour chaque valeur du nombre de Froude F_1 correspondent les longueurs L_j et L_r ainsi que les hauteurs h_2 et s (voir l'illustré dans la figure (II.1)).

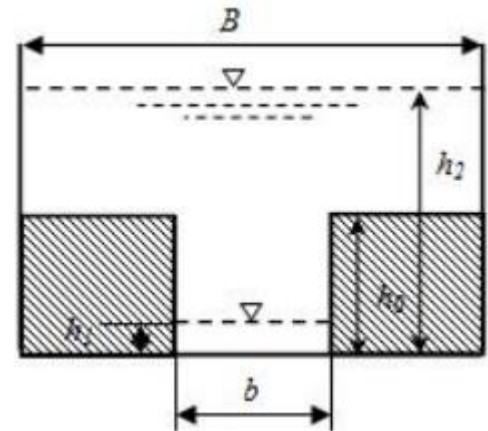
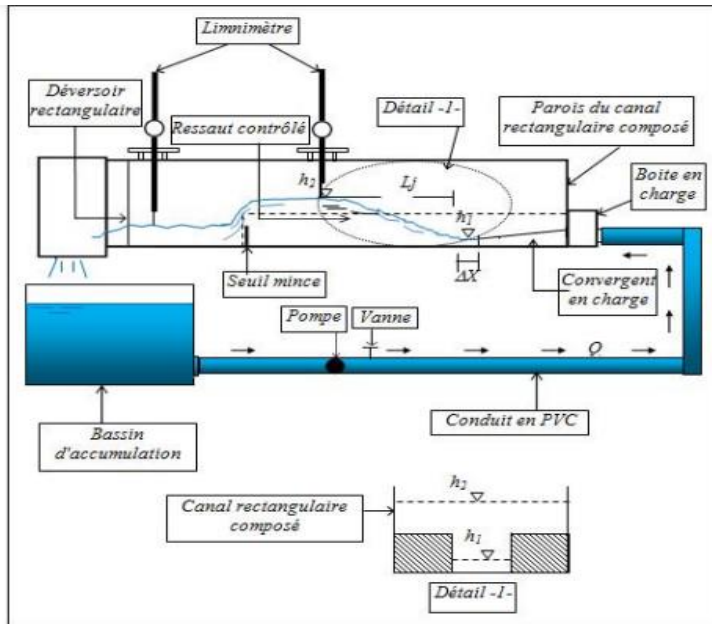


Figure II.1 : Schéma de définition du ressaut contrôlé par seuil continu à paroi mince en canal rectangulaire de section composée. (Riguet, 2021)

II.1.2 Évaluation des essais expérimentaux

Des mesures expérimentales de plusieurs paramètres ont conduit à des résultats. Ces paramètres sont : le débit volumique Q ; h_1 (hauteur initiale) ; h_2 (la hauteur finale) et s (hauteur du seuil). À partir de ces paramètres, plusieurs produits adimensionnels ont été créés, y compris le nombre de Froude F_1 et le rapport $Y = h_2/h_1$. Défini le nombre de Froude F_1 est comme suit :

$$F_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 \cdot h_1^3 g}} \quad (\text{II.1})$$

Pour obtenir une configuration du ressaut contrôlé, pour une hauteur initiale h_1 et une position x de seuil fixes :

- Nous mesurons la hauteur déversant H_d .
- Calculons le débit volume correspondant en utilisant la relation du débitmètre rectangulaire (Hachemi 2006) :

$$Q = 0,3794 \cdot B \sqrt{2g} \beta (1 + 0,16496 \beta^{2,0716})^{3/2} h_d^{3/2} \quad (\text{II.2})$$

- Q : le débit.

- $\beta = b/B$: le rapport de l'élargissement.
- $\tau = h1/h$: Rapport des hauteurs.
- B = Largeur du lit majeur.
- b = Largeur du lit mineur.
- Le calcul du nombre de Froude $F1$ et la mesure de la hauteur finale ($h2$) du ressaut



Figure II.2 : Le canal ayant servi à l'expérimentation. (Riguet, 2021)

II.1.3 Résultats obtenus par l'expérimentation

II.1.3.1 Le rapport (Y) des hauteurs conjuguées

Déterminé le rapport des hauteurs conjuguées ($Y = h2 / h1$) qui est le rapport de la hauteur final $h2$ par la hauteur initiale $h1$. Le graphique suivant illustre des données expérimentales montrant clairement le rapport (Y) variant en fonction du $F1$, en considérant cinq tailles d'ouverture différentes ($h1(\text{cm}) = 2 ; 2.5 ; 3 ; 3.5 ; 4$) pour les deux lits dans le canal composé.

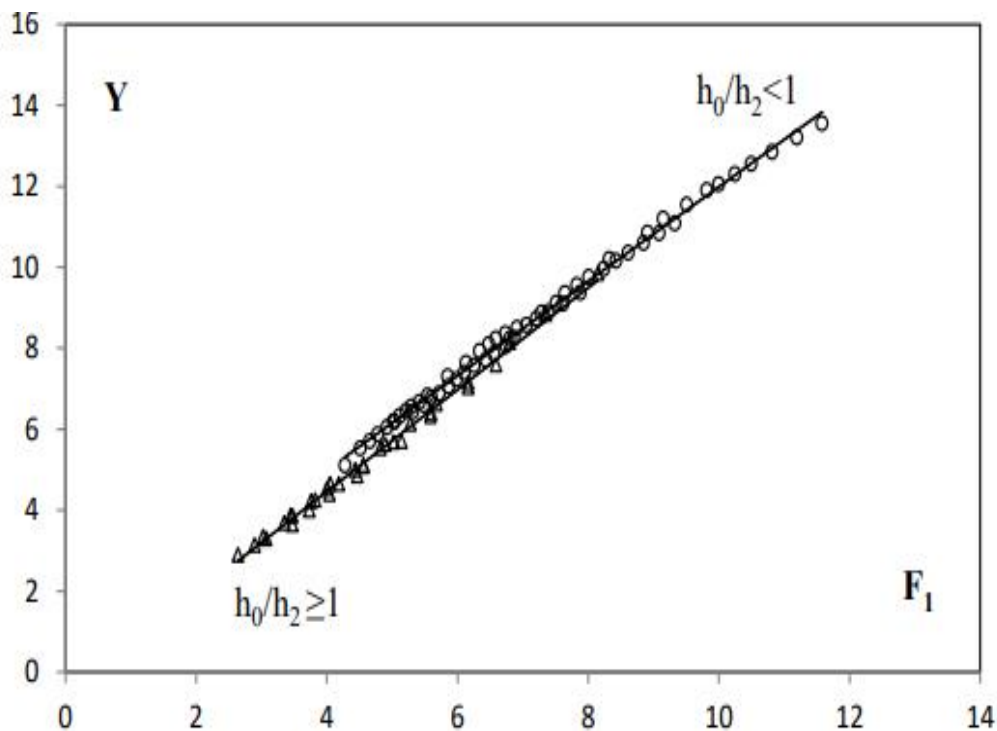


Figure II.3 : Rapport des hauteurs conjuguées Y par rapport au nombre de Froude F_1 .

(o) Les données expérimentales pour le lit majeur.

(Δ) Les données expérimentales pour le lit mineur.

(-) Courbes d'ajustement. (Riguet, 2021)

La courbe représente les changements du rapport Y par rapport du nombre de Froude. En examinant attentivement les résultats qu'il est possible de réaliser un ajustement linéaire pour chaque valeur de h_0/h_2 en utilisant l'équation $Y = a F_1 + b$. Ainsi, la relation entre le nombre de Froude F_1 et le rapport Y des hauteurs conjuguées peut être exprimée sous cette forme :

$$\text{Pour } h_0/h_2 \geq 1 : 2.64 < F_1 < 8.14 ; Y = 1.258 F_1 - 0.573$$

$$\text{Pour } h_0/h_2 < 1 : 4.27 < F_1 < 11.58 ; Y = 1.165 F_1 + 0.328$$

II.1.3.2 Variation de la longueur relative L_j/h_1 du ressaut en fonction du nombre de Froude F_1

L_j est la distance entre l'amont et l'aval du ressaut hydraulique. L'objectif principal de cette étude était de mesurer précisément L_j/h_1 pour une gamme testée, celle-ci est présenté dans la Figure (II.4).

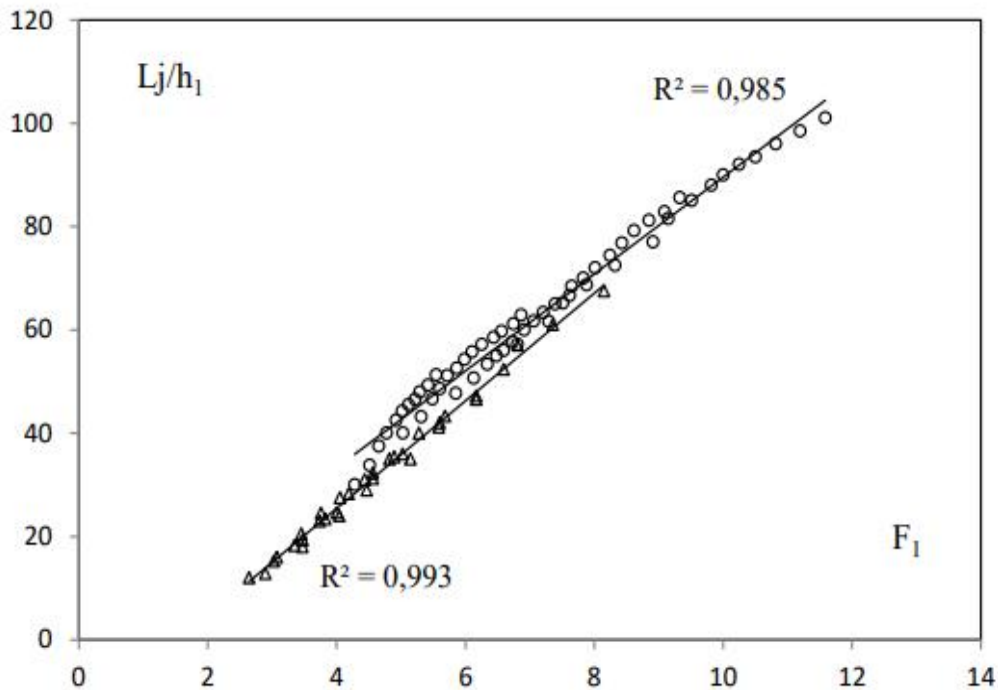


Figure II.4 : Rapport des hauteurs conjuguées Y par rapport au nombre de Froude F_1 .

(o) Les données expérimentales pour le lit majeur.

(Δ) Les données expérimentales pour le lit mineur.

(-) Courbes d'ajustement. (Riguet, 2021)

Pour un nombre de Froude fixe, la longueur relative L_j/h_1 d'un ressaut hydraulique dans le lit majeur est plus grande que son homologue dans le lit mineur, ceci est montré dans la figure (II.4).

II.1.3.3 Variation de la longueur relative L_r/h_1 du rouleau de surface par rapport au nombre de Froude F_1

L_r est défini comme la distance entre la section amont du ressaut hydraulique et la section aval de son rouleau de surface. Dans la figure (II.5), on peut voir comment cette longueur relative varie avec le nombre de Froude (F_1).

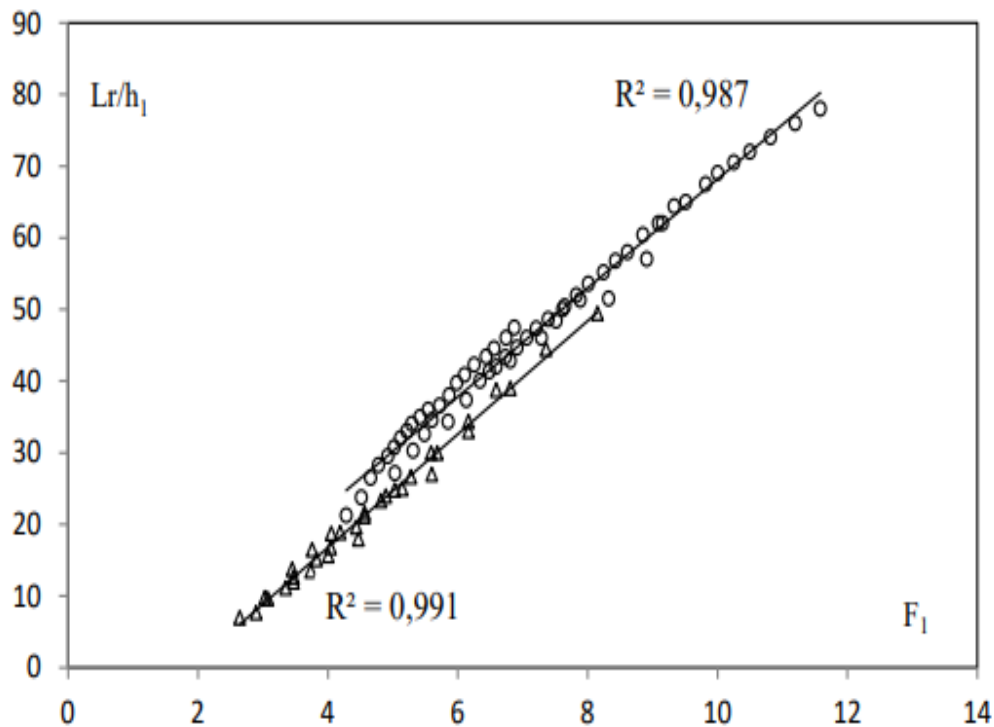


Figure II.5 : graphique de la variation de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 du ressaut hydraulique par rapport au nombre de Froude F_1 .

- (o) Les points de mesure expérimentaux pour le lit majeur.
- (Δ) Les points de mesure expérimentaux pour le lit mineur.
- (—) Courbes d'ajustement. (Riguet, 2021)

La corrélation entre la longueur L_r/h_1 et le nombre de Froude F_1 peut être exprimée sous cette forme :

$$\text{Pour } h_0/h_2 \geq 1 : L_r/h_1 = 7,907 F_1 - 14,85 \text{ avec } R^2 = 0,991$$

$$\text{Pour } h_0/h_2 < 1 : L_r/h_1 = 7,599 F_1 - 7,788 \text{ avec } R^2 = 0,987$$

La figure (II.5) montre que le lit mineur a un rouleau de surface compact inférieur à celui au lit majeur développé dans la section composée.

II.1.3.4 L'efficacité du rendement (η) du ressaut hydraulique

Compte tenu de la relation (I.10), il est possible de calculer le rendement (η). Les résultats obtenus sont affichés sur la figure (II.6).

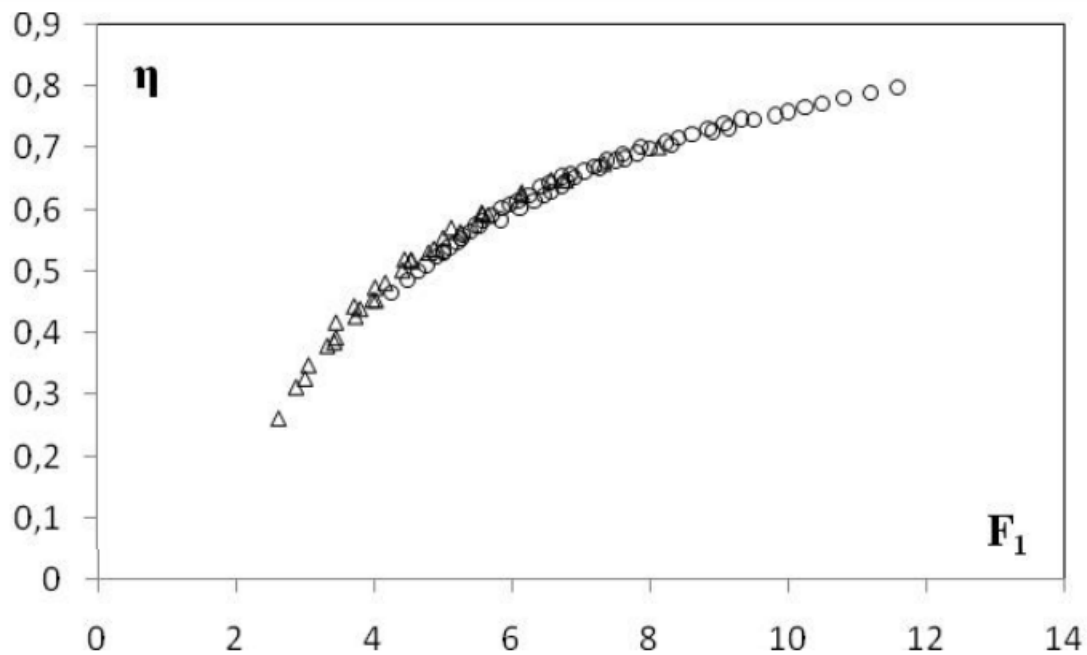


Figure II.6 : Représentation du l'efficacité (η) par rapport au nombre de Froude F_1 .

($\circ$) indique les mesures expérimentales dans le lit majeur.

(Δ) indique les mesures expérimentales dans le lit mineur. (Riguet, 2021)

Le graphique (II.6) représente la relation entre l'efficacité (η) et (F_1) pour les deux lits d'un canal composé. Il montre que l'efficacité s'appuie avec une augmentation du (F_1), comme on témoigne les mesures dans le lit majeur qui sont légèrement inférieures à celles du lit mineur pour des valeurs de F_1 comprises entre 4 et 6. De plus, tous les points de mesure convergent au-delà d'une valeur de F_1 égale à 6 pour produire un nuage unique des points donnés.

Conclusion

Dans une étude antérieure, Riguet (2021) a présenté les résultats d'une étude expérimentale menée au laboratoire « LARHYSS » sur un ressaut hydraulique qui se produit dans un canal rectangulaire de section composée, où il a été noté que le rapport Y augmente avec l'augmentation du nombre de Froude F_1 et que, pour un nombre de Froude fixé F_1 , le rapport Y est plus important en lit majeur que celui en lit mineur. Deux relations expérimentales adimensionnelles ont été développées pour dimensionner les ouvrages hydrauliques notamment les bassins d'amortissement. L'étude a également permis d'estimer les longueurs caractéristiques du ressaut hydraulique pour chaque lit du canal composé. Enfin, les résultats montrent que le ressaut hydraulique réduit ses caractéristiques quand celui-ci est développé en canal rectangulaire composé au lit mineur par rapport à celui au lit majeur.

Chapitre III : Étude antérieure de la caractérisation expérimentale du ressaut hydraulique sur fond rugueux dans un canal rectangulaire à section composée

Introduction

Dans ce chapitre, une analyse expérimentale antérieure détaillée, menée par Walid (2022), est présentée afin de mettre en évidence l'effet de la rugosité relative (ε/b) et du nombre de Froude incident ($F1$) sur les principales caractéristiques du ressaut hydraulique. Les paramètres étudiés incluent la longueur relative du ressaut ($Lj/h1$), la longueur relative du rouleau de surface ($Lr/h1$), le rapport des hauteurs conjuguées ($Y = h2/h1$) ainsi que la hauteur relative du seuil ($S/h1$).

III.1 Analyse des propriétés de l'écoulement hydraulique

III.1.1 Analyse de la variation du rapport $Lj/h1$ selon le nombre de Froude $F1$

III.1.1.1 Analyse de la longueur adimensionnelle du ressaut ($Lj/h1$) en relation avec le nombre de Froude ($F1$) en lit mineur (pour $0 < h2 < 20$ cm)

Les figures 1 et 2 mettent en évidence une corrélation linéaire significative entre le rapport $Lj/h1$ et le nombre de Froude $F1$. Il ressort de ces analyses que la longueur du ressaut hydraulique ($Lj/h1$) croît de manière proportionnelle à l'augmentation du nombre de Froude, tandis qu'une élévation de la rugosité des lits induit une diminution notable de cette longueur. Ce constat souligne l'influence déterminante de la rugosité sur l'accélération du processus de dissipation énergétique et, par conséquent, sur la réduction de la longueur du ressaut.

La longueur relative du ressaut hydraulique correspond à la distance mesurée entre le point d'initiation du phénomène (hauteur $h1$) et son point de terminaison (hauteur $h2$). La Figure III.1 met en évidence la variation du rapport $Lj/h1$ en fonction du nombre de Froude ($F1$), pour cinq valeurs de rugosités équivalentes ($\varepsilon = 0$ mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm et 12 mm) dans le lit mineur ($0 < h1 < 20$ cm).

Les données présentées dans cette figure révèlent l'existence de cinq groupes de points distincts, chacun étant directement corrélé à une rugosité spécifique du lit. L'analyse expérimentale des résultats obtenus sur un lit mineur rugueux démontre que chaque valeur de

rugosité (ε) est corrélée à une relation linéaire de type $L_j/h_1 = a(F_1)$.

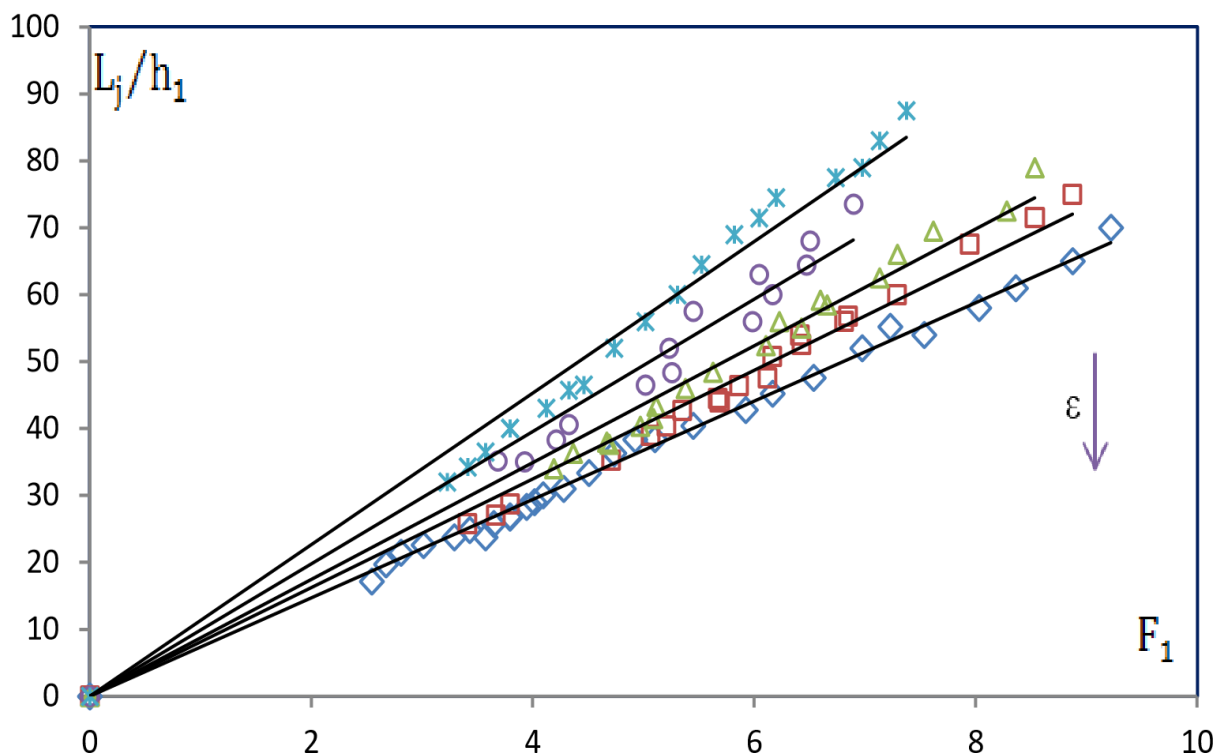


Figure III.1 : Illustre la variation de la longueur adimensionnelle L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude pour un écoulement en lit mineur ($0 < h_2 < 20$ cm), en considérant cinq valeurs distinctes de rugosité (ε), à savoir 12 mm (◇), 10 mm (□), 8 mm (Δ), 6 mm (o) et 0 mm (*). (—) Courbes d'ajustements. (Walid, 2022)

L'analyse des mesures expérimentales et des courbes associées met en évidence que la longueur relative du ressaut (L_j/h_1) croît proportionnellement à l'augmentation du nombre de Froude (F_1), et ce, pour l'ensemble des cinq rugosités étudiées. En revanche, une relation inversement proportionnelle est observée entre le rapport de longueur relative (L_j/h_1) et la rugosité (ε), confirmant ainsi l'impact de cette dernière sur la dissipation de l'énergie hydraulique.

Le Tableau III.1 récapitulation des valeurs du coefficient a_1 . La Figure III.2. Représente la relation entre le coefficient a_1 et la rugosité relative (ε/b).

Tableau III.1 : présente une synthèse des valeurs obtenues pour le coefficient α_1 .

ε/b	Coefficient a_1	R^2
-----------------	-------------------	-------

0,08	7,349	0,995
0,0667	8,117	0,986
0,053	8,727	0,988
0,04	9,887	0,971
0	11,32	0,979

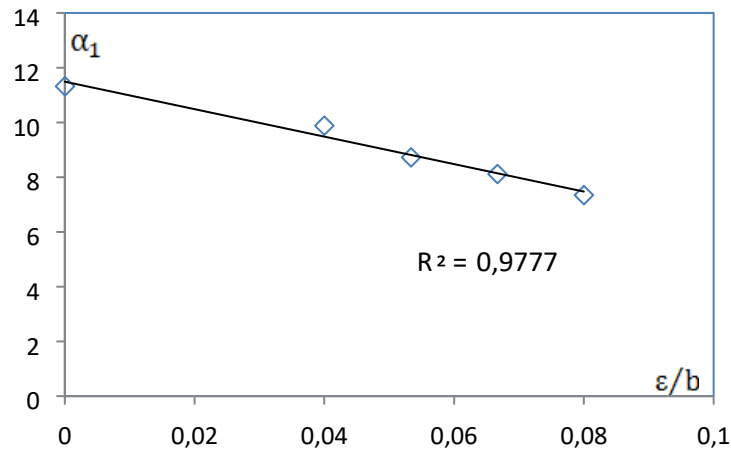


Figure III.2 : Représentation du coefficient « α_1 » avec rugosité (ϵ/b). (Walid, 2022)

L'ajustement linéaire des données appariées (α_1 , ϵ/b) du Tableau III.1 a permis de dériver une corrélation robuste, formulée par l'équation suivante : $\alpha_1 = -50.208 (\epsilon/b) + 11.49$.

Cette relation est graphiquement illustrée par la Figure III.2. Il en découle que la dépendance entre la longueur relative amont (L_j/h_1), le nombre de Froude (F_1) et la rugosité relative (ϵ/b) peut être modélisée par l'expression suivante :

$$L_j/h_1 = (-50.208 (\epsilon/b) + 11.49) F_1 \quad (\text{III.1})$$

Cette équation est applicable pour $0 \leq \epsilon/b \leq 0.08$.

La Figure III.3 met en évidence une corrélation proportionnelle significative pour la fonction $L_j/h_1 = f(\epsilon/b, F_1)$ en canal principal ($0 < h_2 < 20$ cm), les données expérimentales s'alignant avec précision sur la première bissectrice.

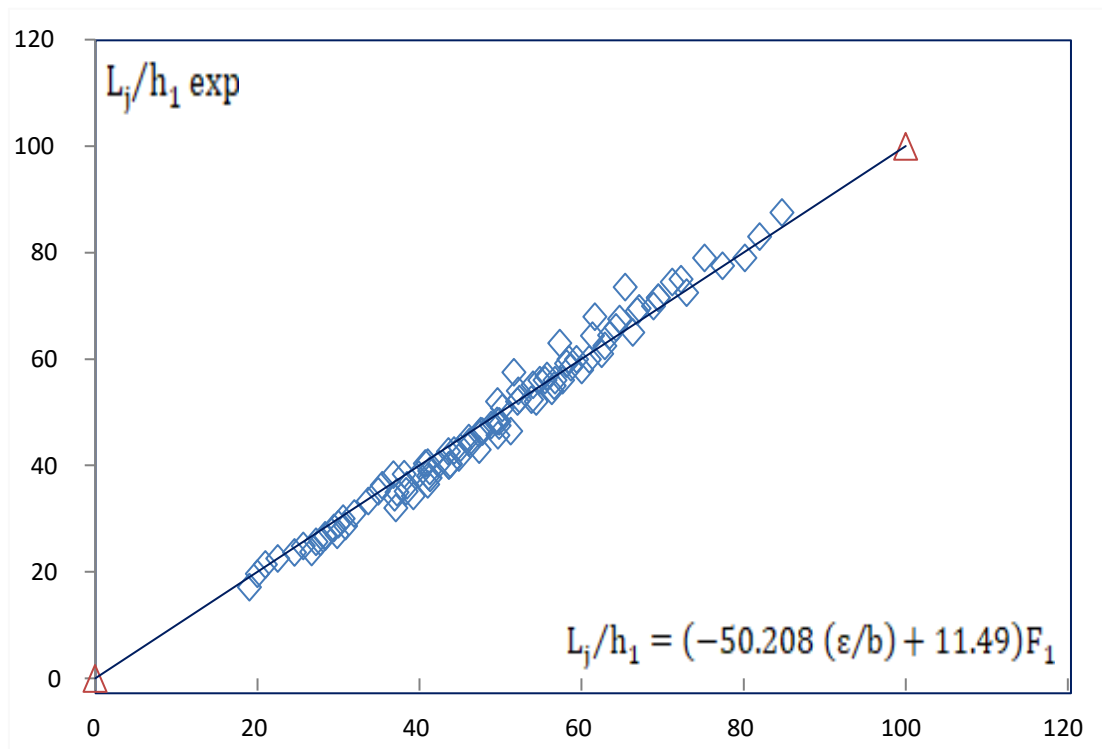


Figure III.3 : Représentation de l'approche globale expérimentale $L_j / h_1 = f(\epsilon/b, F_1)$ avec les points expérimentaux L_j/h_1 . (—) Première bissectrice. (Walid, 2022)

III.1.1.2 Analyse de l'évolution de la longueur relative du ressaut (L_j/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1) dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$ cm).

Dans le prolongement de l'analyse réalisée pour le lit mineur, l'examen de la variation de L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude (F_1) a été appliqué au lit majeur, en considérant les mêmes cinq rugosités équivalentes ($\epsilon = 0, 6, 8, 10$ et 12 mm), pour une plage de hauteurs h_2 comprise entre 20 et 50 cm.

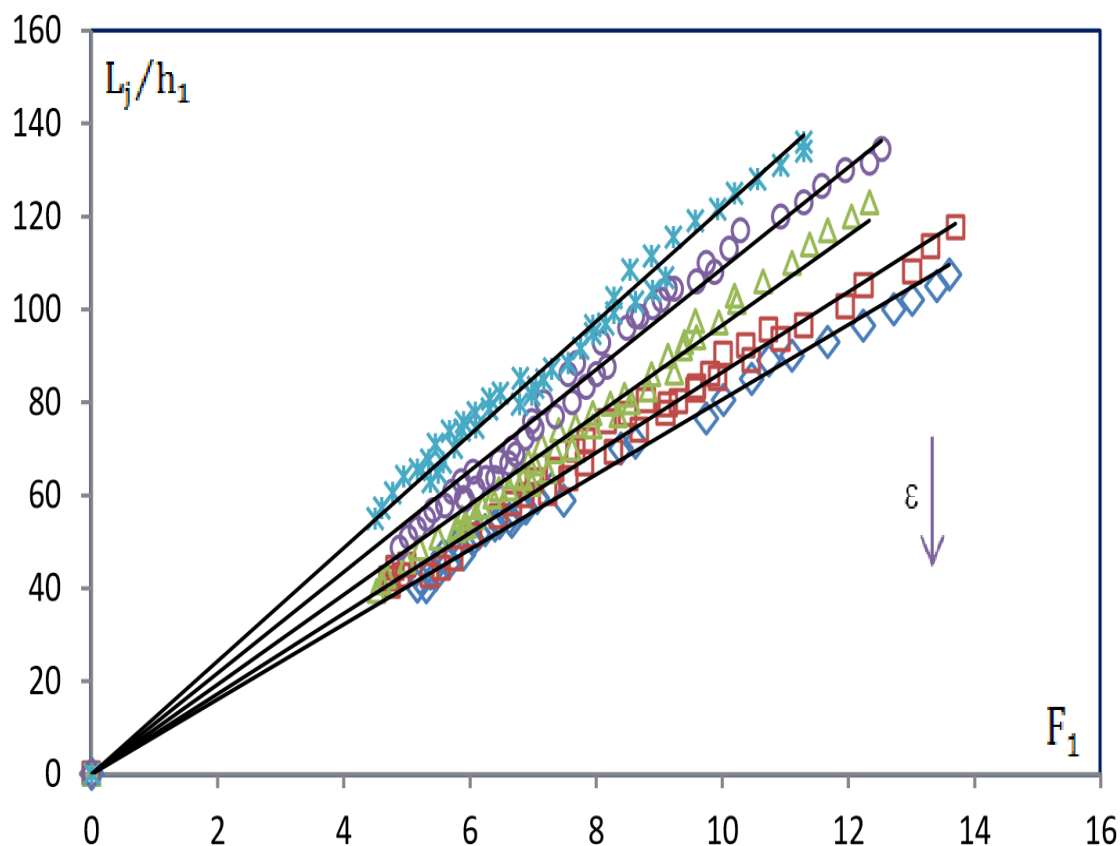


Figure III.4 : Illustration de la variation de la longueur relative L_j/h_1 en fonction du nombre de Froude, pour cinq valeurs distinctes de rugosité « ε » : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; ($\triangle$) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et ($*$) 0 mm. (Walid, 2022)

(—) Courbes d'ajustements.

La Figure III.4 illustre cette variation, révélant cinq groupes de points distincts, chacun associé à une rugosité particulière. L'analyse des données expérimentales relatives au ressaut hydraulique sur fond rugueux dans le lit majeur ($20 < h_2 \leq 50$ cm) met en évidence que chaque valeur de rugosité (ε) est reliée à une relation linéaire, formulée sous la forme $L_j/h_1 = b(F_1)$. L'observation de ces courbes indique que la longueur relative du ressaut augmente avec l'accroissement du nombre de Froude (F_1), et ce pour l'ensemble des rugosités examinées. En outre, il apparaît que le rapport de la longueur relative (L_j/h_1) diminue progressivement lorsque la rugosité (ε) s'accroît. Le Tableau III.2 présente les valeurs du coefficient b_1 .

Tableau III.2 : récapitulation des valeurs obtenues du coefficient b_1 .

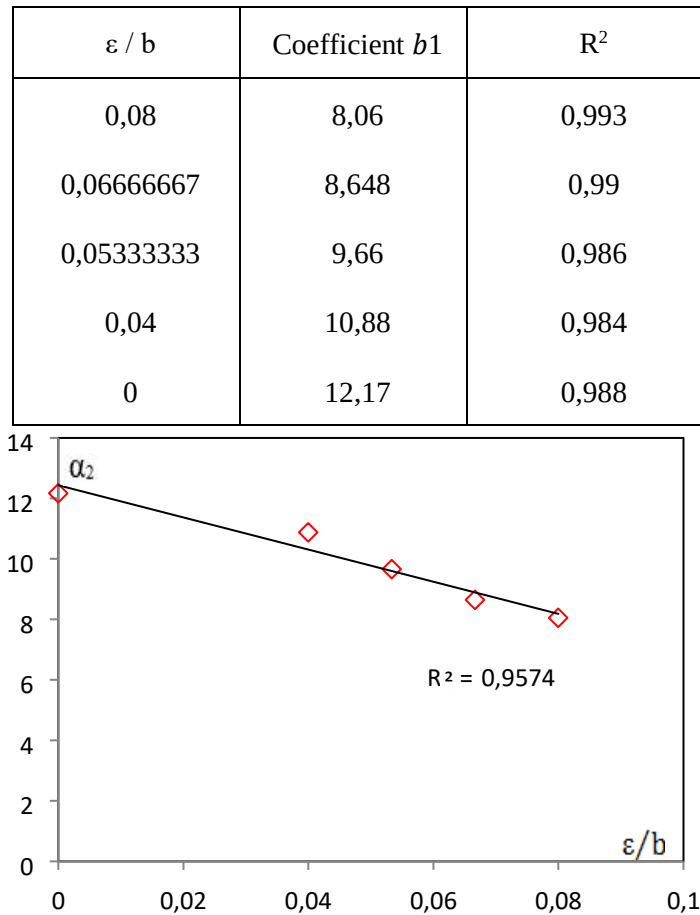


Figure III.5 : Représentation du coefficient " b_1 " et de rugosité relative ε/b dans le lit majeur.
(Walid, 2022)

L'analyse des valeurs de $(b_1, \varepsilon/b)$ issues du Tableau III.3 a conduit à l'établissement d'une relation adimensionnelle, exprimée par l'équation linéaire suivante : $b_1 = -53.154 (\varepsilon/b) + 12.435$. Cette relation est illustrée graphiquement dans la Figure III.5. Par conséquent, l'approche proposée pour L_j/h_1 , établissant le lien entre le nombre de Froude (F_1) et la rugosité relative (ε/b) dans le lit majeur, peut être formulée de la manière suivante :

$$L_j/h_1 = (-53.154 (\varepsilon/b) + 12.435) F_1 \quad (\text{III.2})$$

Cette équation est valide pour $0 \leq \varepsilon/b \leq 0.08$.

La Figure III.6 met clairement en évidence que la relation $f(\varepsilon/b, F_1)$ présente une corrélation satisfaisante dans le cas du lit majeur ($20 < h_2 \leq 50$ cm), les points expérimentaux s'alignant rigoureusement sur la première bissectrice.

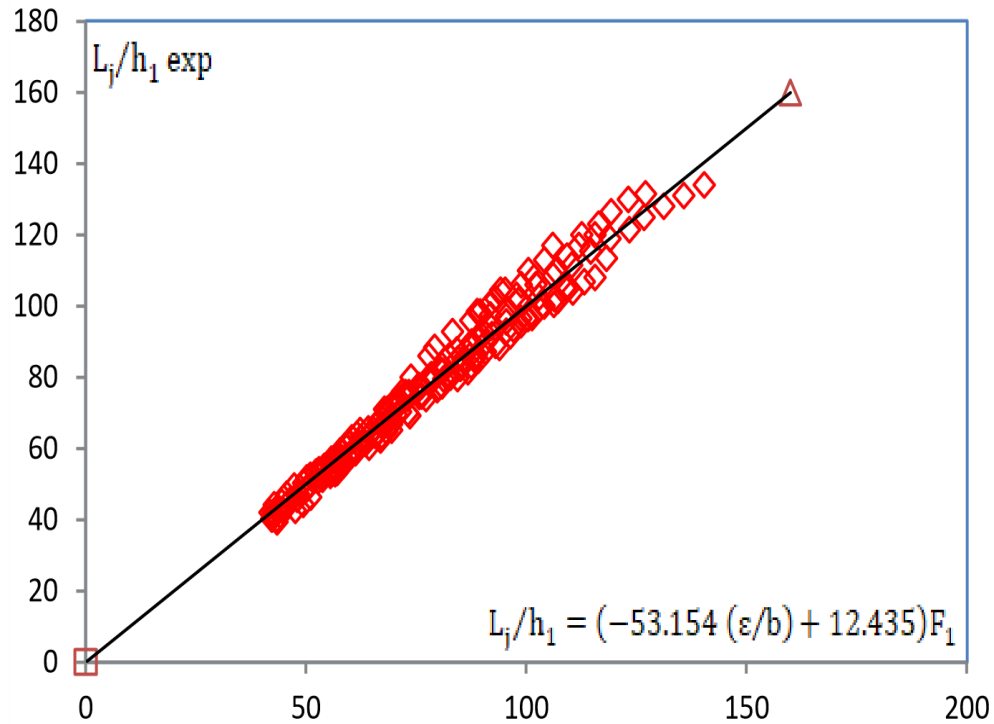


Figure III.6 : illustration des mesures expérimentales de la longueur relative L_j/h_1 ainsi que la relation fonctionnelle $f(\varepsilon/b, F_1)$. ($\square$) Les points correspondent aux données expérimentales du ressaut contrôlé sur fond rugueux dans le lit majeur. (Walid, 2022)

L'analyse de la Figure III.7 permet de conclure que la section composée à fond rugueux induit une diminution de la longueur du ressaut, cet effet se manifestant de manière plus marquée dans le lit mineur que dans le lit majeur.

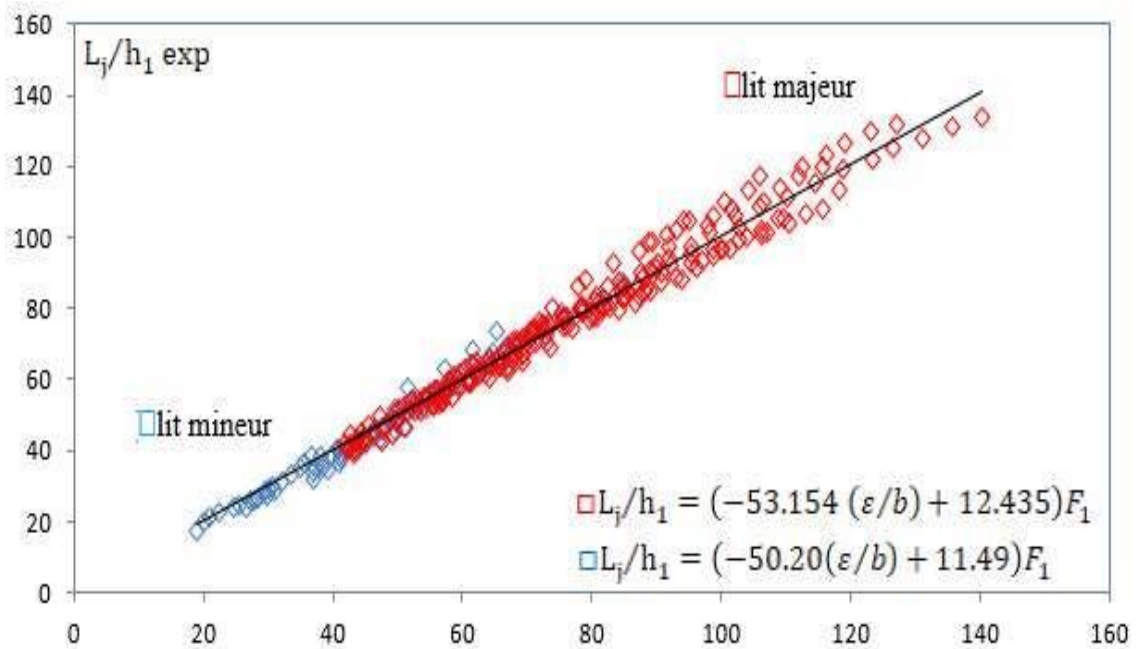


Figure III.7 : Illustration expérimentale de l'évolution de la longueur relative du rouleau de surface L_r/h_1 en fonction de $f(\epsilon/b, F_1)$ pour les deux configurations (lit mineur et lit majeur).
(Walid, 2022)

III.1.2 Étude de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude incident (F_1)

III.1.2.1 Étude de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude incident (F_1) pour le lit mineur ($0 < h_2 < 20$ cm)

La longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) est définie comme la distance entre le point initial de sa formation et la limite aval caractérisée par une forte turbulence. L'analyse a été conduite en fonction du nombre de Froude incident (F_1). La Figure III.8 présente cette évolution pour cinq rugosités équivalentes (ϵ) : 0 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm et 12 mm, dans le lit mineur ($0 < h_2 < 20$ cm). Les résultats mettent en évidence cinq comportements distincts, chacun correspondant à une valeur spécifique de rugosité. L'exploitation des données expérimentales montre que, pour chaque rugosité testée, la relation obtenue s'ajuste à une fonction linéaire de type : $L_r/h_1 = a_2(F_1)$.

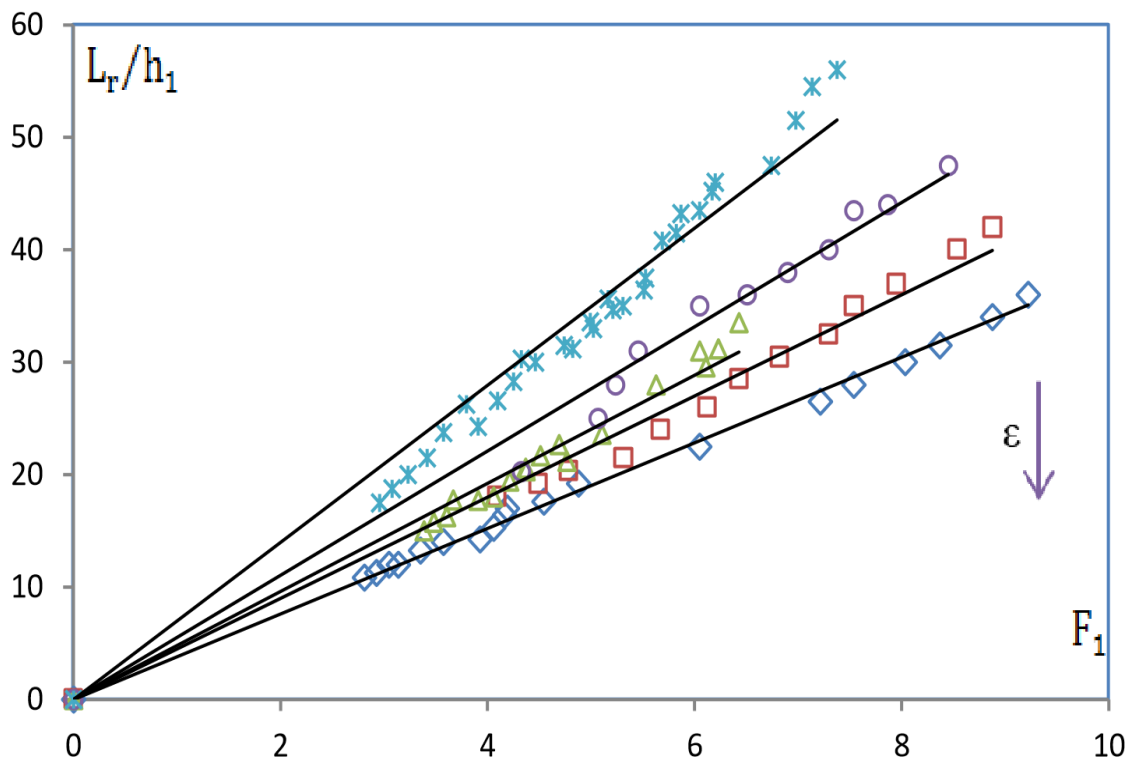


Figure III.8 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1), pour cinq rugosités différentes « ε » : (□) 08 mm ; (○) 06 mm ; (*) 0 mm ; (Δ) 12 mm et (◊) 10 mm. (—) Courbes de corrélation. (Walid, 2022)

L'analyse des résultats expérimentaux montre que l'augmentation du nombre de Froude (F_1) entraîne une croissance de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) pour l'ensemble des rugosités considérées. En revanche, l'accroissement de la rugosité relative (ε/b) conduit systématiquement à une diminution de la valeur de ce rapport (L_r/h_1).

Le Tableau III.3 présente les valeurs du coefficient a_2 , tandis que la Figure III.9 illustre la relation entre ce coefficient et la rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur.

Tableau III.3 : Coefficient a_2 des courbes d'ajustements.

ε / b	Coefficient a_2	R2
0,08	3.817	0,995
0,06666667	4.501	0,985
0,05333333	4.809	0,976
0,04	5.528	0,983
0	6.986	0,966

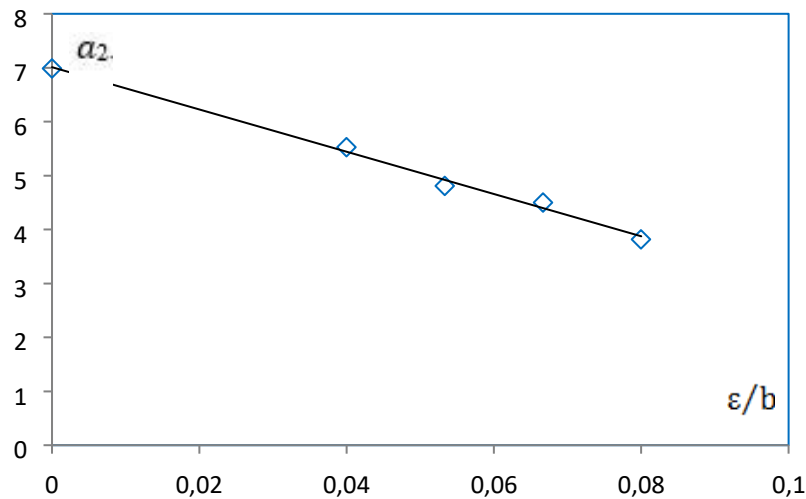


Figure III.9 : Représentation du coefficient « a_2 » en fonction de la rugosité relative (ϵ/b) dans le lit mineur. (Walid, 2022)

L'analyse de la corrélation entre les mesures expérimentales (a_2 , ϵ/b) issues du tableau III.7, réalisée par la méthode des moindres carrés, a permis d'établir une relation linéaire robuste : $a_2 = -39.2 * (\epsilon/b) + 7.0098$, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9941$, illustrant la qualité de l'ajustement. Cette relation est représentée à la Figure III.9.

L'approche globale reliant le nombre de Froude ($F1$), la rugosité relative (ϵ/b) et la longueur relative du rouleau de surface ($L_r/h1$) est formulée comme suit :

$$L_r / h1 = (-39,2 * \epsilon / b + 7,0098) F1 \quad (III.3)$$

Cette équation est applicable pour $0 \leq \epsilon/b \leq 0.08$.

La Figure III.10 confirme que cette relation globale $L_r/h1 = f(\epsilon/b, F1)$ présente une excellente corrélation avec l'ensemble des mesures expérimentales obtenues pour le lit mineur. Les résultats s'alignent clairement sur la première bissectrice, ce qui confirme la fiabilité de l'approche proposée.

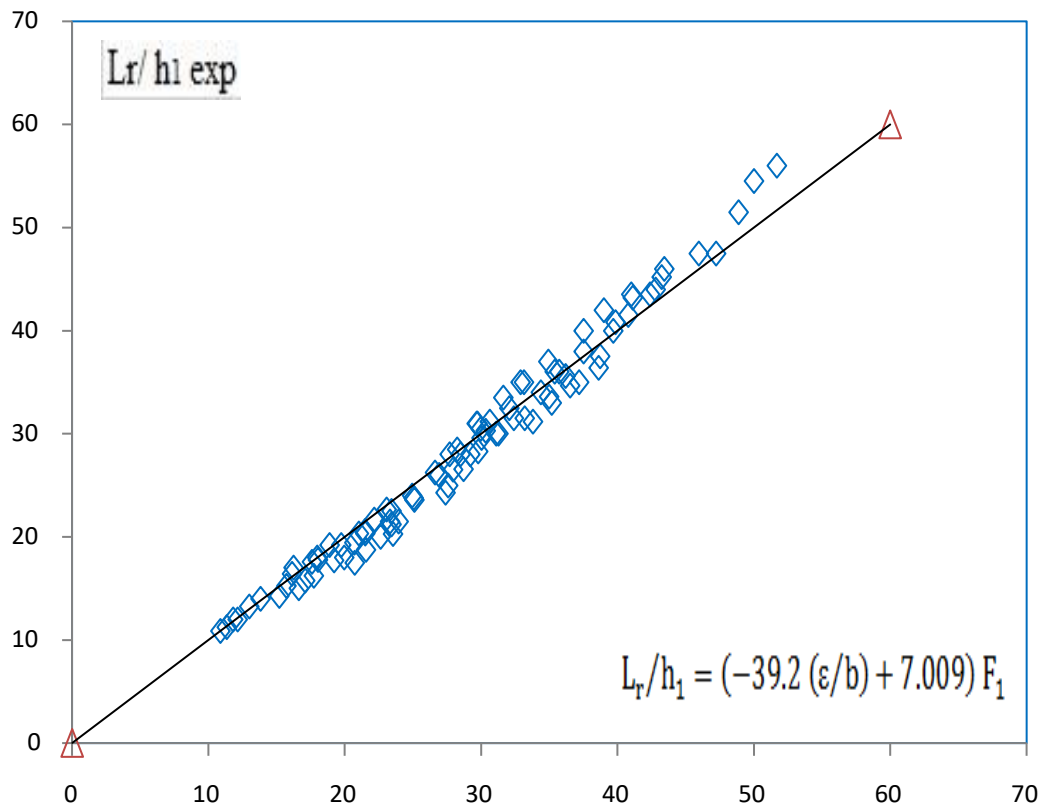


Figure III.10 : Représentation de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction de $f(\epsilon/b, F_1)$. ($\square$) Données expérimentales obtenues pour le ressaut hydraulique sur lit rugueux. (—) Première bissectrice. (Walid, 2022)

III.1.2.2 Étude de la variation de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1) dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$ cm)

En suivant la même démarche appliquée au lit mineur, l'analyse a été étendue au lit majeur en traçant l'évolution de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1). La Figure III.11 présente cette relation pour cinq valeurs de rugosité relative (ϵ/b). Les résultats montrent cinq ensembles distincts de points, chacun correspondant à une rugosité spécifique. L'examen des mesures expérimentales révèle qu'à chaque valeur de rugosité correspond une relation linéaire de type : $L_r/h_1 = b_2(F_1)$. Cette analyse met en évidence que la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) croît proportionnellement avec l'augmentation du nombre de Froude (F_1), et ce, pour l'ensemble des rugosités étudiées.

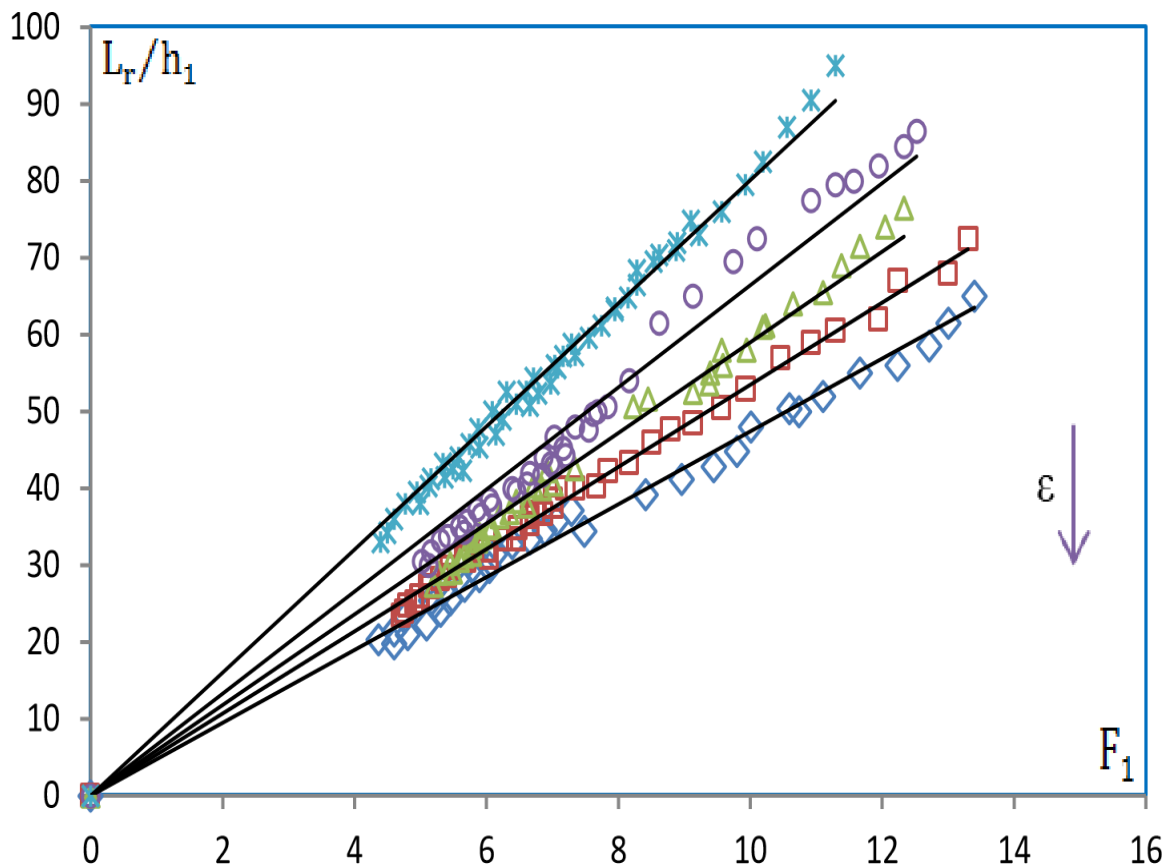


Figure III.11 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1), pour cinq rugosités testées : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et ($*$) 0 mm. (—) Courbes d'ajustement. (Walid, 2022)

L'analyse des résultats expérimentaux indique que, pour une valeur donnée du nombre de Froude (F_1), la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) tend à diminuer avec l'accroissement de la rugosité relative (ε/b). Cette observation met en évidence l'effet réducteur de la rugosité sur les caractéristiques du ressaut hydraulique.

Le Tableau III.4 regroupe les valeurs des coefficients b_2 , tandis que la Figure III.12 illustre la relation entre ce coefficient et la rugosité relative (ε/b) dans le lit majeur.

Tableau III.4 : Coefficients b_2 des Courbes d'ajustements.

ε / B	Coefficient b_2	R^2
0,08	4.744	0,989
0,067	5.346	0,996
0,053	5.899	0,987

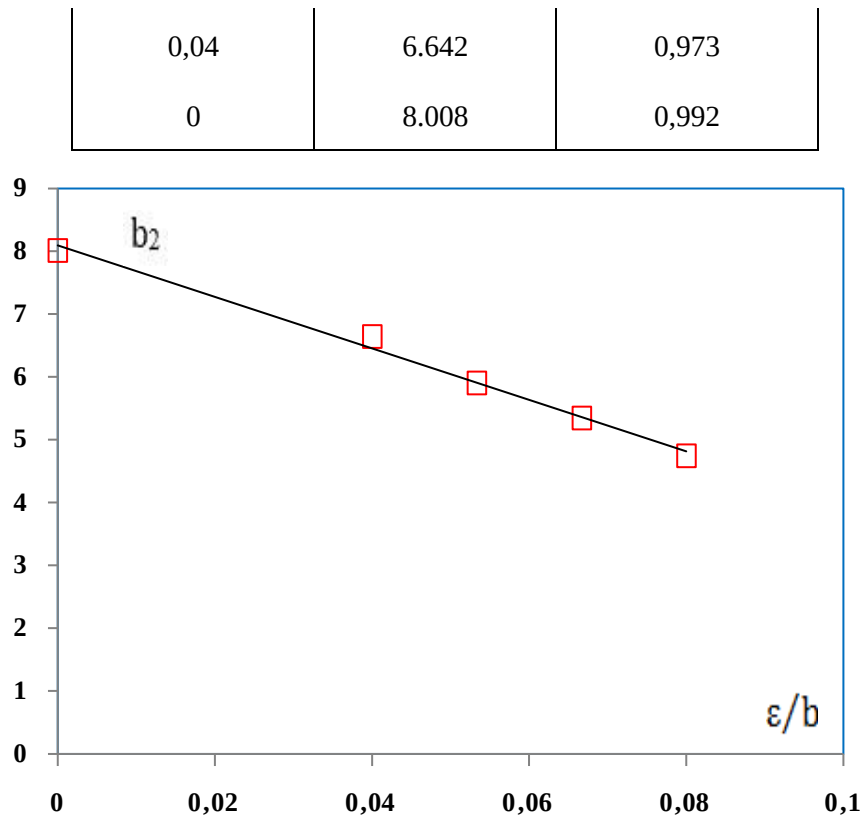


Figure III.12 : Représentation du coefficient b_2 en fonction de la rugosité relative (ϵ/b) dans le lit majeur. (Walid, 2022)

L'ajustement des couples de valeurs (b_2 , ϵ/b) issus du Tableau III.7 a permis d'obtenir une relation linéaire exprimée comme suit : $b_2 = -40.983 (\epsilon/b) + 8.095$ avec une corrélation satisfaisante. L'équation reliant le nombre de Froude (F_1), la rugosité relative (ϵ/b) et la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) dans le lit majeur est donc :

$$L_r / h_1 = (-40.983 (\epsilon / b) + 8.095) F_1 \quad (\text{III.4})$$

Cette équation est applicable pour $0 \leq \epsilon / b \leq 0.08$.

La Figure III.13 démontre clairement que la relation $L_r/h_1 = f(\epsilon/b, F_1)$ offre un excellent ajustement aux données expérimentales. La majorité des points s'alignent sur la première bissectrice, ce qui atteste de la fiabilité de la relation générale proposée.

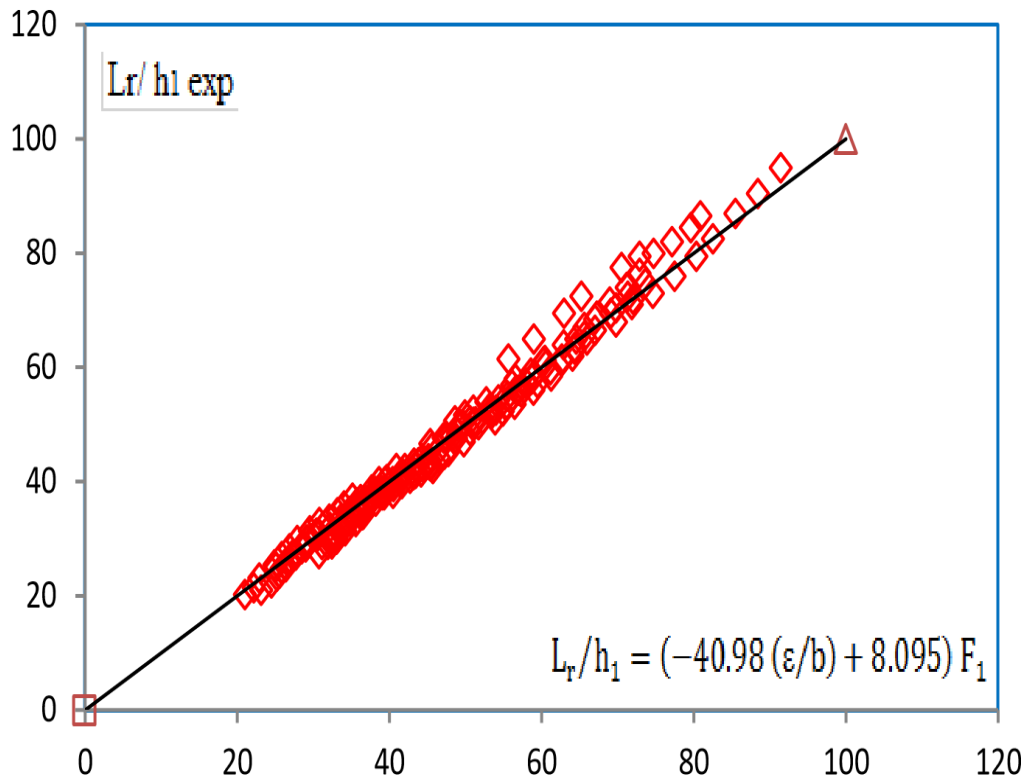


Figure III.13 : Représentation graphique de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) mesurée expérimentalement, comparée à l'équation globale $f(\epsilon/b, F_1)$. ($\square$) Points expérimentaux obtenus pour le ressaut formé dans le lit majeur et dans le lit mineur rugueux. (—) Première bissectrice. (Walid, 2022)

La Figure III.14 illustre la variation de la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1) en fonction de l'équation empirique $f(\epsilon/b, F_1)$, dans le cas d'un ressaut hydraulique se développant dans un canal rectangulaire à section composée.

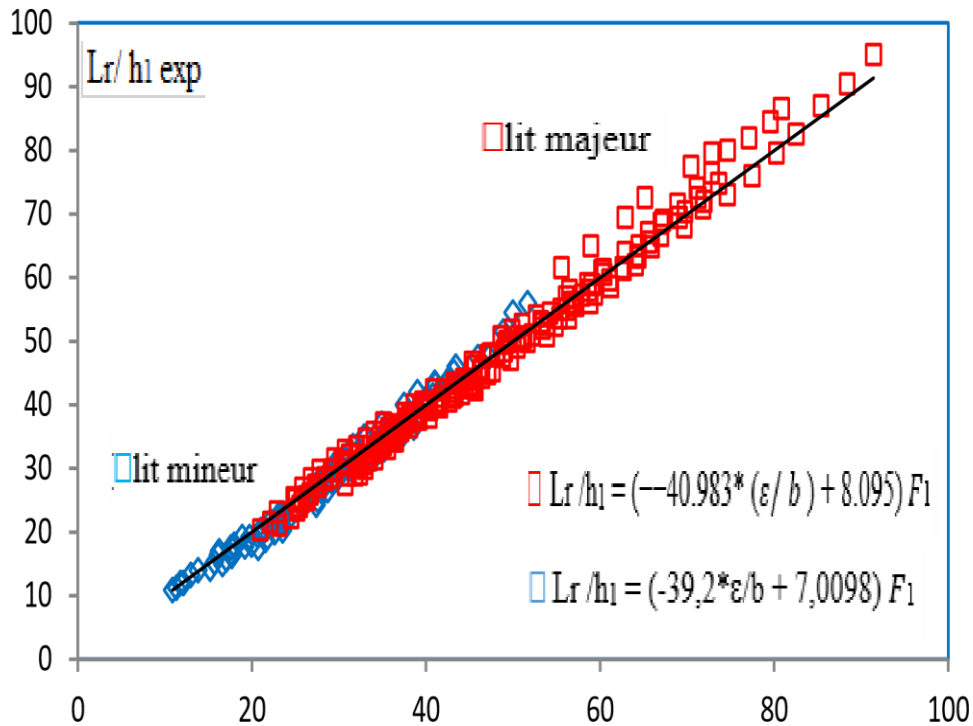


Figure III.14 : Représentation de l'équation générale $f(\varepsilon/b, F1)$ appliquée à la longueur relative du rouleau de surface ($Lr/h1$), obtenue expérimentalement pour les deux cas ($\square$ lit mineur ; $\square$ lit majeur). (Walid, 2022)

Cette figure compare les mesures expérimentales de $Lr/h1$ avec les valeurs calculées à partir des relations empiriques globales, établies pour les deux lits d'un canal rectangulaire à section composée. L'analyse montre que l'effet réducteur de la rugosité sur la longueur du rouleau de surface est plus marqué dans le lit mineur que dans le lit majeur.

III.1.3 La variation du rapport Y ($h2/h1$) en fonction du nombre de Froude ($F1$)

III.1.3.1 Rapport des hauteurs caractéristiques du ressaut (Y) en fonction du nombre de Froude ($F1$) dans le lit mineur ($0 < h2 < 20$ cm)

La Figure III.15 illustre la variation du rapport Y en fonction du nombre de Froude incident ($F1$) pour cinq rugosités équivalentes : $\varepsilon = 0$ mm, $\varepsilon = 6$ mm, $\varepsilon = 8$ mm, $\varepsilon = 10$ mm et $\varepsilon = 12$ mm. Les résultats expérimentaux mettent en évidence cinq regroupements distincts de points, chacun correspondant à une rugosité fixe. L'analyse de ces mesures révèle que, pour chaque valeur de rugosité (ε), la relation entre Y et $F1$ s'exprime sous la forme d'une droite de type linéaire : $Y = a3 (F1)$.

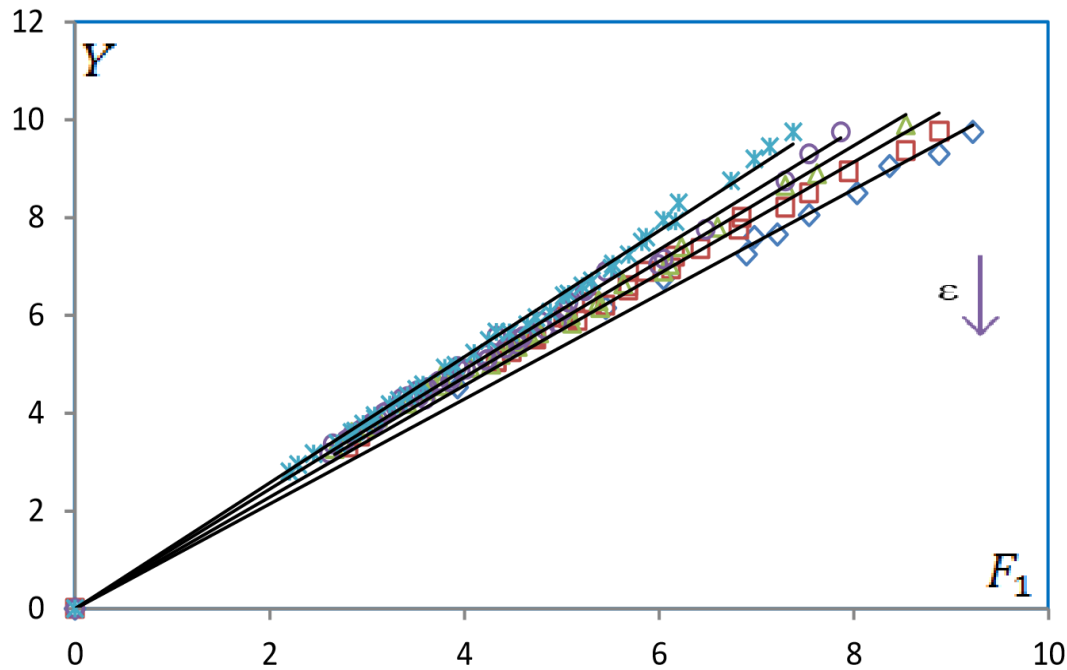


Figure III.15 : Présentation du rapport des hauteurs conjuguées (h_2/h_1) en fonction du nombre de Froude, pour cinq rugosités distinctes : (◇) 12 mm ; (□) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; (○) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustement. (Walid, 2022)

L'analyse des résultats expérimentaux met en évidence que le rapport Y augmente proportionnellement avec la croissance du nombre de Froude (F_1), et ce pour toutes les rugosités considérées. Inversement, Y diminue lorsque la rugosité (ε) s'accroît, ce qui confirme l'impact significatif de ce paramètre sur les caractéristiques du ressaut hydraulique.

Le Tableau III.5 regroupe les valeurs du coefficient a_3 , tandis que la Figure III.16 illustre la relation entre ce coefficient et la rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur.

Tableau III.5 : Coefficient a_3 des courbes d'ajustements.

ε / b	Coefficient a_3	R^2
0,08	3.817	0,995
0,06666667	4.501	0,985
0,05333333	4.809	0,976
0,04	5.528	0,983
0	6.986	0,933

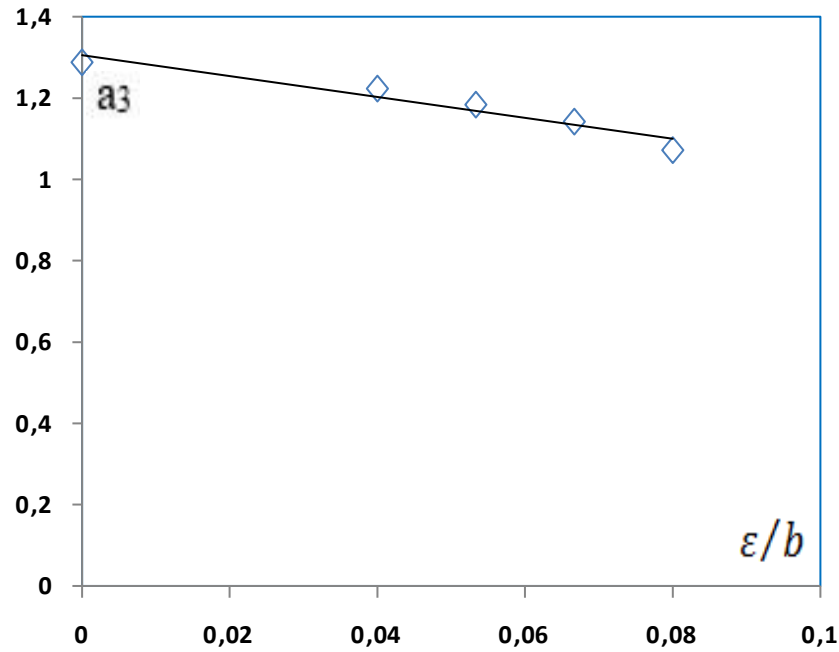


Figure III.16 : Représentation du coefficient a_3 en fonction de la rugosité relative (ϵ/b) dans le lit mineur. (Walid, 2022)

L'ajustement des couples de valeurs (a_3 , ϵ/b) issus du Tableau III.9, réalisé par la méthode des moindres carrés, a permis d'obtenir une relation linéaire robuste exprimée comme suit : $a_3 = -2.5684 * \epsilon/b + 1.3053$, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,931$, confirmant la qualité de l'ajustement. Cette corrélation est illustrée par la Figure III.16. Par conséquent, l'équation reliant le nombre de Froude ($F1$), la rugosité relative (ϵ/b) et le rapport des hauteurs conjuguées (Y) peut s'écrire :

$$Y = (-2.5684 \epsilon/b + 1.3053) F1 \quad (\text{III.5})$$

Cette équation est applicable pour $0 \leq \epsilon/b \leq 0.08$.

La Figure III.17 confirme que la fonction $Y = f(\epsilon/b, F1)$ s'ajuste correctement aux mesures expérimentales obtenues pour le lit mineur, la majorité des points expérimentaux s'alignant sur la première bissectrice, ce qui atteste de la fiabilité du modèle.

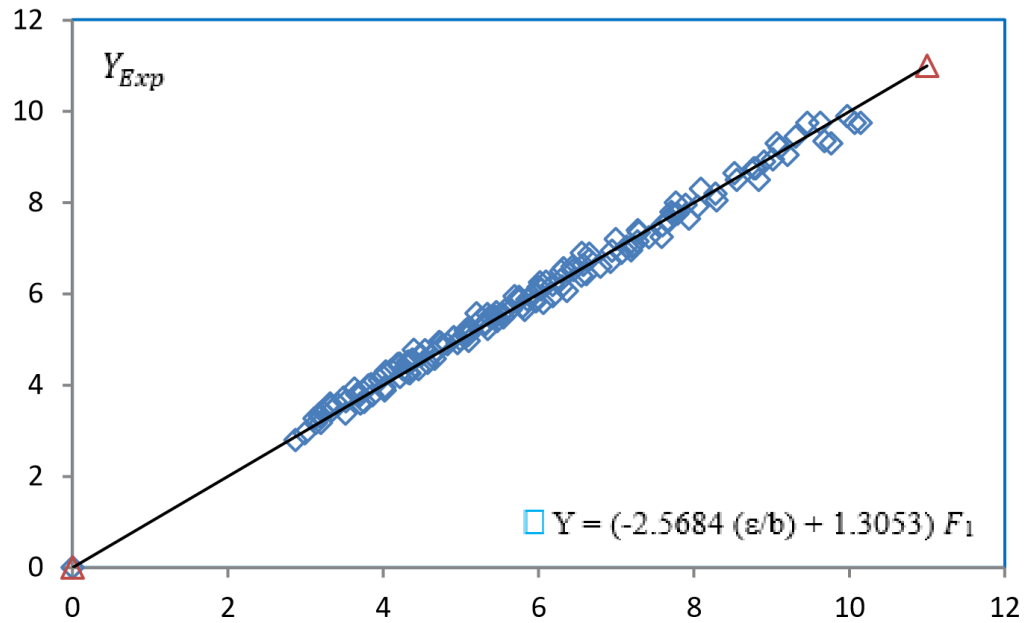


Figure III.17 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées (h_2/h_1) en fonction de la relation $f(\epsilon/b, F_1)$. ($\square$) Points expérimentaux du ressaut hydraulique formé sur fond rugueux.
(—) Première bissectrice. (Walid, 2022)

III.1.3.2 Étude de la variation du rapport $Y = h_1/h_2$ avec le nombre de Froude (F_1) dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$ cm)

La Figure III.18 illustre l'évolution du rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude (F_1) pour cinq rugosités relatives (ϵ/b) dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$ cm). Les résultats expérimentaux mettent en évidence cinq regroupements distincts de points, chacun correspondant à une valeur spécifique de rugosité. L'analyse des mesures montre que, pour chaque rugosité (ϵ), la relation entre Y et F_1 suit une tendance linéaire de la forme : $h_2/h_1 = b_3(F_1)$.

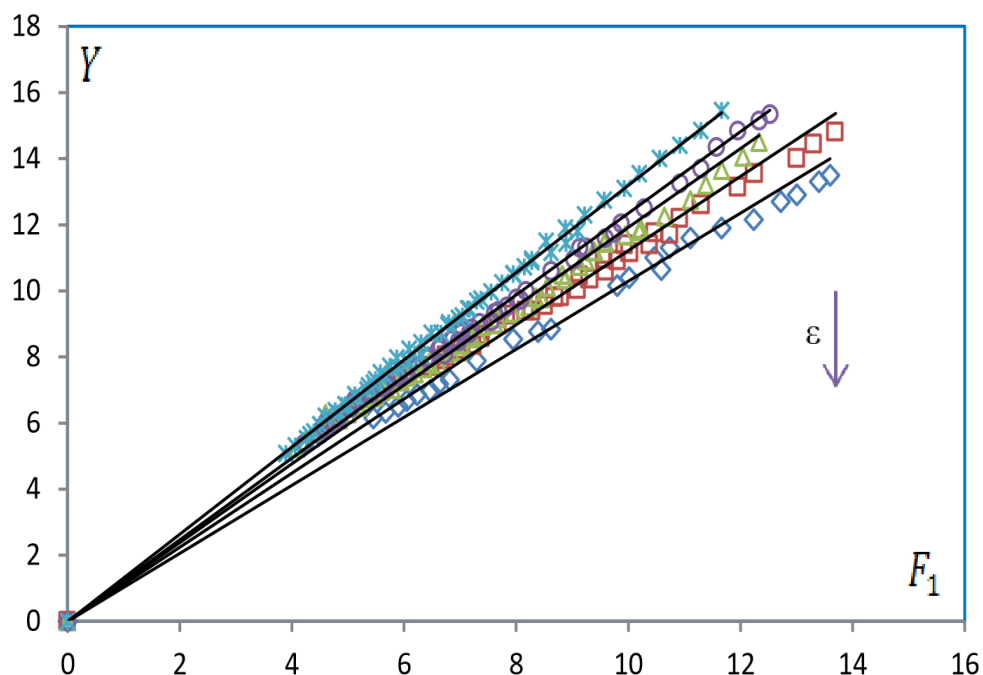


Figure III.18 : Représentation du rapport $Y = h_2/h_1$ en fonction du nombre de Froude dans le lit majeur, pour cinq rugosités testées : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustement. (Walid, 2022)

Le Tableau III.6 synthétise les valeurs obtenues du coefficient b_3 . Par ailleurs, la Figure III.19 illustre l'évolution de ce coefficient en fonction de la rugosité relative (ε/B) dans le lit majeur.

Tableau III.6 : Coefficient b_3 des courbes d'ajustements.

ε / b	Coefficient b_3	R2
0,08	1.029	0,987
0,067	1.122	0,986
0,053	1.192	0,987
0,04	1.235	0,996
0	1.319	0,998

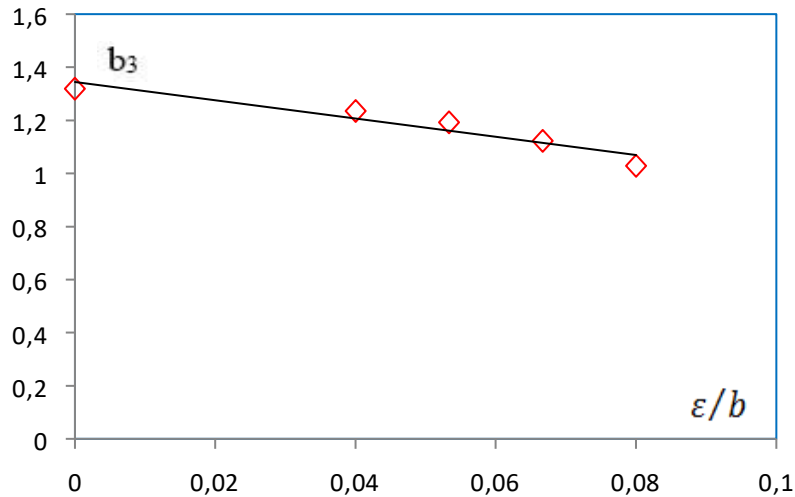


Figure III.19 : Variation du coefficient b_3 en fonction de la rugosité relative (ϵ/b) dans le lit majeur. (Walid, 2022)

L'ajustement des couples de valeurs (b_3 , ϵ/b) issus du tableau, réalisé par la méthode des moindres carrés, a permis d'obtenir une relation linéaire fiable exprimée comme suit : $b_3 = -3.4394 \cdot \epsilon/b + 1.3445$, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9164$. Cette équation est représentée par la Figure III.19. Ainsi, l'approche reliant le nombre de Froude (F_1), la rugosité relative (ϵ/b) et le rapport des hauteurs conjuguées ($Y = h_2/h_1$) est formulée comme suit :

$$Y = (-3.4394 \cdot \epsilon/b + 1.3445) F_1 \quad (\text{III.6})$$

Cette équation est applicable pour $0 \leq \epsilon/b \leq 0.08$.

La Figure III.20 montre que la relation $Y = f(\epsilon/b, F_1)$ présente une excellente corrélation pour le lit majeur ($20 < h_2 < 20 \text{ cm}$). La majorité des points expérimentaux s'alignent étroitement sur la première bissectrice, ce qui confirme la fiabilité et la précision des mesures réalisées.

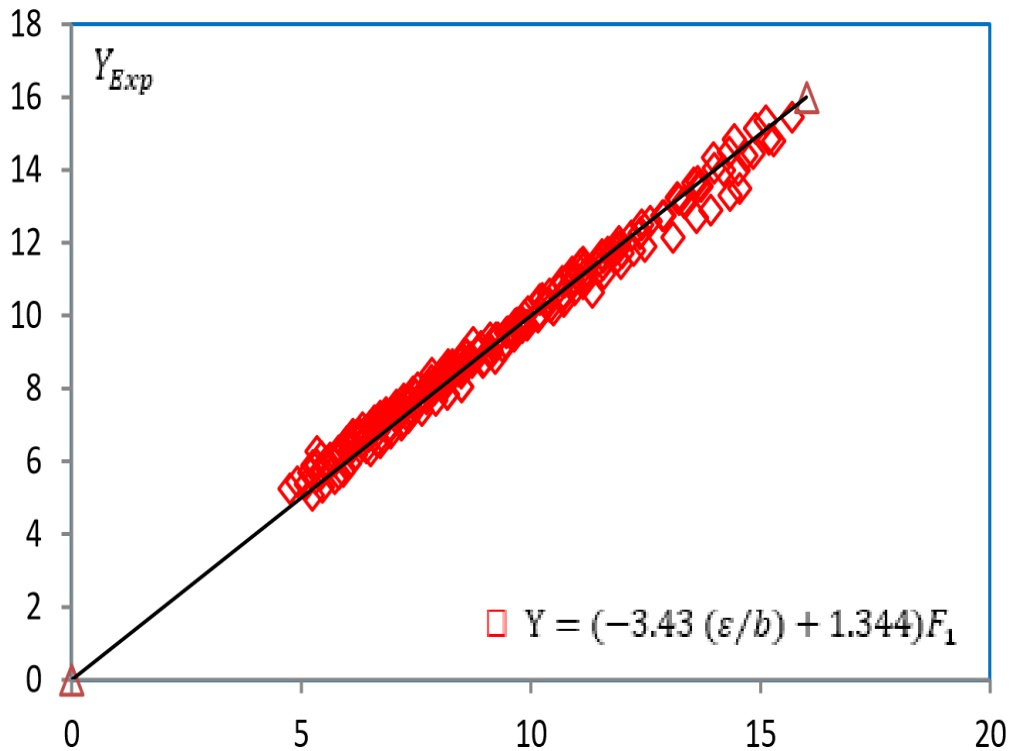


Figure III.20 : Représentation du rapport Y_{exp} et de la fonction $f(\epsilon/b, F1)$. ($\square$) Points expérimentaux du ressaut contrôlé sur fond rugueux dans le lit majeur. (—) Première bissectrice. (Walid, 2022)

La Figure III.21 illustre l'évolution du rapport Y des hauteurs conjuguées expérimentales en fonction de la relation $f(\epsilon/b, F1)$, dans le cas d'un ressaut hydraulique se développant à l'intérieur d'un canal rectangulaire à section composée. Cette représentation met en parallèle les valeurs expérimentales du rapport Y avec celles prédites par les relations empiriques globales pour les deux lits du canal. L'analyse montre que le rapport des hauteurs conjuguées est plus faible dans le lit mineur que dans le lit majeur lorsque le fond est rugueux. Cela indique que l'effet réducteur de la rugosité s'exprime de manière plus marquée dans le lit majeur que dans le lit mineur.

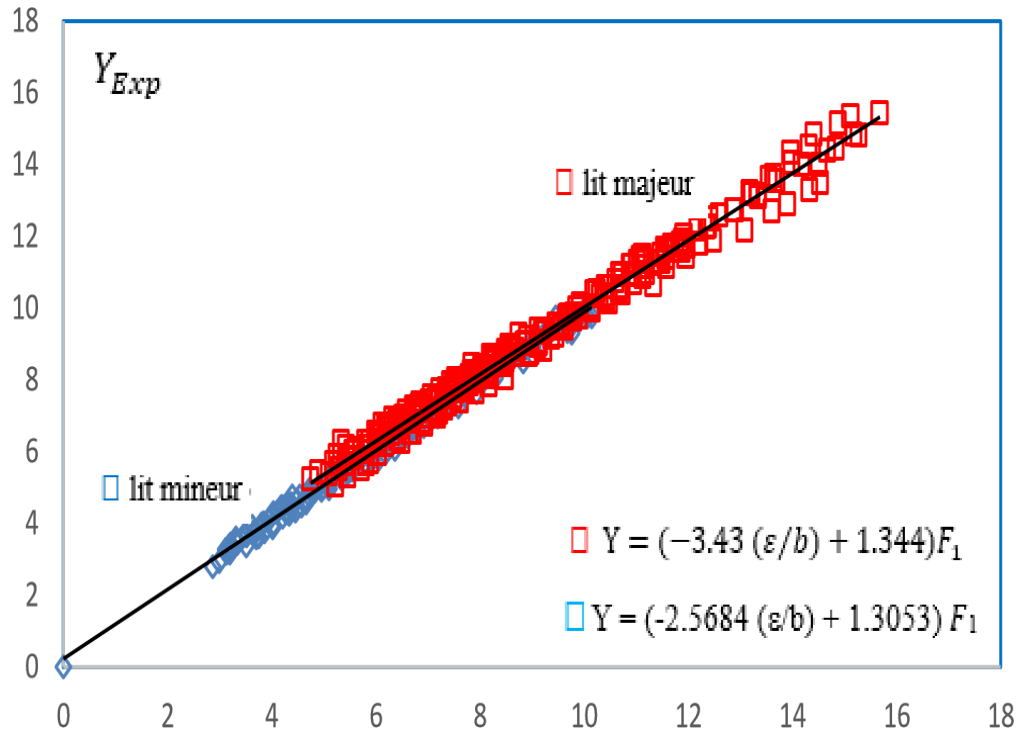


Figure III.21 : Variation du rapport des hauteurs conjuguées (h_2/h_1) mesuré expérimentalement en fonction de la relation $f(\epsilon/b, F_1)$, pour les deux configurations : (□ lit mineur ; □ lit majeur). (Walid, 2022)

III.1.4 La variation de la hauteur relative du seuil (S/h_1) en fonction du nombre de Froude incident (F_1)

III.1.4.1 Étude de la variation du seuil (S/h_1) avec le nombre de Froude (F_1) dans le lit mineur ($0 < h_2 < 20$ cm)

La Figure III.22 illustre l'évolution de la hauteur relative du seuil (S/h_1) en fonction du nombre de Froude incident (F_1), pour cinq valeurs de rugosité équivalentes : $\epsilon = 12$ mm, $\epsilon = 10$ mm, $\epsilon = 8$ mm, $\epsilon = 6$ mm et $\epsilon = 0$ mm. Les résultats expérimentaux mettent en évidence cinq regroupements distincts de points, chacun correspondant à une rugosité spécifique. L'analyse de ces mesures démontre que, pour chaque rugosité (ϵ), la relation entre S/h_1 et F_1 s'ajuste suivant une droite de tendance linéaire de la forme : $S/h_1 = a_4 (F_1)$.

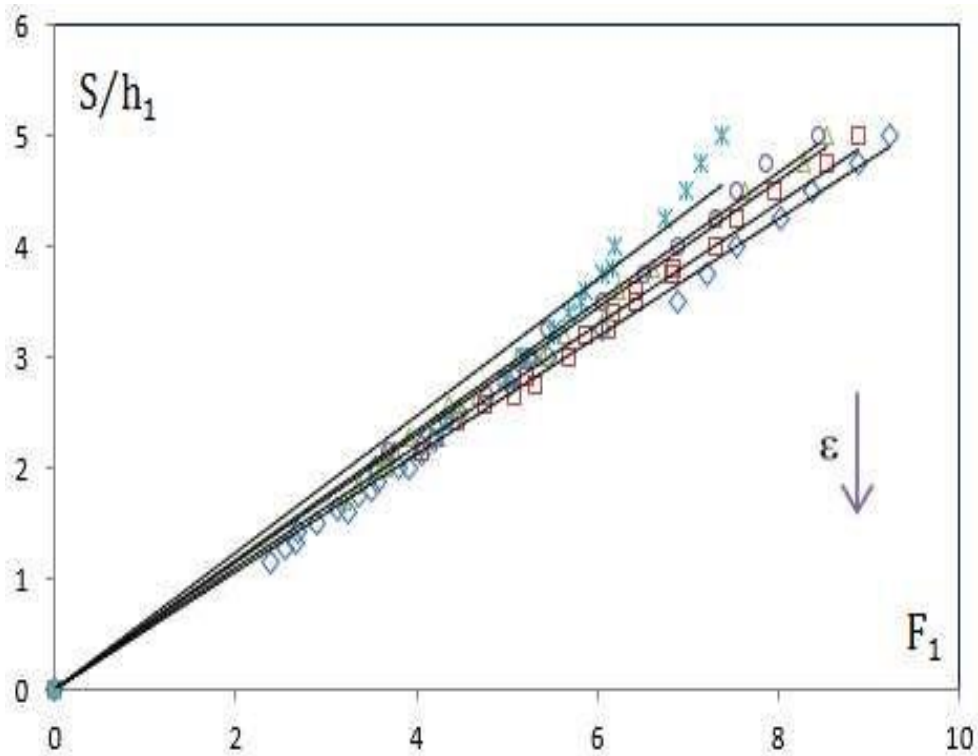


Figure III.22 : Variation de la hauteur relative du seuil (S/h_1) en fonction du nombre de Froude, pour cinq valeurs de rugosité : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et (*) 0 mm. (—) Courbes d'ajustement. (Walid, 2022)

L'examen des résultats expérimentaux révèle que la hauteur relative du seuil (S/h_1) croît proportionnellement avec l'augmentation du nombre de Froude (F_1), et ce pour l'ensemble des rugosités étudiées. Par ailleurs, une réduction de la valeur de S/h_1 s'accompagne systématiquement d'une élévation de la rugosité relative (ϵ/b). Le Tableau III.7 présente les valeurs correspondantes du coefficient a_4 , tandis que la Figure III.23 illustre la relation entre ce coefficient et la rugosité relative (ϵ/b) observée dans le lit mineur.

Tableau I.7 : Coefficient a_4 des courbes d'ajustements.

ε / b	Coefficient a_4	R^2
0,08	0.5314	0,9962
0,06666667	0.5489	0,9937
0,05333333	0.5741	0,9964
0,04	0.5835	0,9956
0	0.6166	0,962

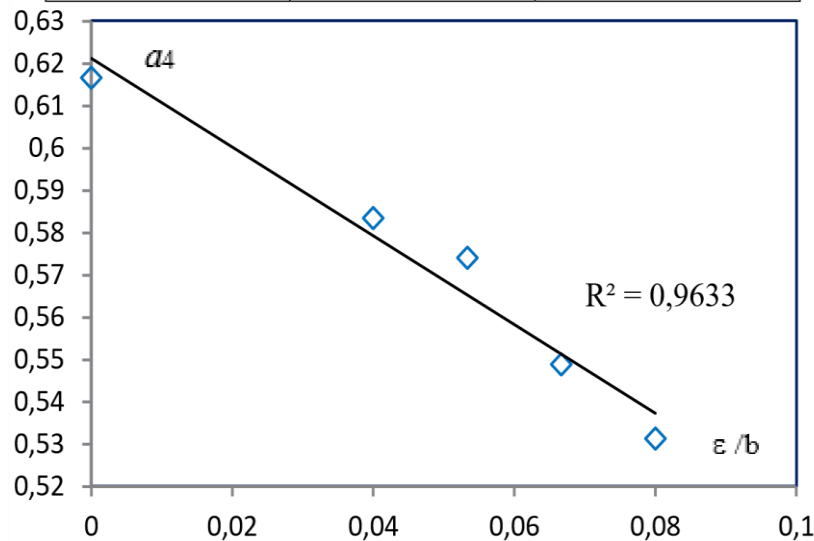


Figure III.23 : Représentation du coefficient a_4 en fonction de la rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur. (Walid, 2022)

L'ajustement des couples de valeurs (a_4 , ε/b), issus du tableau, a permis d'établir par la méthode des moindres carrés une relation linéaire fiable exprimée comme suit : $a_4 = -1.0486 * \varepsilon/b + 0.6212$, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9633$, confirmant la robustesse de la corrélation. Cette équation est représentée graphiquement dans la Figure III.23. L'expression reliant le nombre de Froude (F_1), la rugosité relative (ε/b) et la hauteur relative du seuil (S/h_1) est donnée par :

$$S/h_1 = (-1.0486 * \varepsilon/b + 0.6212) F_1 \quad (\text{III.7})$$

Cette équation est applicable pour $0 \leq \varepsilon/b \leq 0.08$.

La Figure III.24 confirme en outre que la fonction $S/h_1 = f(\varepsilon/b, F_1)$ présente un excellent ajustement pour le lit mineur, la majorité des points expérimentaux s'alignant étroitement sur la première bissectrice.

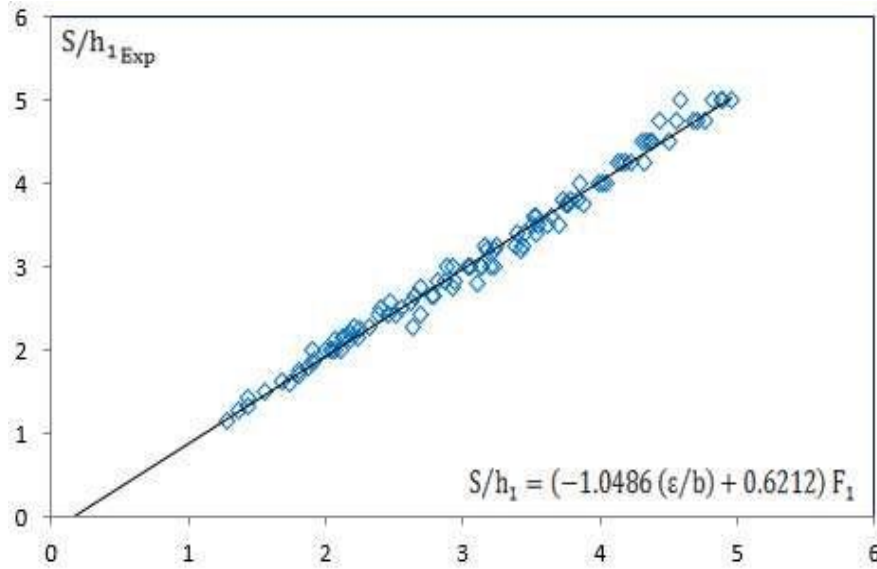


Figure III.24 : Représentation de la hauteur relative du seuil (S/h_1) obtenue expérimentalement et de la relation globale $f(\epsilon/b, F_1)$. (□) Données expérimentales du ressaut hydraulique formé sur fond rugueux. (—) Première bissectrice. (Walid, 2022)

III.4.2 Étude de la variation du seuil (S/h_1) en fonction du nombre de Froude (F_1) dans le lit majeur ($20 < h_2 < 50$ cm)

En continuité avec l'approche développée pour le lit mineur, l'analyse a été élargie au lit majeur afin d'examiner la variation de la hauteur relative du seuil (S/h_1) en fonction du nombre de Froude incident (F_1). La Figure III.25 met en évidence cette évolution pour cinq rugosités équivalentes : $\epsilon = 0$ mm, $\epsilon = 6$ mm, $\epsilon = 8$ mm, $\epsilon = 10$ mm et $\epsilon = 12$ mm. Les résultats montrent cinq regroupements distincts de points expérimentaux, chacun associé à une valeur de rugosité donnée. L'examen de ces mesures met en lumière que, pour chaque rugosité (ϵ), la relation entre S/h_1 et F_1 s'ajuste selon une droite de tendance linéaire de la forme $S/h_1 = b_4(F_1)$.

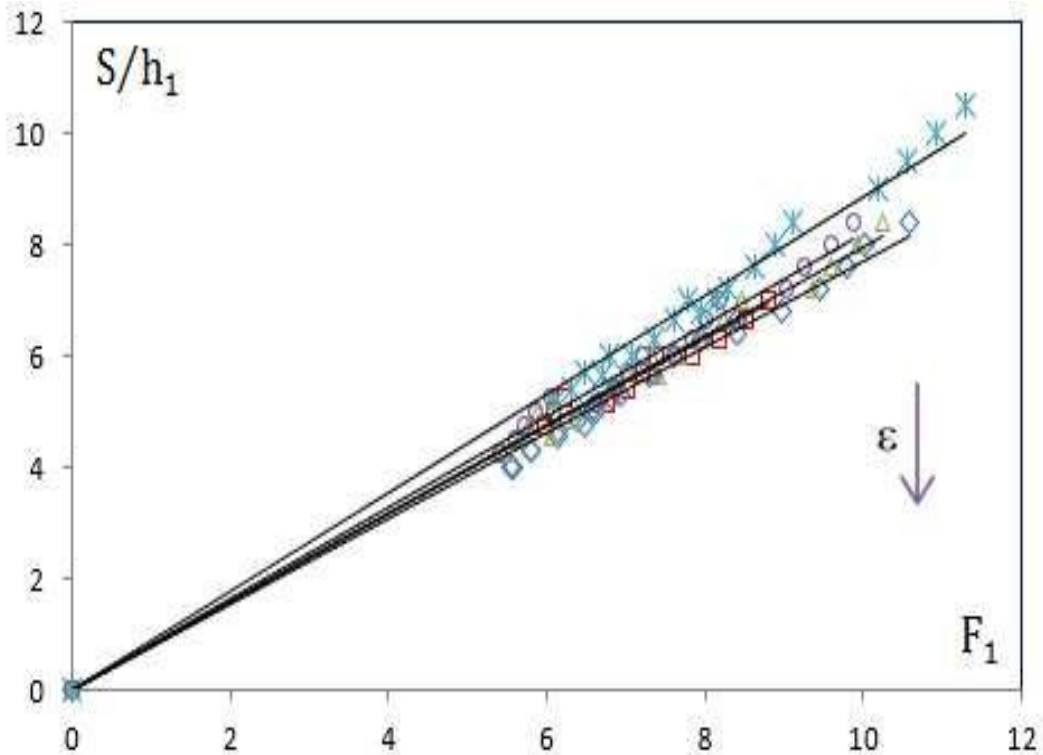


Figure III.25 : Variation de la hauteur relative du seuil (S/h_1) en fonction du nombre de Froude, pour cinq rugosités distinctes : ($\diamond$) 12 mm ; ($\square$) 10 mm ; (Δ) 08 mm ; ($\circ$) 06 mm et ($*$) 0 mm. (—) Courbes d'ajustement. (Walid, 2022)

L'analyse des résultats expérimentaux montre que la hauteur relative du seuil (S/h_1) croît proportionnellement avec le nombre de Froude (F_1), indépendamment de la rugosité considérée. Parallèlement, une diminution de S/h_1 est systématiquement associée à une augmentation de la rugosité relative (ε/b). Le Tableau III. 8 récapitule les valeurs obtenues pour le coefficient a_4 , tandis que la Figure III.26 illustre la relation entre ce coefficient et la rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur.

Tableau II.8 : Coefficient b_4 des courbes d'ajustements.

ε / b	Coefficient b_4	R^2
0,08	0.7703	0,9912
0,0667	0.7904	0,9922
0,0533	0.7999	0,9883
0,04	0.8198	0,9874
0	0.8871	0,9904

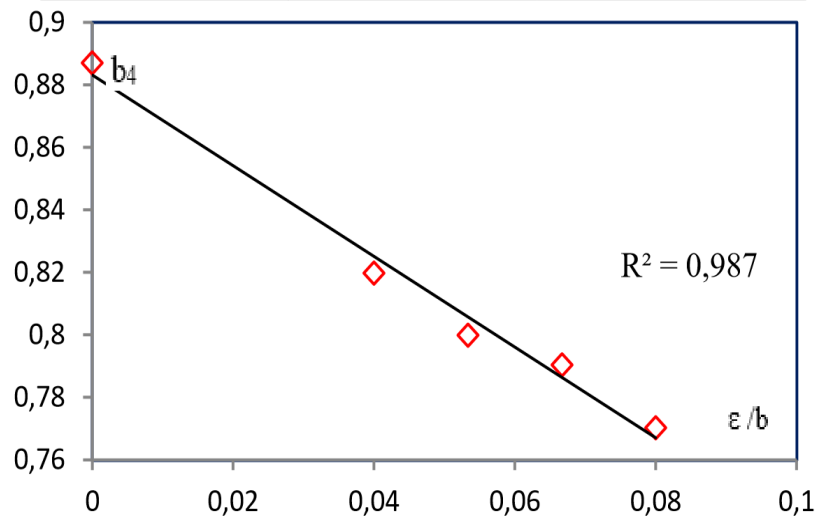


Figure III.26 : Représentation du coefficient b_4 en fonction de la rugosité relative (ε/b) dans le lit majeur. (Walid, 2022)

L'ajustement des couples de valeurs (b_4 , ε/b) issus du tableau a permis, grâce à la méthode des moindres carrés, d'établir la relation linéaire suivante : $b_4 = -1.4512 * \varepsilon / b + 0.8832$, avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,987$, confirmant une excellente corrélation. L'équation reliant le nombre de Froude ($F1$), la rugosité relative (ε/B) et la hauteur relative du seuil ($S/h1$) dans le lit majeur s'écrit ainsi :

$$S/h1 = (-1.4512 * \varepsilon / b + 0.8832) F1 \quad (III.8)$$

Cette équation est applicable pour $0 \leq \varepsilon / b \leq 0.08$.

La Figure III.27 démontre que la relation $S/h1 = f(\varepsilon/b, F1)$ s'ajuste avec une bonne corrélation pour le lit majeur, la majorité des points de mesure expérimentaux suivant parfaitement la première bissectrice.

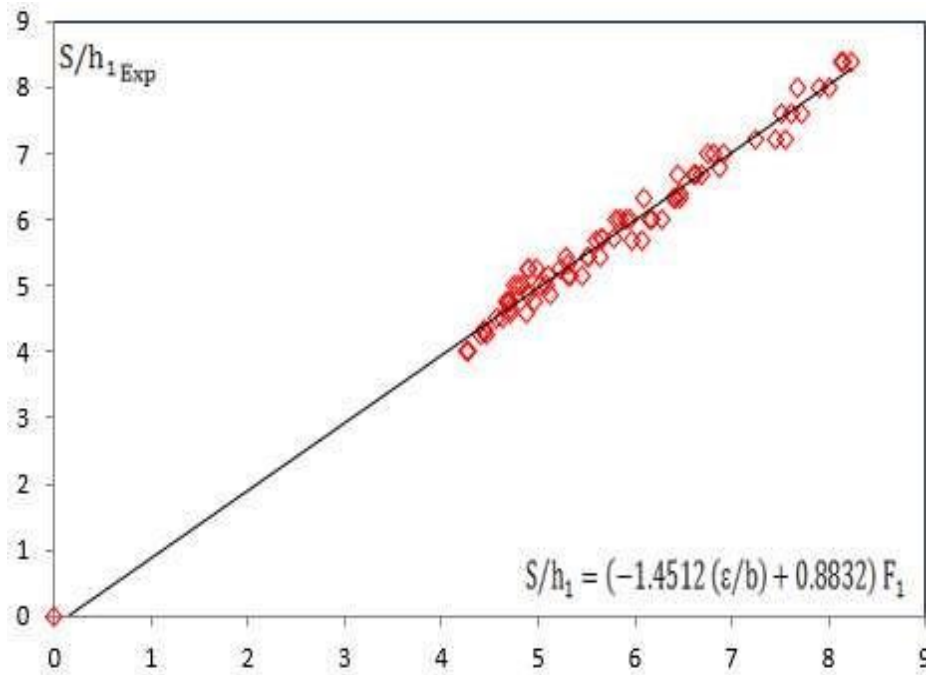


Figure III.27 : Évolution de la hauteur relative du seuil (S/h_1) en fonction de la relation $f(\epsilon/b, F_1)$. (□) Données expérimentales du ressaut hydraulique formé sur fond rugueux. (—) Première bissectrice. (Walid, 2022)

La Figure III.28 présente l'évolution de la hauteur relative du seuil (S/h_1) obtenue expérimentalement en fonction de la relation $f(\epsilon/b, F_1)$, dans le cas d'un ressaut hydraulique se développant à l'intérieur d'un canal rectangulaire à section composée. Cette illustration met en parallèle les valeurs mesurées du rapport S/h_1 avec celles issues des équations empiriques globales établies pour les deux lits du canal.

Il ressort de cette comparaison que la hauteur relative du seuil, en présence d'un fond rugueux, demeure plus faible dans le lit mineur que dans le lit majeur, ce qui indique que cette section a un effet négatif plus prononcé dans le lit majeur que dans le lit mineur.

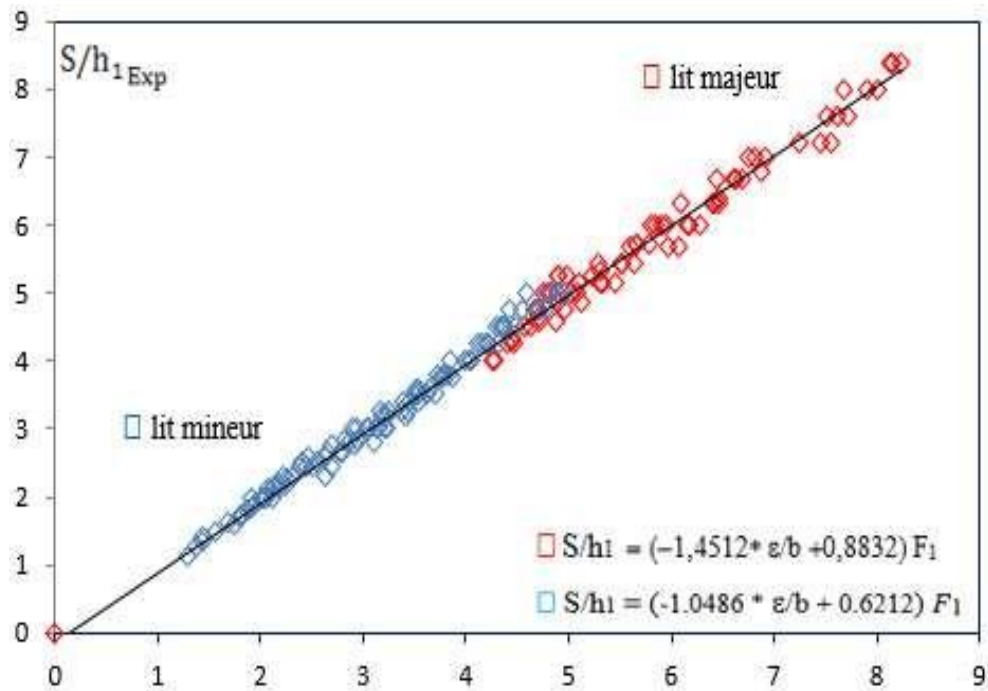


Figure III.28 : Illustration de la hauteur relative S/h_1 obtenue expérimentalement et de la relation empirique $f(\varepsilon/b, F_1)$, considérées pour les deux configurations ($\square$ lit mineur ; $\square$ lit majeur). (Walid, 2022)

Conclusion

Cette étude expérimentale antérieure (Walid, 2022) a permis d'approfondir la compréhension du phénomène de ressaut hydraulique évoluant dans un canal rectangulaire à section composée, caractérisé par un lit mineur présentant une rugosité. Les analyses ont révélé des corrélations empiriques sans dimension, pertinentes pour la description des paramètres gouvernant ce processus hydraulique complexe. Les observations ont confirmé l'influence prépondérante de la rugosité sur la longueur normalisée du ressaut, l'étendue relative du rouleau de surface, le rapport des hauteurs conjuguées ainsi que la hauteur réduite du seuil. Les modèles linéaires développés, fondés sur le nombre de Froude incident et la rugosité normalisée du fond, ont montré une excellente cohérence avec les résultats expérimentaux. Ces observations soulignent l'intérêt important des équations proposées pour gérer le comportement du ressaut dans de telles configurations. Par ailleurs, la comparaison entre les écoulements dans le lit mineur et dans le lit majeur a prouvé l'effet réducteur de la rugosité, suggérant une dynamique propre à chaque section du canal. Ces résultats contribuent à enrichir la littérature existante et constituent des outils pertinents pour la technique hydraulique et la conception d'ouvrages de contrôle des écoulements.

Conclusion de la première partie

Au terme de ce premier volet bibliographique, il apparaît que le ressaut hydraulique demeure un phénomène complexe et multidimensionnel, dont la compréhension exige une combinaison d'approches théoriques, analytiques et expérimentales. Les travaux recensés confirment que ses caractéristiques dépendent non seulement des conditions amont et aval de l'écoulement, mais également de la configuration géométrique du canal et des dispositifs de contrôle tels que les seuils, marches ou élargissements brusques.

Dans le premier chapitre, nous avons mis en évidence l'apport des modèles analytiques basés sur l'équation de la quantité de mouvement appliquée au ressaut évoluant dans un canal rectangulaire de section composée. L'intégration d'une force de résistance supplémentaire, inspirée des travaux de Achour (2000), a montré que la prise en compte de la forme composée du canal permet d'obtenir des résultats plus proches de la réalité, en corrigeant la surestimation du rapport des hauteurs conjuguées et en améliorant l'estimation du rendement énergétique. Cette constatation souligne la nécessité d'introduire des termes correctifs dans les formulations classiques pour traiter les cas de géométries complexes.

Le deuxième chapitre a permis de dégager les principaux enseignements issus des expérimentations menées sur des canaux rectangulaires composés. Les mesures effectuées sur le rapport des hauteurs, les longueurs caractéristiques (L_j et L_r) ainsi que l'efficacité du ressaut, ont montré que les résultats varient considérablement entre le lit mineur et le lit majeur. Les relations empiriques obtenues constituent des outils utiles pour le dimensionnement des bassins de dissipation, tout en mettant en évidence les limites des généralisations établies pour les canaux prismatiques simples. Cette partie confirme donc l'importance des études expérimentales pour enrichir et valider les approches théoriques.

Enfin, le troisième chapitre a approfondi la question de la rugosité, paramètre souvent négligé mais qui exerce une influence déterminante sur le comportement du ressaut hydraulique. L'introduction de la rugosité relative (ε/b) dans l'analyse a permis de quantifier son impact sur les longueurs normalisées, sur le rapport des hauteurs conjuguées et sur le rendement du ressaut. Les modèles linéaires proposés, fondés sur le couplage entre le nombre de Froude incident et la rugosité, se sont révélés cohérents avec les résultats expérimentaux, confirmant ainsi la pertinence de cette approche. De plus, la comparaison entre les écoulements développés dans

le lit mineur rugueux et ceux dans le lit majeur a démontré des dynamiques différentes, traduisant l'hétérogénéité de la dissipation d'énergie selon la section considérée.

L'ensemble de ces analyses déduit deux remarques fondamentales : d'une part, le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé ne peut être correctement appréhendé sans prendre en considération les effets combinés de la géométrie et de la rugosité ; d'autre part, les formulations classiques doivent être enrichies par des relations empiriques dérivées d'observations expérimentales spécifiques.

En conclusion, cette partie bibliographique constitue une base solide pour orienter la suite de ce travail. Elle a permis de cerner les paramètres déterminants, d'identifier les approches existantes et leurs limites, et de dégager les perspectives de recherche. La partie expérimentale qui suivra s'inscrit dans cette continuité et vise à approfondir la compréhension du ressaut hydraulique en testant, dans un dispositif de laboratoire, l'influence de la section composée, de la présence d'ouvrages de contrôle (seuils minces et seuils épais...) et de la rugosité du lit mineur sur ses principales caractéristiques hydrauliques.

Introduction de la deuxième partie

Cette deuxième partie est consacrée à l'étude pratique et appliquée du phénomène. Elle combine une approche méthodologique, semi-théorique et expérimentale, afin de mieux cerner l'influence de la rugosité et de la configuration géométrique sur les principales caractéristiques hydrauliques du ressaut.

Le premier chapitre décrit de manière détaillée le dispositif expérimental, les outils de mesure utilisés ainsi que les procédures de préparation des lits rugueux. Il constitue la base matérielle et méthodologique nécessaire à la réalisation des essais.

Le deuxième chapitre développe une analyse semi-théorique de l'effet des lits rugueux sur le rapport des hauteurs conjuguées. En intégrant des paramètres clés tels que le nombre de Froude, le coefficient de résistance et le rapport d'élargissement, un modèle adimensionnel a été établi et validé expérimentalement, confirmant sa pertinence dans la prédiction des caractéristiques du ressaut.

Enfin, le troisième chapitre s'appuie sur des expérimentations en laboratoire pour analyser l'impact de la rugosité et du régime hydraulique sur la longueur du ressaut, la longueur du rouleau, le rapport de seuil et l'efficacité énergétique. Les relations empiriques obtenues fournissent des outils pratiques de calcul et de dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

Ainsi, cette deuxième partie constitue une passerelle entre la théorie et la pratique : elle vise à démontrer que seule une approche intégrée, combinant analyse mathématique et validation expérimentale, permet de comprendre et de modéliser de façon fiable le ressaut hydraulique dans des canaux rectangulaires composés à lits rugueux.

Chapitre I : Dispositif et protocole expérimental

Introduction

Dans ce chapitre, nous explorons les méthodes de travail qui nous permettent d'étudier le ressaut hydraulique dans un canal composé rectangulaire avec lit mineur et majeur rugueux. En détaillant chaque étape du processus, nous mettons en évidence les outils nécessaires pour réaliser ces tâches.

I.1 Description du canal expérimental utilisé dans les expériences du ressaut hydraulique

L'étude expérimentale consiste à investiguer les ressauts hydrauliques à l'aide d'un canal hydraulique de 10 m de longueur et 0,5 m de profondeur avec une section rectangulaire installé au Laboratoire d'exploitation et valorisation des ressources naturelles en zones arides de l'Université de Ouargla. Le canal, orienté horizontalement avec une pente nulle, présente une dimension de 4 m de longueur et de hauteur 15,5 cm avec des parois en plexiglas transparent pour visualiser clairement l'écoulement. La section composée se compose d'un lit mineur (largeur 14,4 cm) et d'un lit majeur (largeur 25 cm).



Photo I.1: Photo du canal d'expérimentation au Laboratoire d'exploitation et valorisation des ressources naturelles en zones arides.

La pompe centrifuge, qui transfère l'eau du bassin d'accumulation au canal d'expérimentation à travers les conduites d'écoulement. La pompe délivre un débit allant jusqu'à 50 litres par seconde à travers une conduite de 150 mm de diamètre vers une boîte métallique fermée avec une plaque à orifice, créant un débit convenable pour créer un ressaut hydraulique. La pompe s'appuie sur la force centrifuge pour générer la pression nécessaire, avec la possibilité de régler le débit à l'aide du levier de commande pour étudier son effet sur le ressaut hydraulique dans différentes conditions.



Photo I.2: La pompe utilisée pour générer le débit

Le bras de réglage de ce canal expérimental permet d'ajuster la pente du canal. Ce réglage permet d'étudier l'effet de la pente sur la vitesse d'écoulement, la profondeur d'eau et le développement du ressaut hydraulique, facilitant ainsi l'analyse des phénomènes hydrauliques dans différentes conditions.



Photo I.3 : Bras de réglage de pente expérimentale.

Un bassin d'accumulation est un réservoir utilisé dans canal expérimental pour stocker l'eau avant qu'elle ne soit pompée dans le système. Il contrôle du débit et assure une alimentation continue du pompage.



Photo I.4 : Bassin d'accumulation dans le canal expérimental.

Débitmètre d'eau, utilisé dans le canal expérimental pour mesurer avec précision le volume d'eau refoulé dans le système.



Photo I.5 : Débitmètre d'eau dans le canal expérimental.

Le déversoir rectangulaire du canal expérimental est utilisé pour contrôler et mesurer le débit. Il est installé à l'intérieur du canal pour créer une différence de niveau d'eau, permettant de calculer le débit.



Photo I.6 : Déversoir rectangulaire inséré dans le canal expérimental.

I.2 Les appareillages de mesure

I.2.1 Le calcul du débit

Le système de mesure se compose d'un canal pilote de 4 mètres de longueur avec lit mineur et majeur rugueux en but de simuler les écoulements naturels. À son extrémité, le canal se raccorde à un déversoir rectangulaire avec un rétrécissement latéral.

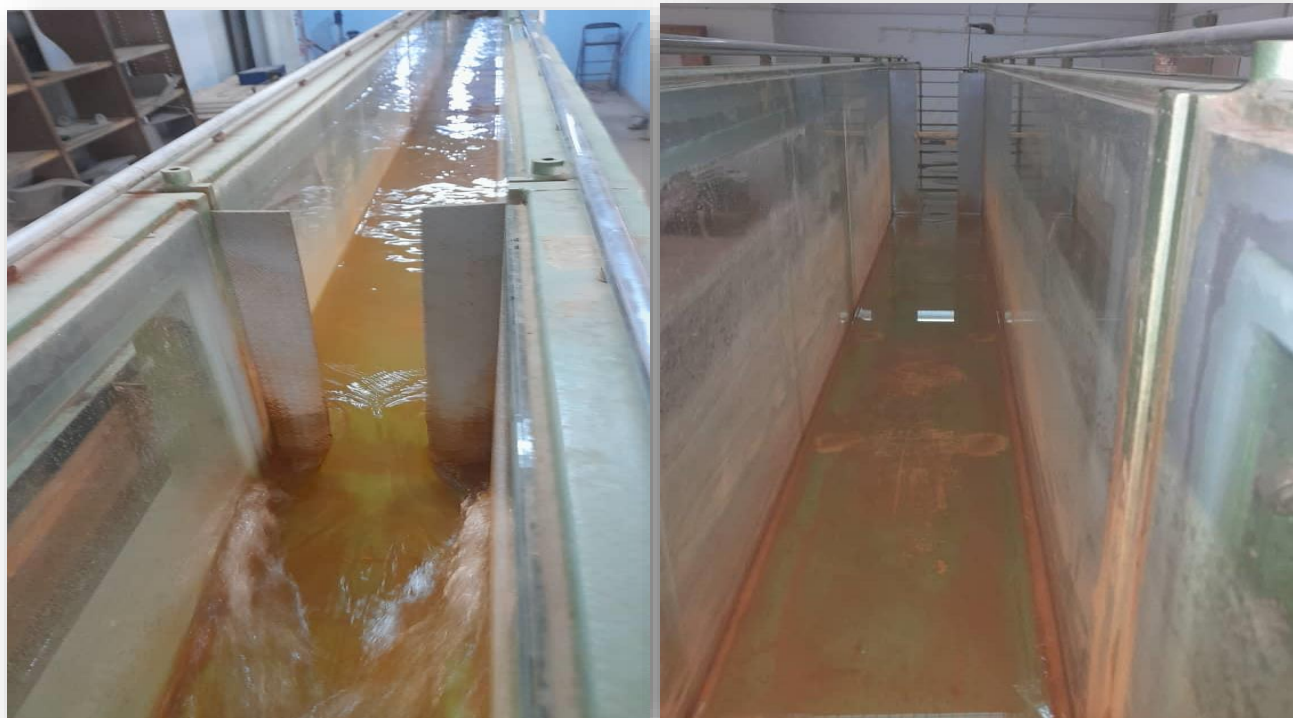


Photo I.7 : Déversoir rectangulaire avec contraction latérale pour mesurer les débits.

Lorsque le débit traverse le déversoir, la hauteur de l'eau écoulée h_d est mesurée à l'aide d'un limnimètre. Le calcul est basé sur la relation empirique présentée par Hachemi Rachadi (2007). Où h_d est inséré dans l'équation pour calculer directement le flux, à condition que le rapport d'élargissement β soit inférieur à 0,45.

La relation empirique par Hachemi Rachedi (2007) est ci-contre :

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

Où :

Q : Débit en (m³/s).

B : Largeur du canal (m).

β : Rapport de forme : 0,44.

h_d : Hauteur de la lame déversant en (m).

g : Accélération de la pesanteur (m/s^2).

Cette relation est applicable lorsque $\beta = b/B < 0,45$.

I.2.2 Limnimètre pour la mesure du niveau d'eau

Un limnimètre est un appareil utilisé pour mesurer la hauteur de l'eau à l'intérieur d'un canal lors d'une expérience. Il est installé au bord du canal pour surveiller les variations du niveau d'écoulement, permettant une mesure précise de la profondeur de l'eau après la formation du ressaut hydraulique.

Pour mesurer la profondeur avec le limnimètre, la base est ajustée de manière à ce que la pointe du capteur touche la surface de l'eau. Ensuite, la valeur de base est lue sur la règle graduée au point situé juste au-dessus du zéro du vernier. Ensuite, on identifie la marque sur le vernier qui correspond exactement à l'une des graduations de la règle, et cette valeur est ajoutée à la lecture de base pour obtenir la profondeur avec une grande précision.



Photo I.8 : Le limnimètre utilisé pour mesurer la hauteur d'eau dans le canal expérimental.

I.2.3 Description des Parois de Contrôle et de la Hauteur d'Ouverture en Amont dans l'Expérimentation du Ressaut Hydraulique

Les essais expérimentaux menés en laboratoire ont porté sur l'étude des écoulements brusques générés et contrôlés dans un canal de section composée avec lit mineur et majeur rugueux. L'étude a également inclus la conception et l'évaluation de parois de contrôle de hauteurs variées, allant de 2,5 cm à 21 cm (Photographie I.9), destinées à former et contrôler le ressaut hydraulique. Un large éventail de nombres de Froude a été exploré ($2 < F_1 < 9$), mettant en évidence les paramètres influençant la formation et l'évolution du ressaut. Ces seuils spécifiques, élaborés en laboratoire, jouent un rôle important dans la compréhension des mécanismes de dissipation d'énergie.



Photo I.9 : Parois minces de contrôle pour la formation du ressaut hydraulique.

Les essais ont été menés en faisant varier la hauteur d'ouverture de la section amont (h_1) selon quatre configurations distinctes : 2,5 cm ; 3,0 cm ; 3,5 cm et 4,0 cm. Afin d'explorer les caractéristiques hydrodynamiques du phénomène dans des conditions variées.

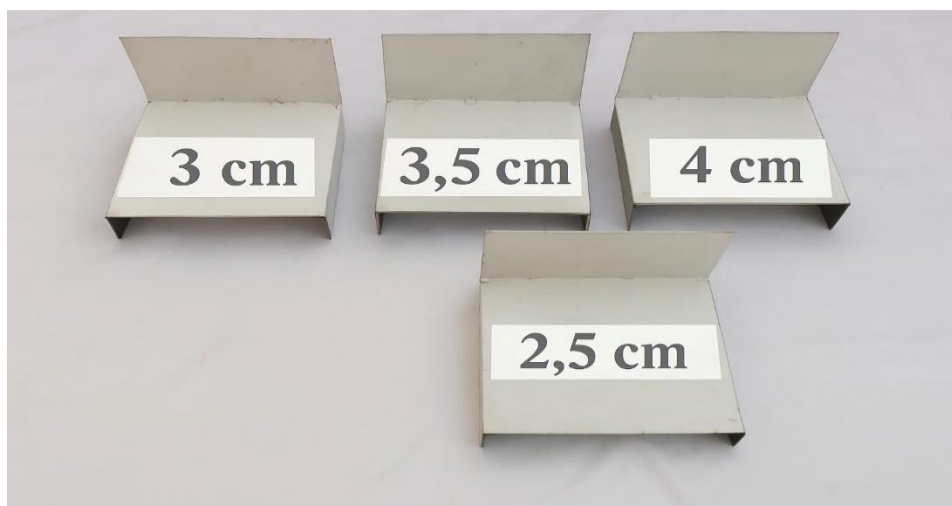


Photo I.10 : Ouvertures h_1 du canal utilisé à l'étude du ressaut hydraulique.

I.2.4 Procédure de préparation des tapis rugueux

Quatre types de tapis différents rugueux ont été conçus, chacun caractérisé par une rugosité équivalente spécifique ($\varepsilon = 6 \text{ mm}$, $\varepsilon = 8 \text{ mm}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$, $\varepsilon = 12 \text{ mm}$), ont été préparés pour s'adapter à la configuration composée du canal. La dimension se compose d'un tapis de $4 \text{ m} \times 14,4 \text{ cm}$, ainsi que de deux tapis supérieurs de $4 \text{ m} \times 5,3 \text{ cm}$ pour chacun. L'installation finale se compose d'un tapis de $4 \text{ m} \times 14,4 \text{ cm}$, ainsi que de deux tapis supérieurs de $4 \text{ m} \times 5,3 \text{ cm}$ pour chacun. Des granulés de plastique ont été collés sur ces tapis à l'aide de fil à pêche, et fixés avec de la colle Mitreapel (AC 500 et CA 130), assurant ainsi une fixation solide.



Photo I.11 : - 1. Adhésif Mitreapel utilisé pour la fixation | 2. Application de l'adhésif sur le tapis rugueux.

Un adhésif TKK Tekasil Universal a été utilisé pour installer les tapis rugueux. Cet adhésif se caractérise par son excellente adhérence. Ces propriétés spécifiques rendent les tapis rugueux rigidement fixés dans le canal composé.



Photo I.12 : - 1. Adhésif Tekasil utilisé pour la fixation | 2. Tapis rugueux installé dans le canal expérimental.

I.3 Protocol d'étude expérimentale

Cette étude expérimentale se concentre sur l'analyse du ressaut hydraulique contrôlé par des parois minces au sein d'un canal rectangulaire composé, constitué d'un lit mineur et d'un lit majeur rugueux. Les différentes hauteurs de parois minces, variant de 2,5 cm à 21 cm, ont été examinées en adoptant quatre hauteurs initiales du niveau d'écoulement à l'entrée, à savoir 2,5, 3, 3,5 et 4 cm. Au cours des expériences, une large gamme de nombres de Froude initiaux F_1 a été déterminée, s'étendant de 2 à 9.

La paroi mince est placée dans le canal en travers de l'écoulement provoque des modifications dans les caractéristiques de l'écoulement, entraînant la formation d'un ressaut hydraulique dont les propriétés varient en fonction de la hauteur de l'écoulement et de la géométrie du canal. Plusieurs variables hydrauliques et géométriques ont été mesurées, parmi lesquelles le débit volumique Q , la profondeur initiale h_1 , la profondeur finale h_2 , et la longueur finale du ressaut L_j . Lorsqu'une paroi mince est installée à l'extrémité du canal, toute augmentation du débit Q entraîne la formation d'un ressaut hydraulique. La relation entre Q et h_1 permet de calculer le nombre de Froude initial F_1 . Avec l'augmentation de F_1 , la position du ressaut se déplace vers l'aval et sa longueur augmente. À chaque valeur de F_1 correspond une longueur spécifique L_j du ressaut et une hauteur h_2 déterminée.

Plusieurs propriétés du ressaut développé par les parois minces ont été analysées, telles que : la profondeur initiale h_1 , la profondeur finale h_2 , la longueur de la zone de tourbillons L_r .

Des paramètres adimensionnels ont été utilisés selon les relations suivantes :

- F_1 : Nombre de Froude de l'écoulement.
- $Y = h_2/h_1$: Rapport entre la profondeur finale et la profondeur initiale.
- $S = s/h_1$: Rapport entre la hauteur de la paroi mince et la profondeur initiale.

Ces paramètres aident à comprendre le comportement du ressaut hydraulique causé par la présence de parois minces à l'intérieur d'un canal rectangulaire de section composée avec lit mineur et lit majeur rugueux, et contribuent également à l'analyse de l'impact de la rugosité sur les caractéristiques de l'écoulement.

Conclusion

Cette étude fournit une description détaillée du dispositif expérimental et des méthodes de mesure utilisées pour l'analyse du ressaut hydraulique à l'intérieur d'un canal rectangulaire composé. Il est précisé :

- Spécifications du canal expérimental : Un canal de 10 m de longueur et de 0,5 m de profondeur avec des parois transparentes pour la surveillance de l'écoulement, équipé d'une section expérimentale de 4 m de longueur.
- Systèmes de pompage d'écoulement : Utilisation d'une pompe centrifuge pour pomper l'eau et générer un ressaut hydraulique, avec la possibilité d'ajuster le débit en contrôlant les vannes de pompage.
- Outils de mesure : Comprennent un débitmètre, un déversoir rectangulaire pour mesurer le débit et une jauge limnimétrique pour surveiller le niveau d'eau avant et après le ressaut.
- Procédures de réglage du canal : Un système d'ajustement de la pente permet d'étudier l'effet de l'inclinaison sur l'écoulement, en plus de réservoirs de collecte assurant un pompage continu.
- Préparation de surfaces rugueuses : Développement de différents types de surfaces rugueuses spécifiques à l'aide d'adhésifs, appliquées à l'intérieur du canal pour étudier leur impact sur l'écoulement.

Chapitre II : Étude semi-théorique du ressaut hydraulique sur lits rugueux

Introduction

Ce chapitre étudie les effets de la rugosité imposée aux lits sur les caractéristiques du ressaut hydraulique dans des canaux rectangulaires composés. Une approche sans dimension semi-théorique de l'analyse des ressauts hydrauliques a été développée, intégrant des paramètres clés tels que le nombre de Froude, le coefficient de résistance, le rapport d'élargissement, le facteur de forme et le rapport de profondeur conjugué. Cette approche, basée sur l'application de la théorie d'Euler entre deux sections du ressaut hydraulique, permet de prédire le rapport de profondeur conjugué à partir du débit et des valeurs de rugosité absolue testées. La validation expérimentale confirme la précision de ce modèle dans l'estimation du rapport de profondeur conjugué sous différentes rugosités testées.

II.1 Analyse Théorique

Cette section vise à établir une relation théorique régissant la transition de l'écoulement d'un régime torrentiel (supercritique) à un régime fluvial (sub-critique) dans un canal rectangulaire composé rugueux en utilisant la théorie d'Euler. La fonction adimensionnelle à développer s'exprime par $f(Y, Fr, Cr, \beta, \tau) = 0$, où : Y représente le rapport des profondeurs d'écoulement (h_2/h_1), Fr est le nombre de Froude amont, $\tau = h_1/h$ désigne le rapport de forme, $\beta = b/B$ est le rapport d'élargissement du canal, et Cr est le paramètre de résistance prenant en compte les effets de rugosité.

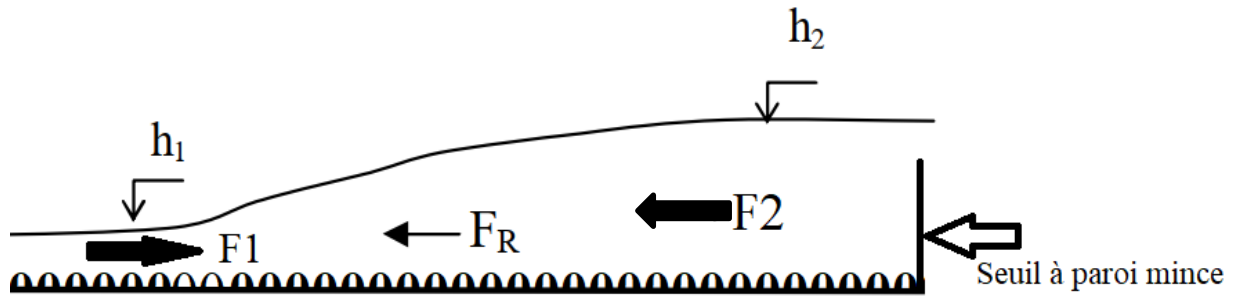


Figure II.1 : Représentation schématique d'un ressaut hydraulique contrôlé par un seuil à paroi mince.

L'équilibre des quantités de mouvement entre les sections initiale (amont) et finale (aval) du ressaut hydraulique s'écrit :

$$\rho Q (V_2 - V_1) = F_1 - F_2 - F_r \quad (\text{II.1})$$

Où F_1 et F_2 sont les forces hydrostatiques aux sections amont et aval, et F_r est la force de frottement due à la rugosité.

L'équation de la quantité de mouvement peut être décrite comme suit :

$$\rho Q^2 \left(\frac{1}{A_2} - \frac{1}{A_1} \right) = f_1 - f_2 - f_r \quad (\text{II.2})$$

Les sections initiale et finale sont : $A_1 = bh_1$ et $A_2 = B(h_2 - h) + bh$

Les forces vectorielles F_1 et F_2 sont respectivement définies comme suit :

$$F_1 = \bar{\omega} \left(\frac{h_1}{2} \right) bh_1 \quad (\text{II.3})$$

$$F_2 = \bar{\omega} (h_2 - h/2) bh + \bar{\omega} [(h_2 - h)/2] B(h_2 - h) \quad (\text{II.4})$$

La force de résistance dû à la rugosité est exprimée comme suit :

$$F_R = C \rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) P \quad (\text{II.5})$$

g : Représente l'accélération gravitationnelle, (m/s²).

L_j : La longueur du ressaut hydraulique (m).

C : correspond au coefficient lié à la rugosité du canal.

P : Le périmètre mouillé rugueux du canal ($p = B$) (m).

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

Q : Le débit spécifique (m³/s).

En substituant les expressions des surfaces et des forces, l'équation (II.6) peut s'écrire de la manière suivante :

$$\begin{aligned} & \rho Q^2 \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh} \right) \\ &= -\bar{\omega} \left(\frac{h_1}{2} \right) bh_1 + \bar{\omega} \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) bh + \bar{\omega} \left[\frac{(h_2 - h)}{2} \right] B(h_2 - h) \\ &+ C\rho g L_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) (B) \quad (\text{II. 6}) \end{aligned}$$

En multipliant les deux côtés de l'équation (II.6) par $(1/\omega)$, nous obtenons le résultat suivant :

$$\begin{aligned} & \frac{Q^2}{g} \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh} \right) \\ &= -\left(\frac{h_1}{2} \right) bh_1 + \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) bh + \left[\frac{(h_2 - h)}{2} \right] B(h_2 - h) \\ &+ CL_j \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) (B) \quad (\text{II. 7}) \end{aligned}$$

Les deux membres de l'équation (II.7) sont multipliés par $(1/bh_1^2)$ on obtient ce qui suit :

$$\begin{aligned} \frac{Q^2}{bgh_1^2} \left(\frac{1}{bh_1} - \frac{1}{B(h_2 - h) + bh} \right) \\ = - \left(\frac{h_1}{2} \right) \frac{bh_1}{bh_1^2} + \left(h_2 - \frac{h}{2} \right) \frac{bh}{bh_1^2} + \left[\frac{(h_2 - h)}{2} \right] B(h_2 - h) \frac{1}{bh_1^2} \\ + CLj \left(\frac{V_1^2}{2g} \right) (B) \frac{1}{bh_1^2} \quad (\text{II. 8}) \end{aligned}$$

$$\text{Où : } F_1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 h_1^3 g}} \text{ et } \beta = \frac{b}{B} \text{ et } Y = \frac{h_2}{h_1} \text{ et } \tau = h_1 / h, C_r = \frac{L_j C}{h_1}$$

En substituant les expressions, l'équation (II.9) peut s'écrire de la manière suivante :

$$\begin{aligned} 2F_1^2 \left(1 - \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \right) \\ = -1 + \left(\frac{2Y}{\tau} - \frac{1}{\tau^2} \right) + \left[\frac{\tau^2 Y^2}{\beta \tau^2} - \frac{2Y\tau}{\beta \tau^2} + \frac{1}{\beta \tau^2} \right] + 2CLj \left(\frac{Q^2}{2gb^2 h_1^2} \right) (B) \frac{1}{bh_1^2} \quad (\text{II. 9}) \end{aligned}$$

On a :

$$\frac{\left(2Y - \frac{1}{\tau} \right)}{\tau} + \frac{\left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2}{\beta} = \left(\frac{2Y}{\tau} - \frac{1}{\tau^2} \right) + \left[\frac{\tau^2 Y^2}{\beta \tau^2} - \frac{2Y\tau}{\beta \tau^2} + \frac{1}{\beta \tau^2} \right] \quad (\text{II. 10})$$

Si nous substituons l'équation (II.9) à l'équation (II.10), nous obtenons l'équation suivante

:

$$F_1^2 \left(1 - \frac{C_r}{\beta} \right) = \frac{-1 + \frac{\left(2Y - \frac{1}{\tau} \right)}{\tau} + \frac{\left(Y - \frac{1}{\tau} \right)^2}{\beta}}{2} + \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \quad (\text{II. 11})$$

La relation établie est semi-théorique car le coefficient de résistance, C_r , ne peut être déterminé que par des mesures expérimentales. Si C_r est égal à zéro, cela correspond à l'approche décrite par Khattaoui et Achour (2012) :

$$F_1^2 \left(-1 + \frac{\beta}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \right) = \frac{1 - \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} - \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta}}{2} \quad (\text{II.12})$$

II.2 Protocol d'étude expérimentale

Cette section évalue le coefficient de frottement C_r par des expériences en laboratoire. L'étude vise à comprendre comment C_r varie en fonction du nombre de Froude (Fr) et de la rugosité de surface ε . La relation semi-théorique (12), initialement introduite, est ici testée expérimentalement. Cette relation est donnée par l'équation (12) :

$$F_1^2 \left(1 - \frac{C_r}{\beta} \right) = \frac{-1 + \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} + \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta}}{2} + \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \quad (\text{II.12})$$

Cette équation décrit la relation entre C_r , le nombre de Froude (Fr) et les paramètres adimensionnels β , γ et τ . Pour faciliter l'analyse expérimentale, nous définissons l'expression $f(Y)$ comme suit :

$$f(Y) = F_1^2 \left(1 - \frac{C_r}{\beta} \right) \quad (\text{II.13})$$

On substitue cette équation (II.13) avec la relation (II.14), on obtient :

$$f(Y) = \frac{-1 + \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} + \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta}}{2} + \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \quad (\text{II.14})$$

La variation de $f(Y)$ avec F_1^2 est analysée en fonction de quatre valeurs de rugosité : $\varepsilon = 06 \text{ mm}$, $\varepsilon = 08 \text{ mm}$, $\varepsilon = 10 \text{ mm}$ et $\varepsilon = 12 \text{ mm}$. Ces valeurs représentent différents tapis rugueux des lits, qui affectent le coefficient de frottement C_r .

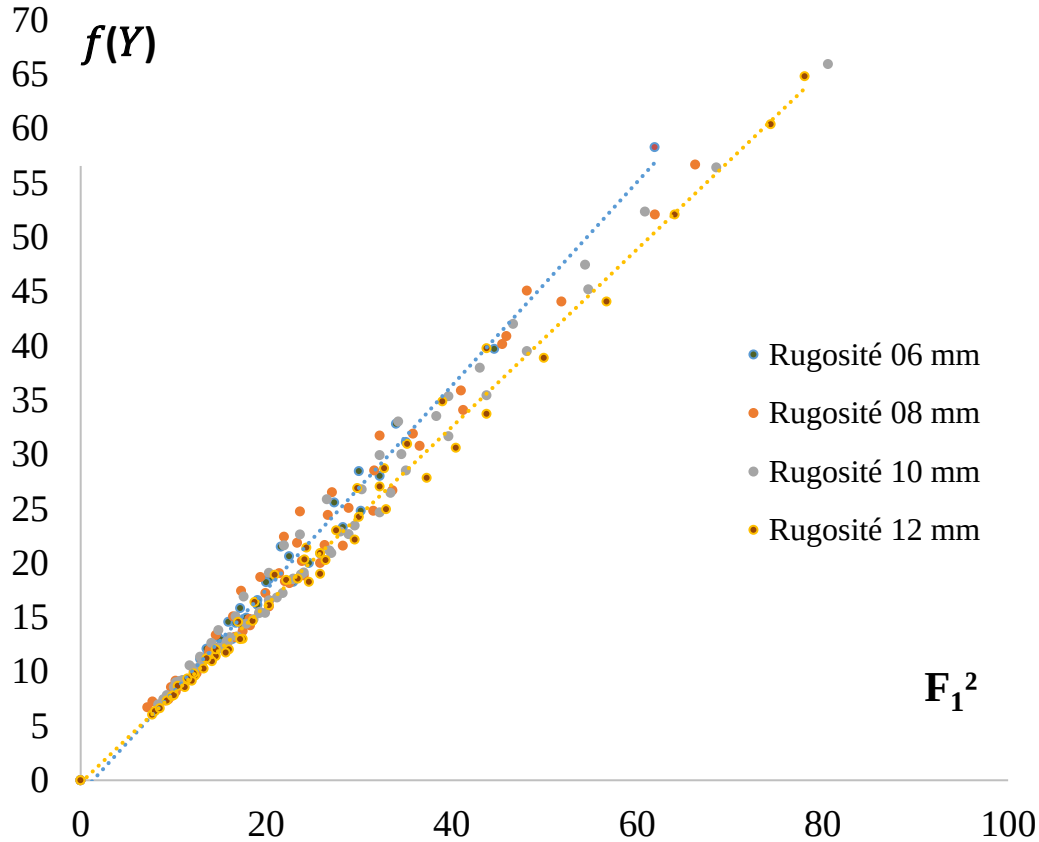


Figure II.2 : Variation de l'expression $f(Y)$ en fonction de F_1^2 pour différentes valeurs de rugosité des lits.

Cette figure illustre quatre allures distinctes, chacun correspondant à une rugosité fixe. Une analyse détaillée des données expérimentales obtenues à partir des allures obtenues concernant ce ressaut hydraulique montre que la distribution des points de données pour diverses allures peut être représentée avec précision par une relation linéaire. Cette relation est décrite mathématiquement par l'équation suivante :

$$F_1^2 T = \frac{-1 + \frac{(2Y - \frac{1}{\tau}) + (Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta}}{2} + \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \quad (\text{II.15})$$

Dans cette équation, le paramètre « T » est défini comme le facteur $(1 - \frac{C_r}{\beta})$.

Un résumé des coefficients C_r dans le tableau 2.1.

Tableau II.1 : Les valeurs du C_r

Rugosité (mm)	Rugosité relative (ε/B)	Paramètre (C_r)	R^2
6	0.024	0,0688	0.9835
8	0.032	0,0792	0.9804
10	0.04	0,0924	0.9886
12	0.048	0,1095	0.9892
0 (lisse)	0	0	1

D'après les données présentées dans le tableau ci-dessus, on peut déduire que le paramètre C_r augmente avec la rugosité relative (ε/B). Une analyse de corrélation statistique des valeurs appariées (ε/B , C_r) produit une relation linéaire. Exprimée par l'équation suivante : $C_r = 0.4166 (\varepsilon/B)$. Cette dépendance linéaire est illustrée graphiquement à la figure 3. Qui fournit une représentation claire de la variation du paramètre C_r en fonction de la rugosité relative (ε/B).

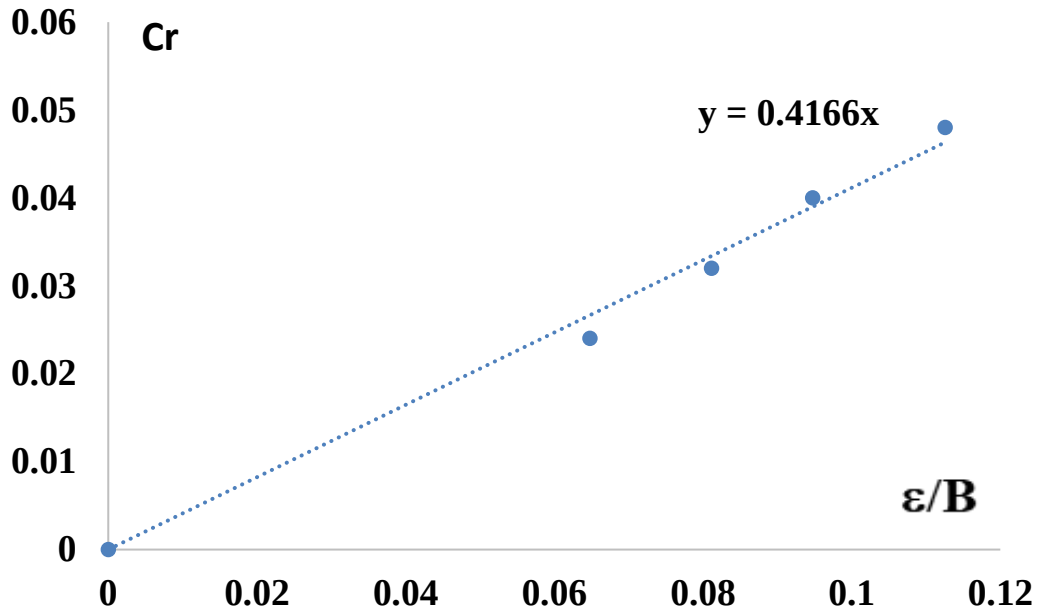


Figure II.3 : Variation de Cr en fonction de ϵ/B .

En substituant l'expression de Cr dans l'équation (II.16), l'équation semi-théorique se transforme comme suit :

$$F_1^2 \left(1 - \frac{0.4166 \left(\frac{\epsilon}{B} \right)}{\beta} \right) = \frac{-1 + \frac{(2Y - \frac{1}{\tau})}{\tau} + \frac{(Y - \frac{1}{\tau})^2}{\beta}}{2} + \frac{\beta F_1^2}{Y - \frac{(1-\beta)}{\tau}} \quad (\text{II.16})$$

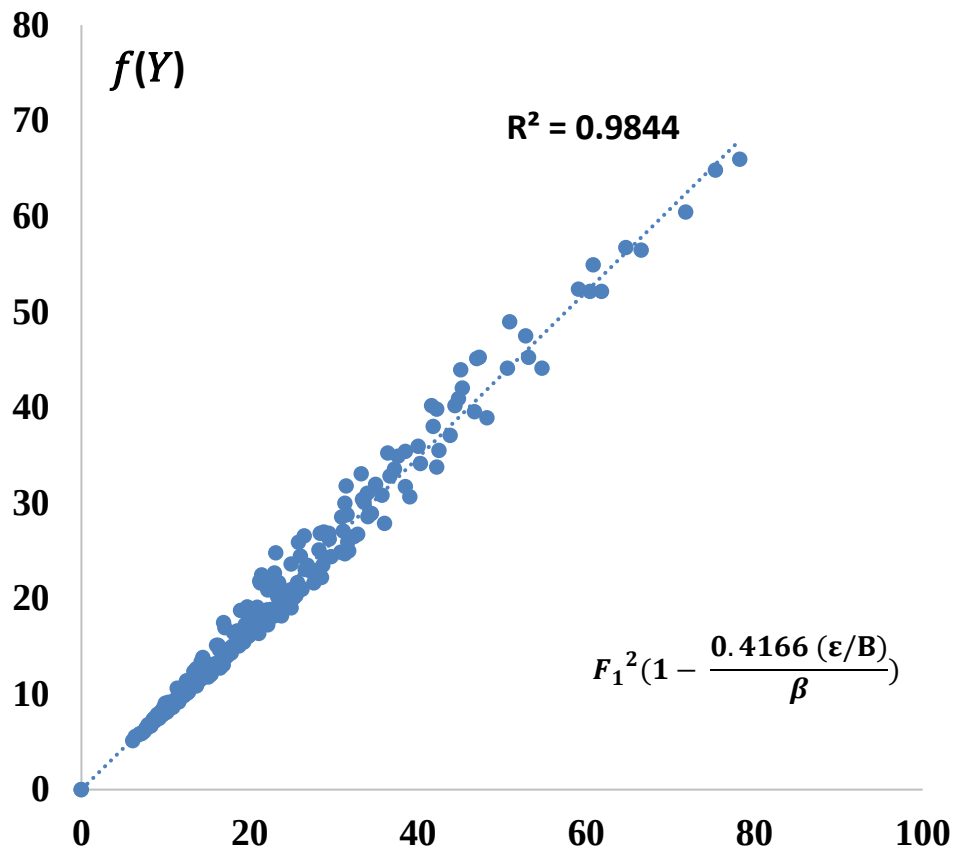


Figure II.4 : Variation de $f(Y)$ par rapport à $F_1^2(1 - \frac{0.4166(\epsilon/B)}{\beta})$.

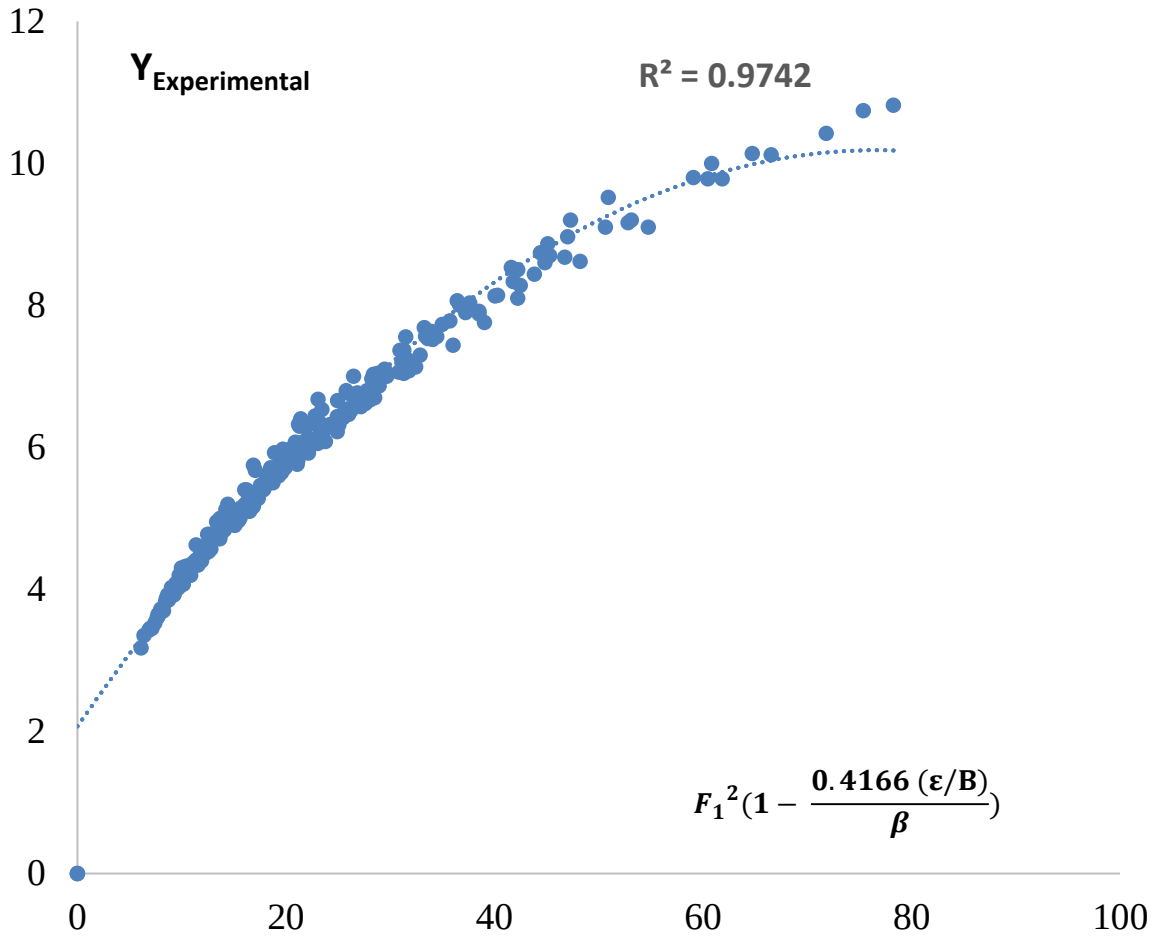


Figure II.5 : Variation de Y expérimental par rapport à $F_1^2(1 - \frac{0.4166 (\epsilon/B)}{\beta})$.

Une formule de fonction générale $Y = aF_1^m(1 - \frac{0.4166 (\epsilon/B)}{\beta})^n$ est proposée. Les coefficients inconnus (a, m, n) ont ensuite été déterminés par régression non linéaire à l'aide de mesures expérimentales. La méthode des moindres carrés a été utilisée pour optimiser ces coefficients. Ce qui a donné l'équation finale :

$$Y = 1.329F_1^{0.986}(1 - \frac{0.4166 (\epsilon/B)}{\beta})^{1.430} \quad (\text{II.17})$$

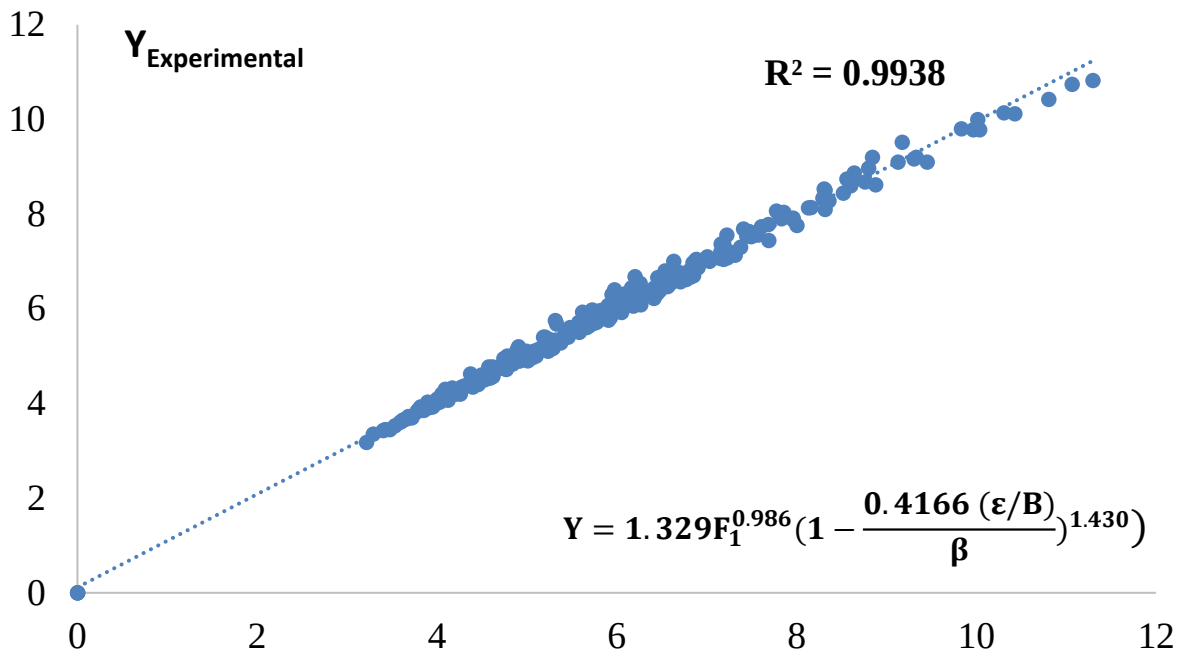


Figure II.6 : Comparaison entre Y_{exp} avec l'approche semi théorique.

La figure II.6 présente un graphique illustrant la relation entre les valeurs expérimentales ($Y_{\text{expérimental}}$) et un modèle mathématique basé sur une équation empirique. Les points de données s'alignent étroitement sur la courbe de tendance, indiquant une forte corrélation entre les valeurs issues de l'approche semi théorique avec celles expérimentales.

Le Tableau II.2, présenté en annexe, expose les erreurs relatives entre les résultats issus de l'équation semi-théorique (II.17) et les données expérimentales. L'analyse de ce tableau montre que la majorité des erreurs relatives restent inférieures à 5 %, confirmant ainsi la fiabilité de la méthode utilisée et la cohérence des mesures expérimentales réalisées au laboratoire.

Conclusion

Cette étude démontre que la rugosité des lits influence significativement les caractéristiques du ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires composés. Les résultats expérimentaux montrent qu'une rugosité croissante réduit le rapport de profondeur conjuguées, suivant la tendance empirique suivante : $Y = 1.329F_r^{0.986} \left(1 - \frac{0.4166 \left(\frac{\varepsilon}{B} \right)}{\beta} \right)^{1.430}$, montrant que le rapport de profondeur conjuguée (Y) diminue à mesure que la rugosité augmente.

Un modèle adimensionnel semi-théorique a été développé à partir des équations d'Euler appliquées entre deux sections du ressaut hydraulique bien développé. Il intègre des paramètres hydrauliques très importants, notamment le nombre de Froude incident, le coefficient de résistance C_r , le rapport d'élargissement et la rugosité absolue, permettant une prédiction précise du rapport de profondeur conjugué. La validation expérimentale de l'approche semi théorique obtenue confirme que le modèle ajusté est de manière fiable et que les effets des variations de rugosité sur le comportement du ressaut hydraulique est perceptible. Les résultats obtenus au laboratoire fournissent une approche pratique pour optimiser et dimensionner les structures hydrauliques, notamment dans les systèmes de dissipation d'énergie.

Chapitre III: Etude expérimentale

Introduction

Ce chapitre se concentre sur l'étude des caractéristiques de l'écoulement hydraulique dans les canaux rectangulaire composé avec lits rugueux, en mettant l'accent sur l'influence des variations du nombre de Froude (Fr) et de la rugosité relative testée sur les paramètres d'écoulement. Grâce à des expériences en laboratoire, les relations entre les rapports de longueur (L_j/h_1 et L_r/h_1), le rapport de profondeur ($Y = h_2/h_1$), le rapport de seuil (S/h_1) et le rendement de dissipation (η) ont été analysées, avec développement de relations empiriques adimensionnelles. Ce chapitre propose une analyse approfondie de l'impact de la rugosité sur le comportement de l'écoulement, en intégrant des comparaisons entre résultats expérimentaux et théoriques. Il présente également une application pratique des relations établies pour calculer les caractéristiques de l'écoulement d'ordre pratique.

III.1 Analyse des propriétés de l'écoulement hydraulique

III.1.1 Analyse de la variation du rapport L_j/h_1 avec le nombre de Froude F_1

Les figures III.1 et III. 2 montre une corrélation linéaire significative entre le rapport L_j/h_1 et le nombre de Froude F_1 . Il ressort de ces analyses que la longueur du ressaut hydraulique (L_j/h_1) croît de manière proportionnelle en fonction de l'augmentation du nombre de Froude, tandis qu'une élévation de la rugosité des lits provoque une diminution notable de cette longueur. Cette constatation souligne l'influence de la rugosité sur l'accélération du processus de dissipation énergétique et, par conséquent, sur la réduction de la longueur du ressaut.

Plus spécifiquement, la figure III.1 illustre ces résultats pour la couche inférieure ($0 < h_2 < 15,5 \text{ cm}$), tandis que la figure III.2 se rapporte à la couche supérieure ($15,5 < h_2 < 28 \text{ cm}$).

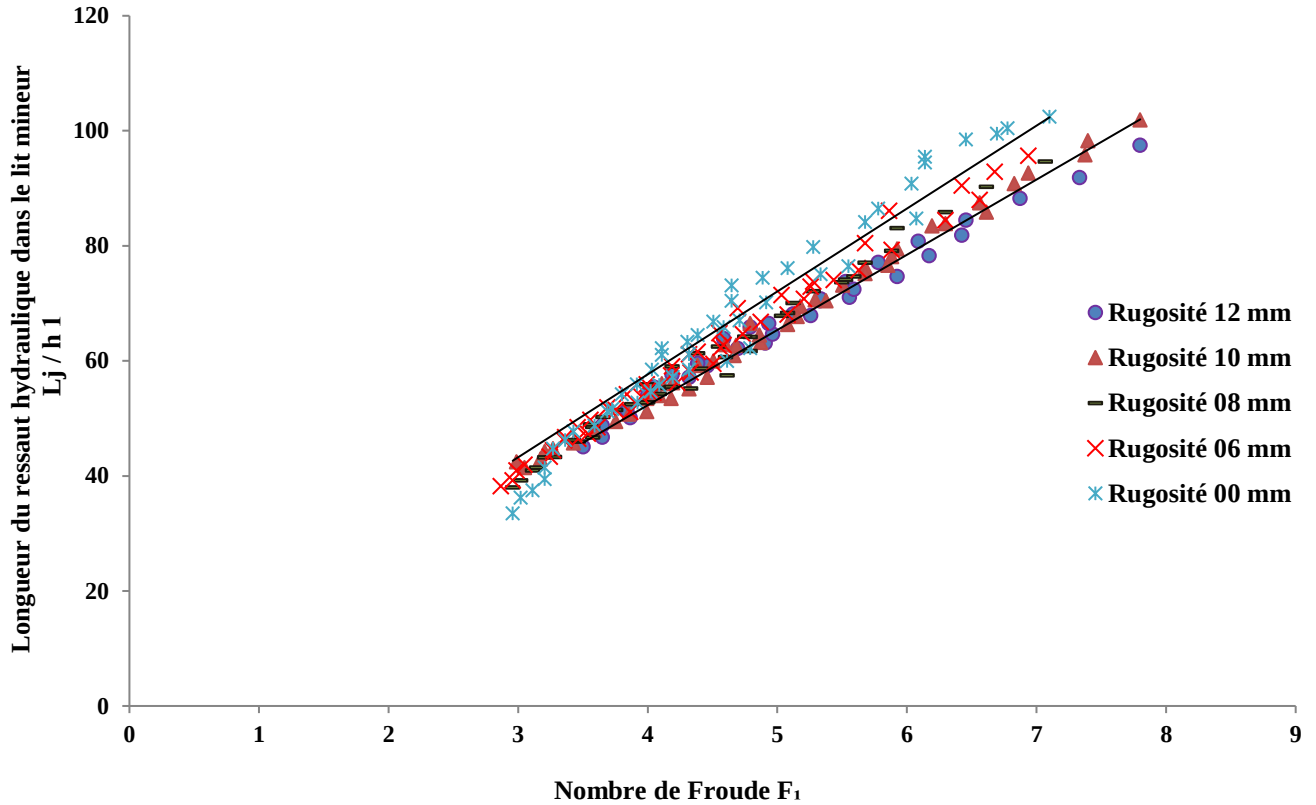


Figure III.1 : Variation de la longueur relative du ressaut hydraulique dans le lit mineur ($0 < h_2 < 15,5 \text{ cm}$) en fonction du nombre de Froude.

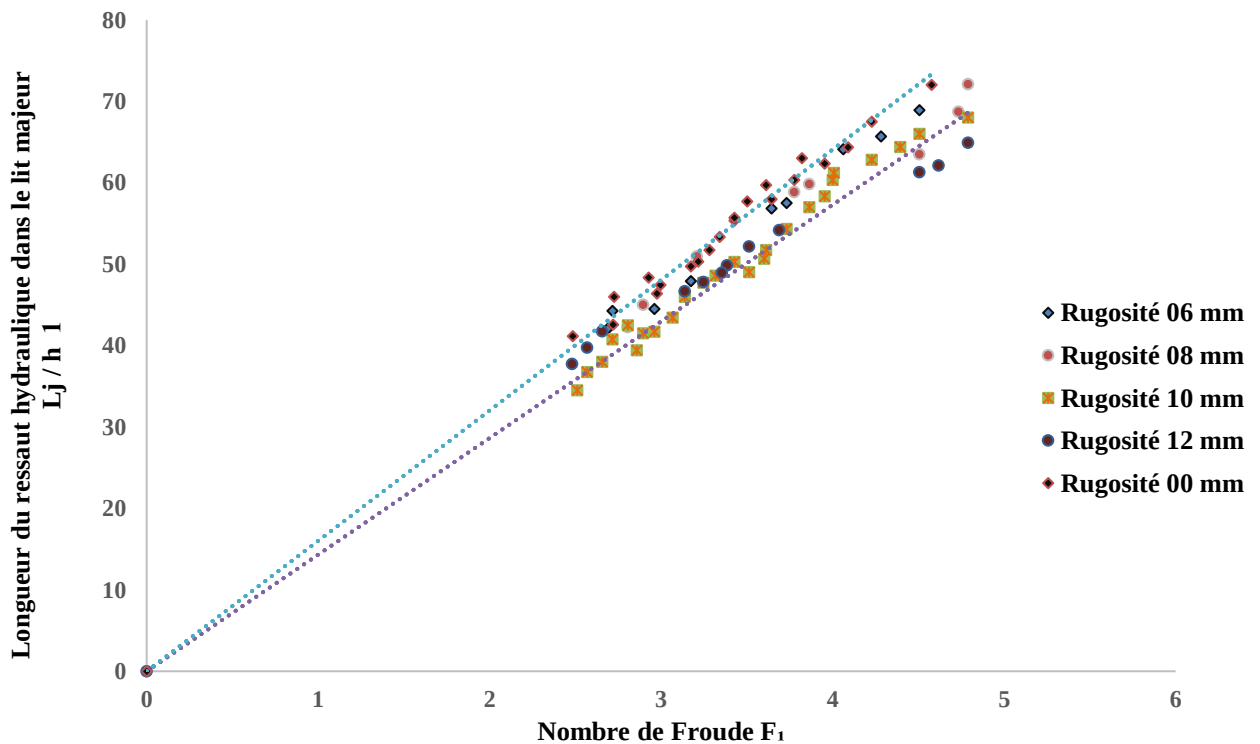


Figure III.2 : Variation de la longueur relative du ressaut hydraulique en fonction du nombre de Froude, pour le lit majeur : ($15,5 < h_2 < 28 \text{ cm}$).

Une analyse statistique approfondie des données expérimentales a été menée à l'aide de la méthode des moindres carrés non linéaires, dans le but d'examiner la variation du rapport L_j/h_1 en fonction de F_1 et de la rugosité testée. Les résultats obtenus mettent en évidence une corrélation linéaire entre L_j/h_1 et F_1 , par laquelle peut être exprimée par l'équation linéaire simplifiée suivante :

$$L_j / h_1 = a F_1 \quad (III.1)$$

Dans ce contexte, le coefficient a correspondu aux lits du canal rectangulaire composé tel que : a_1 correspond au lit mineur, tandis que a_2 s'applique au lit majeur. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau III.1.

Tableau III.1 : Rugosité relative et coefficients de régression pour les lits mineur et majeur.

Rugosité (mm)	Rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur	Rugosité relative (ε/B) dans le lit majeur	a_1	R^2	a_2	R^2
0	0	0	16.019	0.9929	17,294	0.9533
6	0.041666	0.024	15.464	0.9947	16,739	0.9877
8	0.055555	0.032	15.008	0.9907	16,44	0.9889
10	0.069444	0.04	14.548	0.9912	15,916	0.9942
12	0.083333	0.048	14.323	0.9828	15,703	0.9769

La corrélation entre les mesures de test du couple (ε/b , a_1) donne l'approche explicite suivante :

Pour le lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm) :

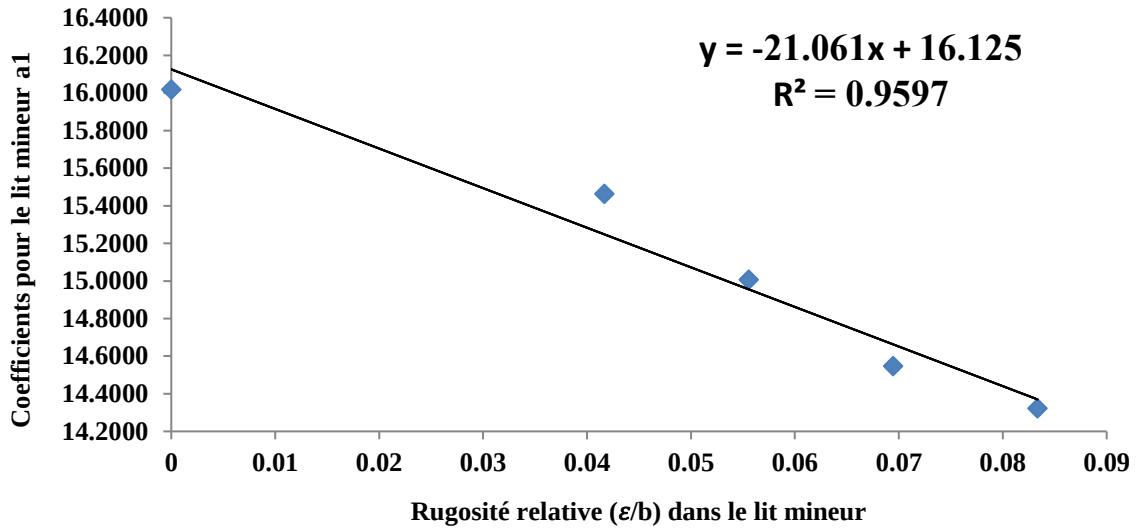


Figure III.3 : Variation du coefficient (a_1) avec la rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur.

Par conséquent, la relation générale sans dimension entre le paramètre F1 et le rapport (ε/b) pour le lit mineur s'exprime comme suit :

$$L_j / h_1 = (-21.061(\varepsilon/b) + 16.125) F_1 \quad (\text{III.2})$$

Pour le lit majeur ($15,5 < h_2 < 28 \text{ cm}$) :

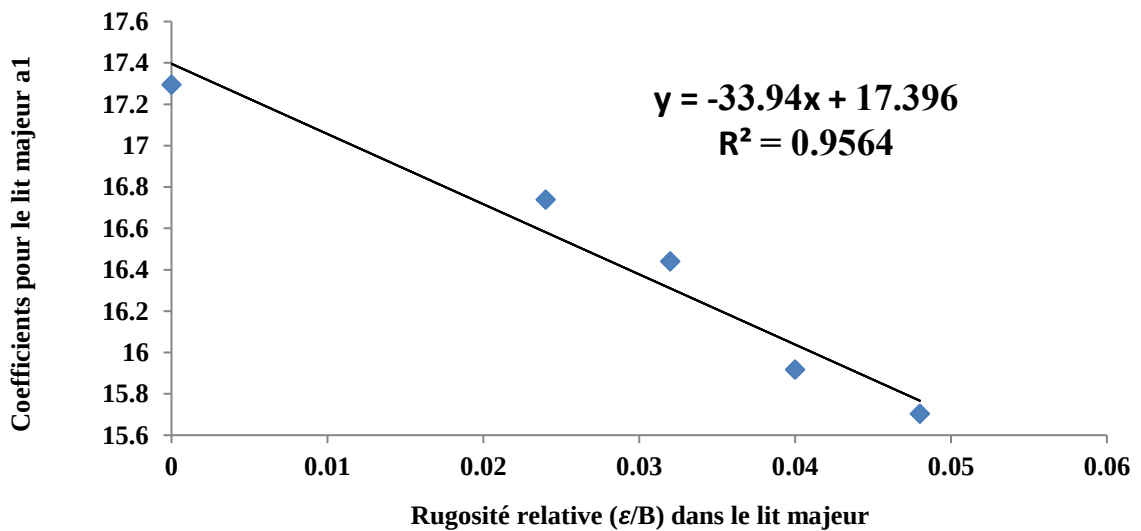


Figure III.4 : Variation du coefficient a_2 en fonction de la rugosité relative (ε/B) dans le lit majeur.

Ainsi, pour le lit majeur, la relation générale entre le nombre de Froude ($F1$) et le rapport (ε/B) s'exprime comme suit :

$$\frac{L_j}{h1} = \left(- 33.94 \left(\frac{\varepsilon}{B} \right) + 17.396 \right) F1 \quad (\text{III.3})$$

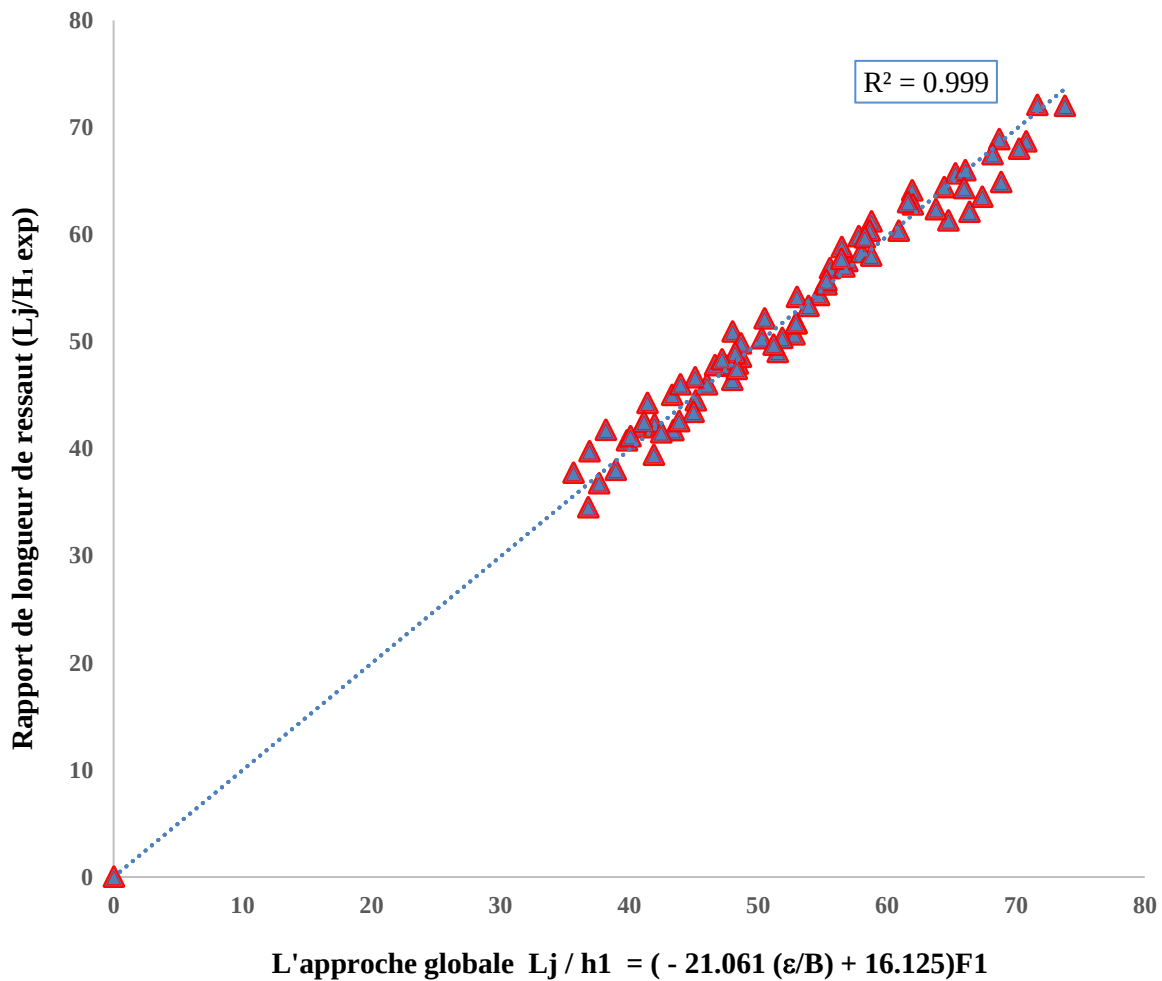


Figure III.5 : Illustration graphique de la corrélation entre les valeurs expérimentales de la longueur du ressaut (L_j/h , exp) et les valeurs issues de l'équation globales (III.2) lit mineur.

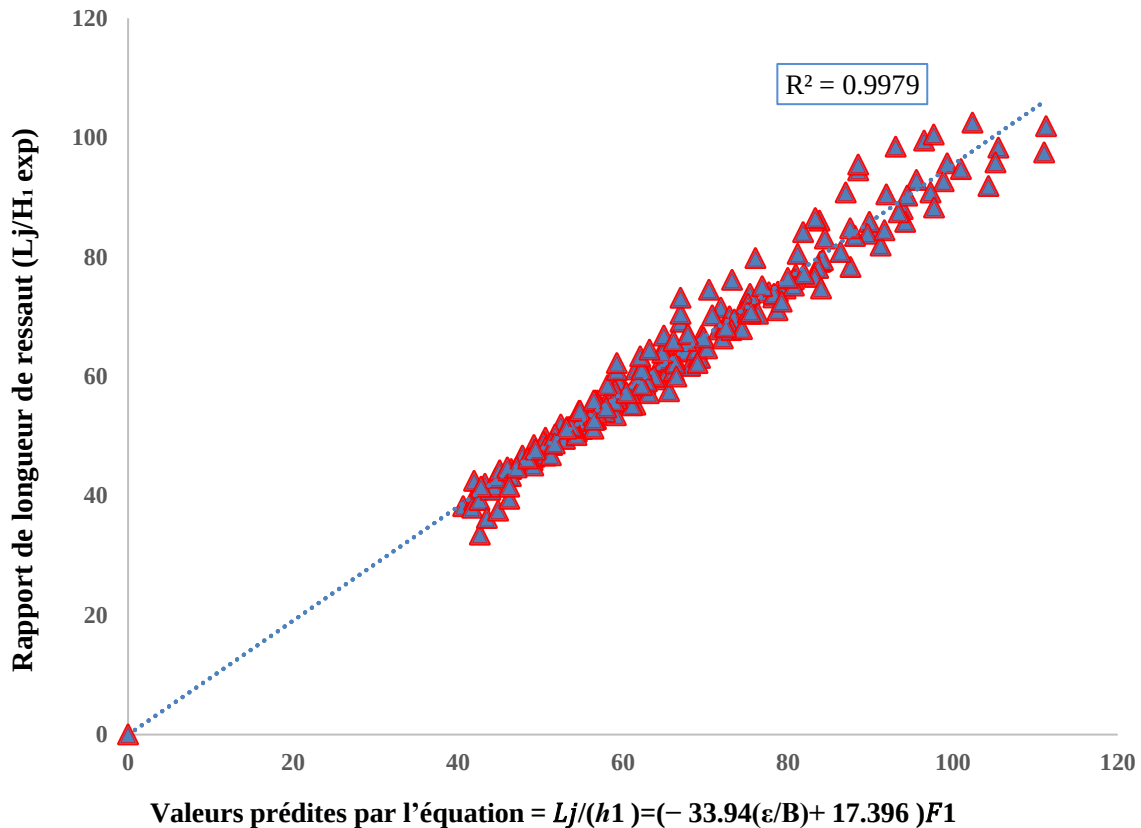


Figure III.6 : Représentation des rapports expérimentaux de la longueur du ressaut (L_j/h_1 , exp) et celles obtenues par l'équation globale 3.3 (lit majeur).

L'analyse de la figure III.7 met en évidence une disparité marquée du rapport de longueur de ressaut, L_j/h_1 , entre le lit mineur (défini par une section plus étroite, soit $0 < h_2 < 15,5$ cm) et le lit majeur (caractérisé par une section large, ($15,5 < h_2 < 28$ cm)). Dans le lit mineur, la diminution notable du rapport L_j/h_1 s'explique principalement par l'influence accrue de la rugosité relative (ε/B). Cette rugosité accentuée favorise une dissipation énergétique plus importante au cours du ressaut hydraulique développé, conduisant ainsi à une réduction notable de la longueur du ressaut, L_j .

À l'inverse, dans le lit majeur, l'incidence de la rugosité relative s'avère nettement atténuée en raison d'une aire de section transversale plus importante et d'un volume d'écoulement supérieur. Ces caractéristiques permettent une conservation énergétique plus élevée après le ressaut, ce qui se traduit par une longueur de ressaut, L_j , sensiblement plus grande.

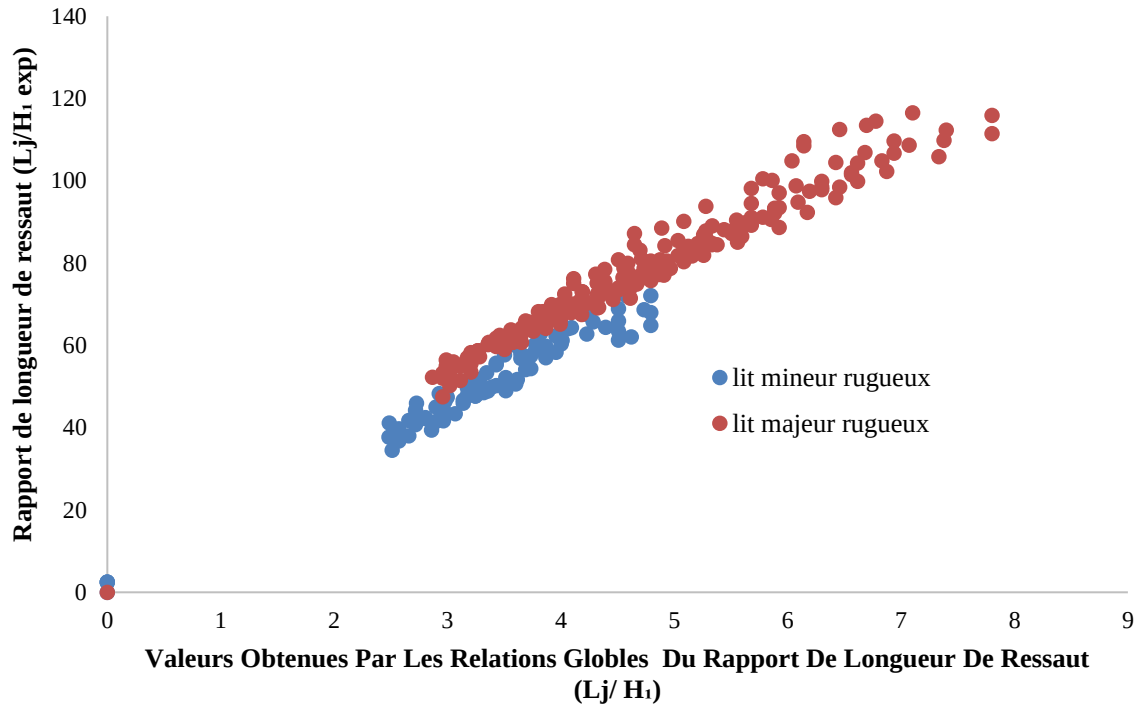


Figure III.7 : Graphique illustrant la corrélation entre les rapports expérimentaux de longueur de ressaut (L_j/h_1 exp) et les valeurs obtenues par les équations globales pour les lits majeur et mineur.

Les Tableaux III.2 et III.3, présentés en annexe, exposent les écarts relatifs entre les longueurs normalisées du ressaut hydraulique (L_j/h_1) issues des mesures expérimentales et celles prédites par l'équation d'ajustement, respectivement pour le lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm) et le lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm). Pour le lit mineur, les erreurs relatives demeurent généralement inférieures à 5 %, ce qui témoigne de la précision et de la fiabilité du modèle proposé dans cette plage de variation. De même, les résultats obtenus pour le lit majeur confirment la capacité du modèle à fournir des estimations fiables et cohérentes sur l'ensemble des conditions hydrauliques étudiées.

III.1.2 Analyse de la variation du rapport (L_r/h_1) selon le nombre de Froude F_1

Les figures III.8 et III.9 illustrent la variation de la longueur du rouleau de surface L_r/h_1 en fonction du nombre de Froude amont F_1 , pour cinq valeurs de rugosité relatives ε/b ; ($\varepsilon = 0, 6, 8, 10, 12$ mm), appliquées respectivement au lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm), figure III.8) et au lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm, figure III. 9). On observe des regroupements distincts des points expérimentaux correspondant à chaque valeur de rugosité testée. Les résultats posent en évidence qu'à nombre de Froude donné, l'augmentation de la rugosité imposée du lit conduit systématiquement à une diminution

de la longueur du rouleau. Ces observations confirment le rôle prépondérant de la rugosité du lit dans l'accroissement de la dissipation d'énergie et la réduction de la longueur du rouleau de surface du ressaut hydraulique au sein du canal composé.

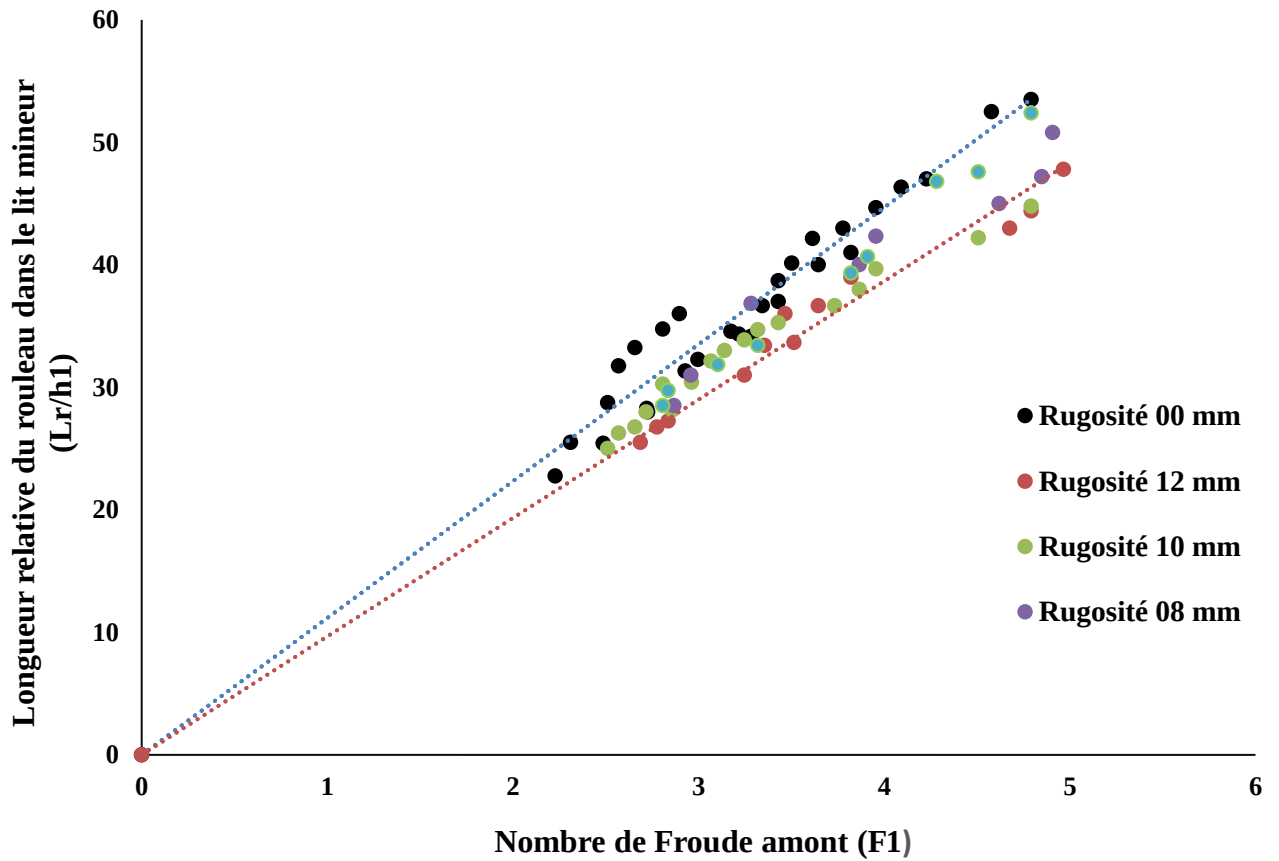


Figure III.8 : Relation entre la longueur normalisée du rouleau de surface du ressaut hydraulique (L_r/h_1) et le nombre de Froude amont (F_1) dans le lit mineur pour différentes rugosités du lit.

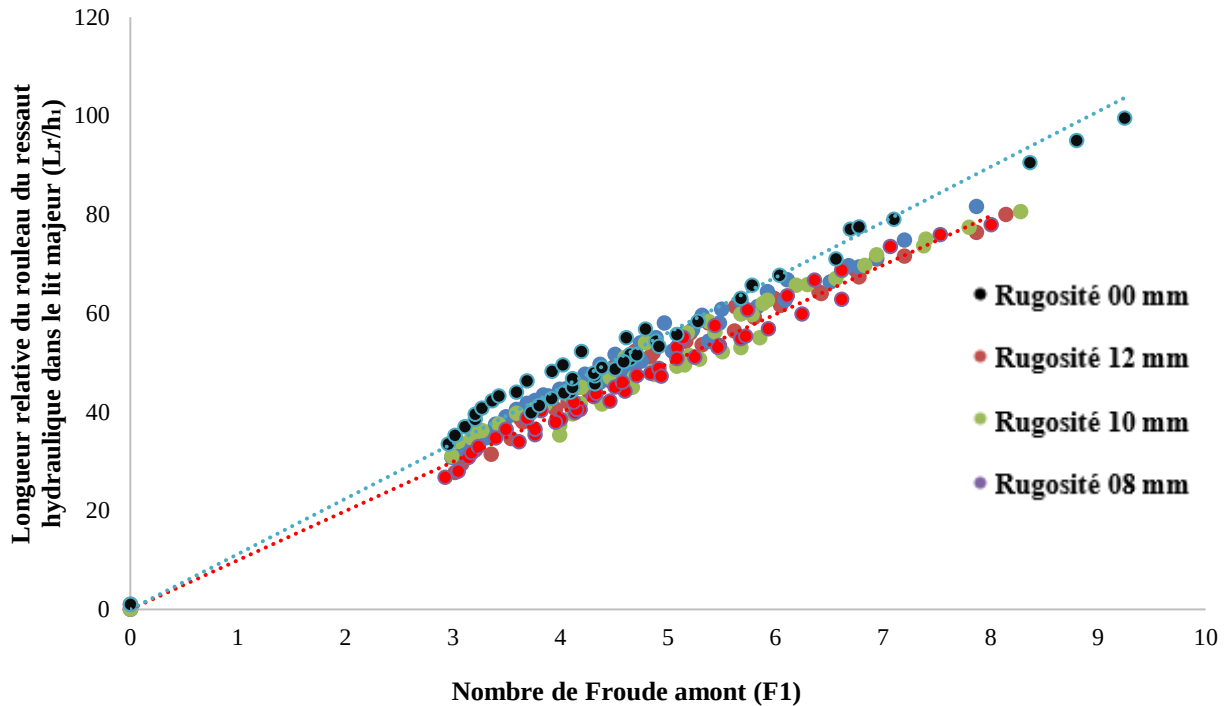


Figure III.9 : Variation de la longueur relative du rouleau de surface du ressaut hydraulique (L_r/h_1) dans le lit majeur en fonction du nombre de Froude amont (F_1) pour différentes rugosités du lit.

Une analyse statistique a été réalisée sur l'ensemble des données expérimentales à l'aide de la méthode des moindres carrés non linéaires. Les résultats obtenus montrent que, pour chaque rugosité équivalente testée, le nombre de Froude incident (F_1) présente une corrélation linéaire avec la longueur du rouleau de surface du ressaut hydraulique (L_r/h_1). Cette relation est exprimée par l'équation suivante :

$$L_r/h_1 = a (F_1) \quad (\text{III.4})$$

Le coefficient a a varié selon le type de lit : a_1 correspond au lit mineur, tandis que a_2 s'applique au lit majeur. Les valeurs associées aux coefficients a_1 et a_2 pour chaque configuration sont présentées dans le tableau III. 4.

Tableau III.4 : Coefficients de régression (a_1 , a_2) et coefficients de détermination (R^2) pour les différentes configurations remarquées aux lits mineur et majeur.

Rugosité (mm)	Rugosité relative (ϵ/b) dans le lit mineur	Rugosité relative (ϵ/B) dans le lit majeur	a_1	R^2	a_2	R^2
0	0	0	11,172	0,9977	12,167	0,9978
6	0.041666	0.024	10,538	0,9976	11,751	0,9985
8	0.055555	0.032	10,235	0,9974	11,303	0,9983
10	0.069444	0.04	10,008	0,9977	11,1	0,9975
12	0.083333	0.048	9,6693	0,9983	10,941	0,9985

Les résultats expérimentaux ont démontré une forte corrélation entre la rugosité relative (ϵ/b et ϵ/B) et les coefficients de régression (a_1 et a_2) dans les lits mineur et majeur. Dans le cas du lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm), le coefficient a_1 diminue linéairement avec l'augmentation de la rugosité relative (ϵ/b), selon la relation suivante :

$$L_r/h_1 = (-17.764 (\epsilon/b) + 11.213)F_1 \quad (\text{III. 5})$$

Avec un coefficient de détermination $R^2 = 0,9917$, ce qui témoigne la précision des mesures expérimentales obtenues au laboratoire.

De façon similaire, pour le lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm), le coefficient a_2 présente également une diminution linéaire avec l'augmentation de la rugosité relative (ϵ/B), conformément à la relation suivante :

$$\frac{L_r}{h_1} = \left(-26,723 \left(\frac{\epsilon}{B}\right) + 12.222\right)F_1 \quad (\text{III. 6})$$

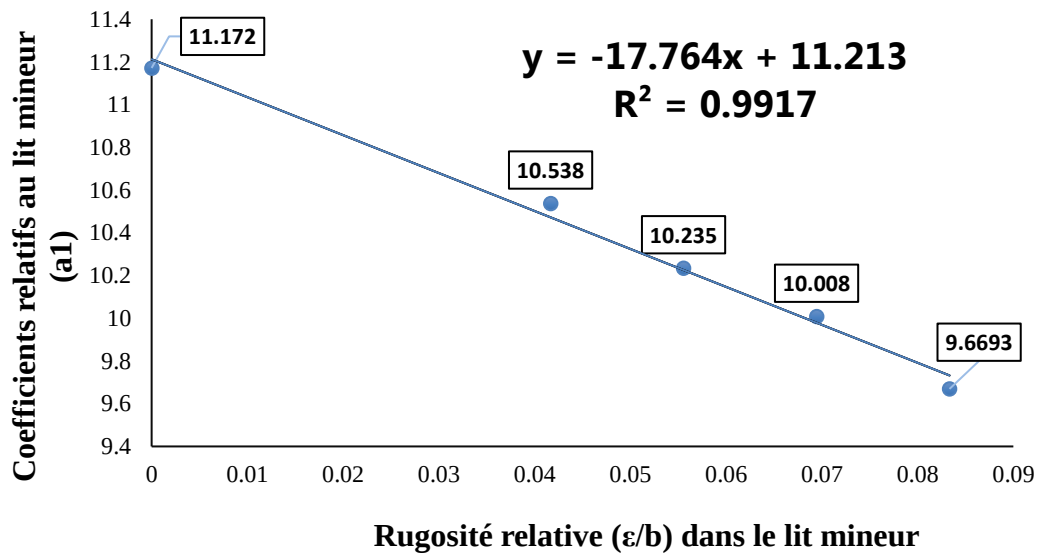


Figure III.10 : Relation linéaire entre la rugosité relative (ϵ/b) et le coefficient a_1 dans le lit mineur

Cette relation a donné à un coefficient de détermination encore plus élevé, soit $R^2 = 0,9755$, traduisant une concordance particulièrement forte entre la relation globale obtenue et les données expérimentales.

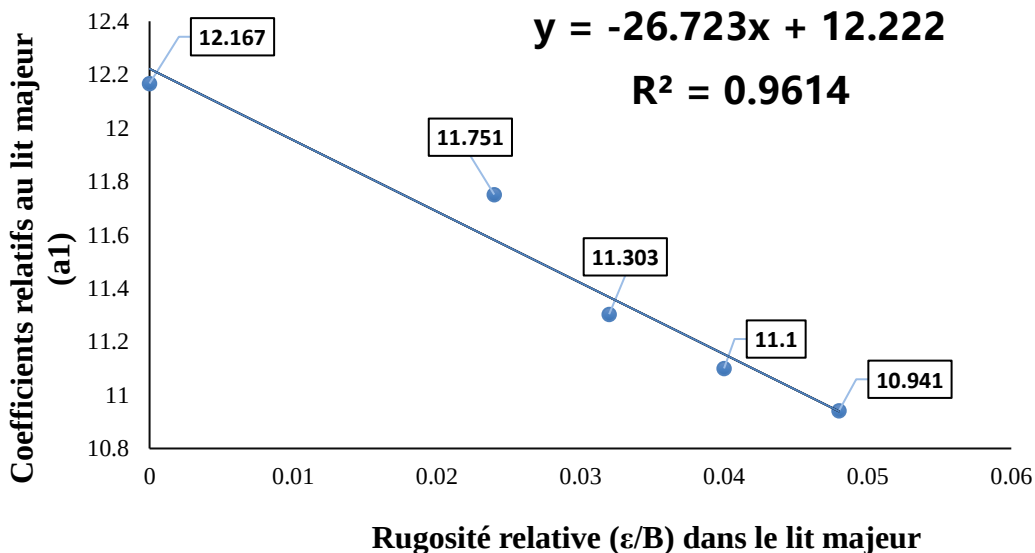


Figure III.11 : Variation du coefficient de régression a_2 en fonction de la rugosité relative (ϵ/B) pour le lit majeur.

Les figures III.12 et III.13 montrent que la relation entre la longueur relative du rouleau de surface (L_r/h_1), la rugosité relative (ϵ/b ou ϵ/B) et le nombre de Froude (F_1) présente une forte corrélation pour le lit mineur et le lit majeur. Dans les deux cas, la plupart des

points expérimentaux sont très proches de la première bissectrice, ce qui confirme la fiabilité des modèles de régression et la précision des mesures expérimentales obtenues au laboratoire. Ces observations valident également l'applicabilité ces relations adimensionnelles développée au dimensionnement des ouvrages hydrauliques.

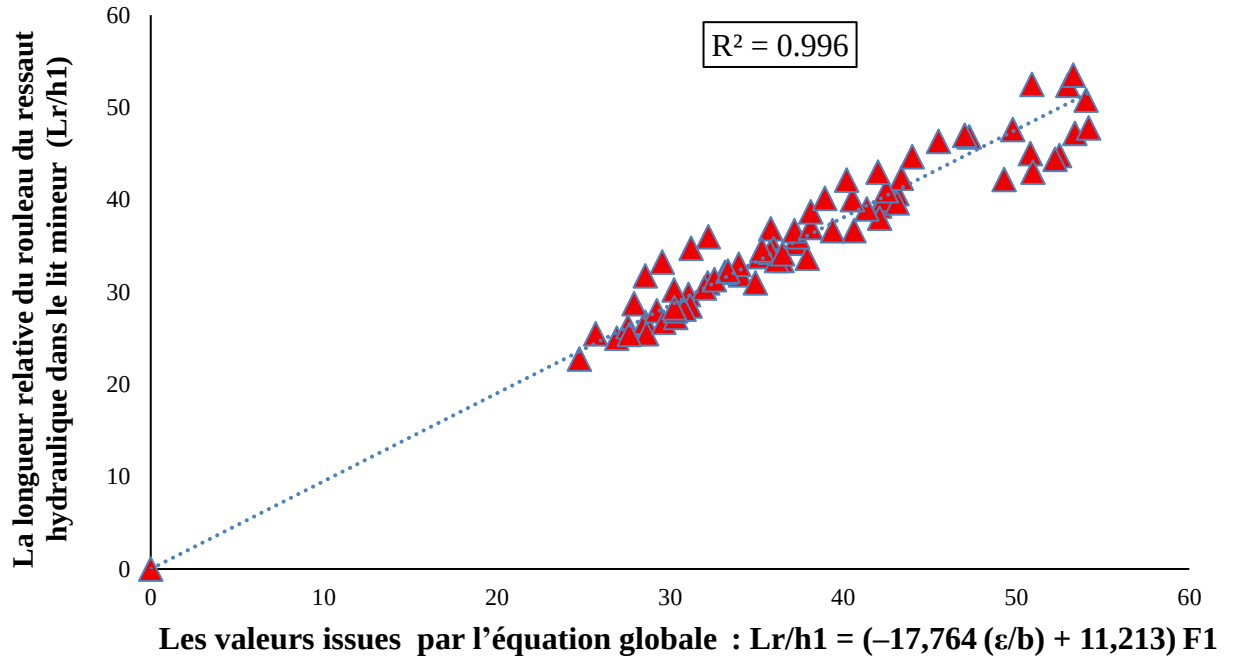


Figure III.12 : Comparaison entre les valeurs expérimentales L_r/h_1 et les valeurs issues de la relation globale obtenue

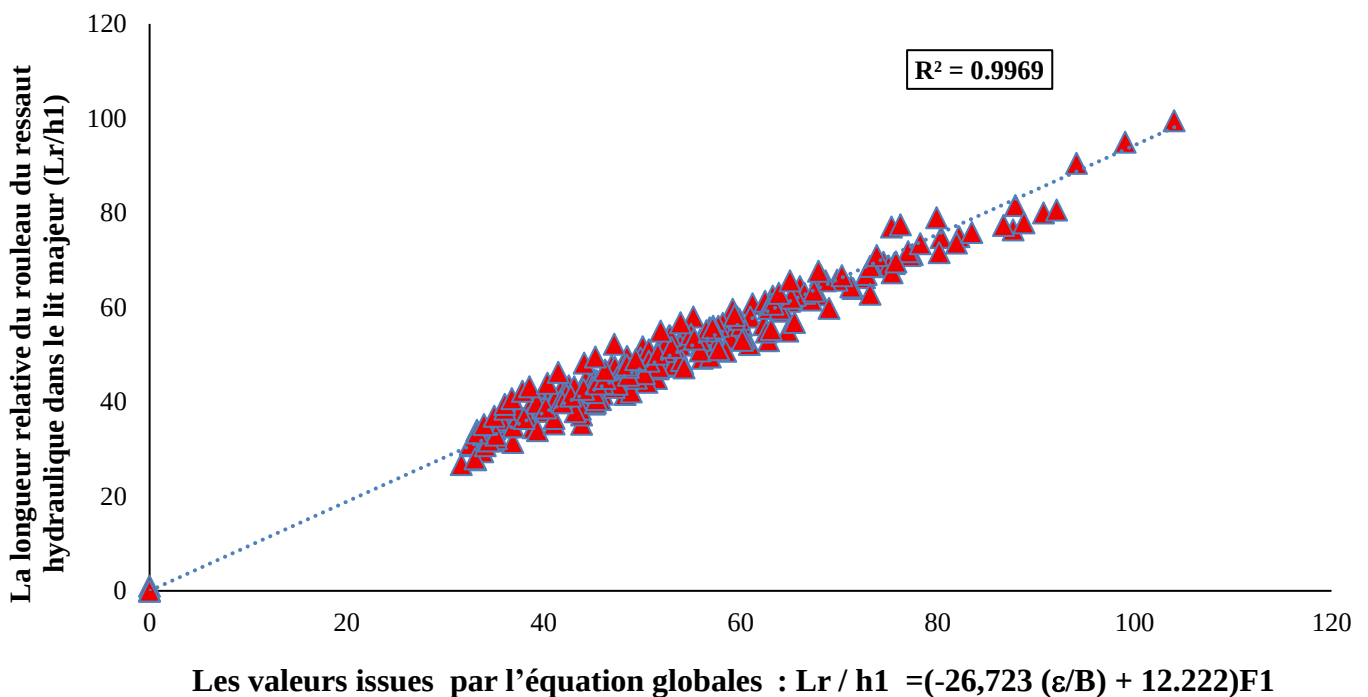


Figure III.13 : Concordance entre les données expérimentales L_r/h_1 et les valeurs issues de la relation globale pour le lit majeur.

La figure III.14 présente une analyse comparative des valeurs observées du rapport de la longueur du rouleau de surface (L_r/h_1) pour les configurations du lit mineur et celui le lit majeur. Les données mettent en évidence une distinction nette entre les deux configurations. Pour le lit majeur correspondant à la zone d'écoulement la plus profonde ($15,5 \text{ cm} < h_2 < 28 \text{ cm}$), les valeurs de L_r/h_1 sont sensiblement plus élevées, traduisant des rouleaux plus longs. Cette tendance s'explique probablement par une meilleure conservation de l'énergie, due à la moindre influence de la rugosité relative (ε/B). La section et le volume d'écoulement plus importants limitent la résistance au frottement ainsi que les pertes d'énergie. À l'inverse, le lit mineur, associé à une plage de hauteurs d'eau plus faible ($0 \text{ cm} < h_2 < 15,5 \text{ cm}$), présente systématiquement des valeurs de L_r/h_1 plus faibles, traduisant des rouleaux plus courts. Cette réduction est attribuée à une dissipation d'énergie accrue, résultant de l'influence renforcée de la rugosité relative (ε/b). Malgré ces différences, les deux ensembles de données présentent une forte corrélation linéaire, ce qui prouve la fiabilité du modèle d'essai avec lits mineur et majeur. La séparation nette des données met en outre, en évidence l'importance de la configuration du lit et de la rugosité testée imposée aux lits du canal composé dans le contrôle des dynamiques du ressaut hydraulique.

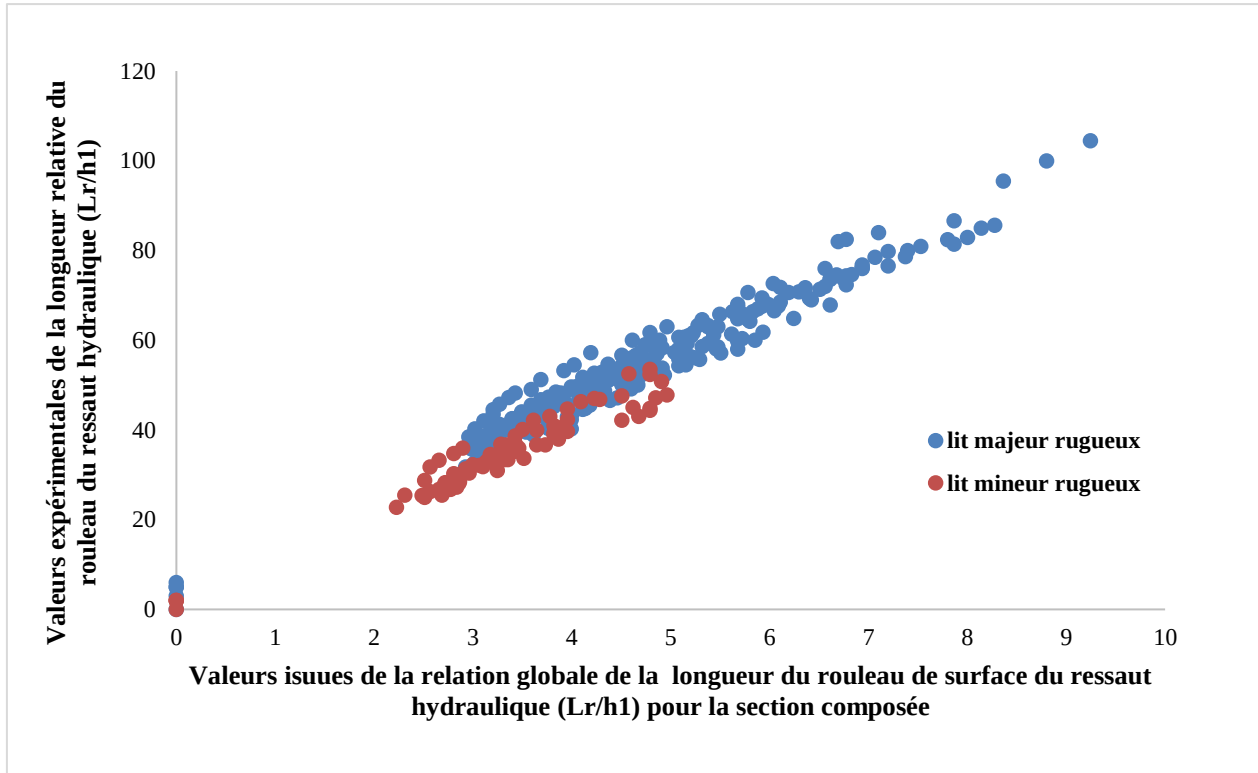


Figure III.14 : Comparaison entre les valeurs des deux relations globales obtenues (L_r/h_1) et celles expérimentales de la longueur du rouleau du ressaut hydraulique pour les lits majeur et mineur.

Les Tableaux III.5 et III.6, présentés en annexe, exposent les écarts relatifs entre les longueurs du rouleau du ressaut hydraulique (L_r/h_1), déterminées à partir des données expérimentales et celles estimées par l'équation d'ajustement, respectivement pour le lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm) et pour le lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm). Dans les deux cas, les erreurs relatives observées restent généralement inférieures à 5 %, ce qui atteste de la précision et de la fiabilité du modèle proposé.

III.1.3 Analyse de la variation du rapport Y selon le nombre de Froude F_1

Les figures III.15 et III.16 présentent l'évolution du rapport des hauteurs conjuguées (Y) en fonction du nombre de Froude (Fr) pour cinq valeurs distinctes de rugosité absolue ($\varepsilon(\text{mm}) = 0, 6, 8, 10, 12$), et ce, tant pour les lits mineurs ($0 < h_2 < 15,5$ cm) que pour le lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm). Il ressort de manière claire que l'augmentation de la rugosité provoque une diminution du rapport des hauteurs conjuguées pour un nombre de Froude donné, ce qui conduit que pour des rugosités progressives provoquent une diminution des hauteurs de ressaut hydraulique.

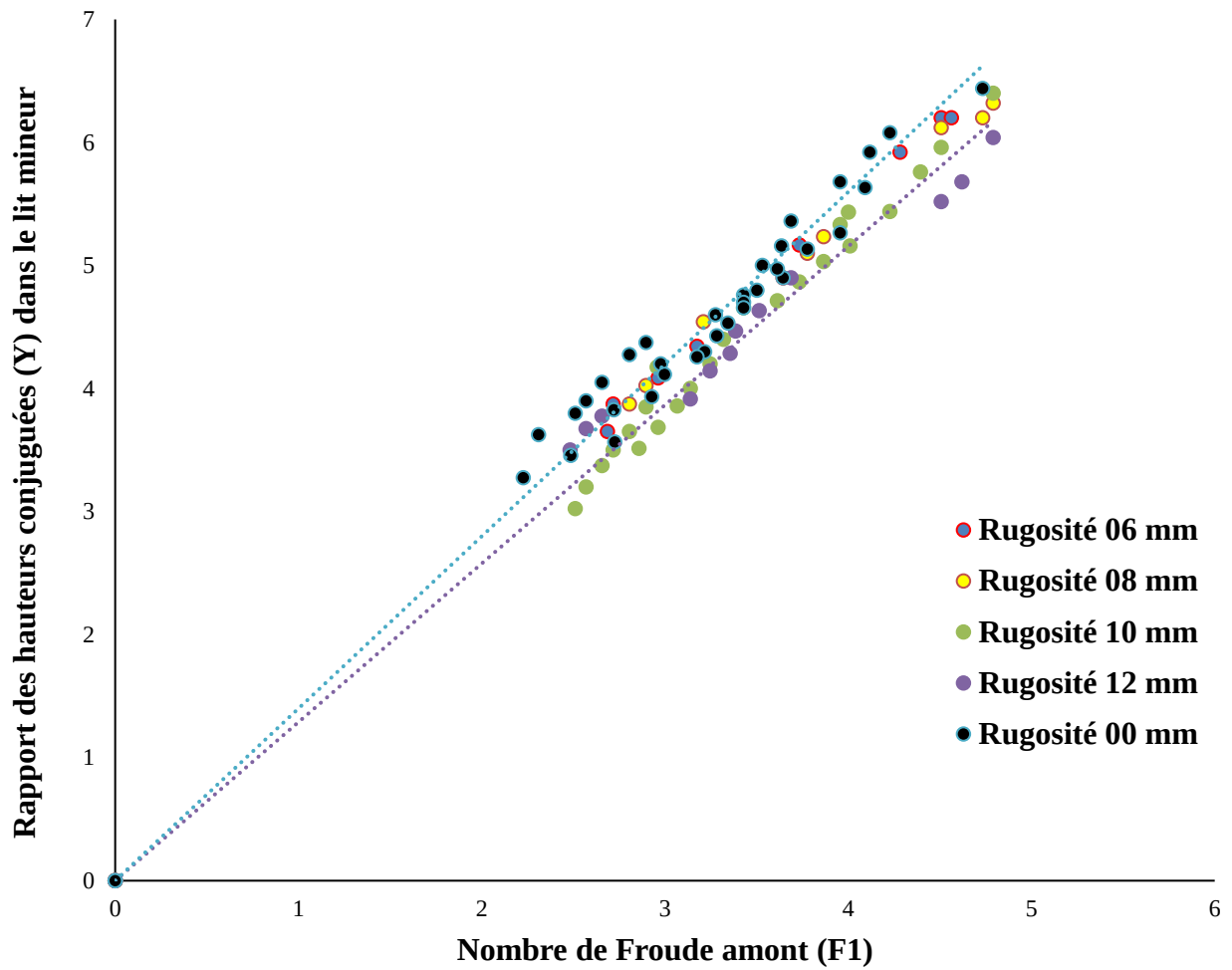


Figure III.15 : Relation entre le rapport des hauteurs conjuguées (Y) et le nombre de Froude amont (F_1) dans le lit mineur, sous différentes rugosités du lit.

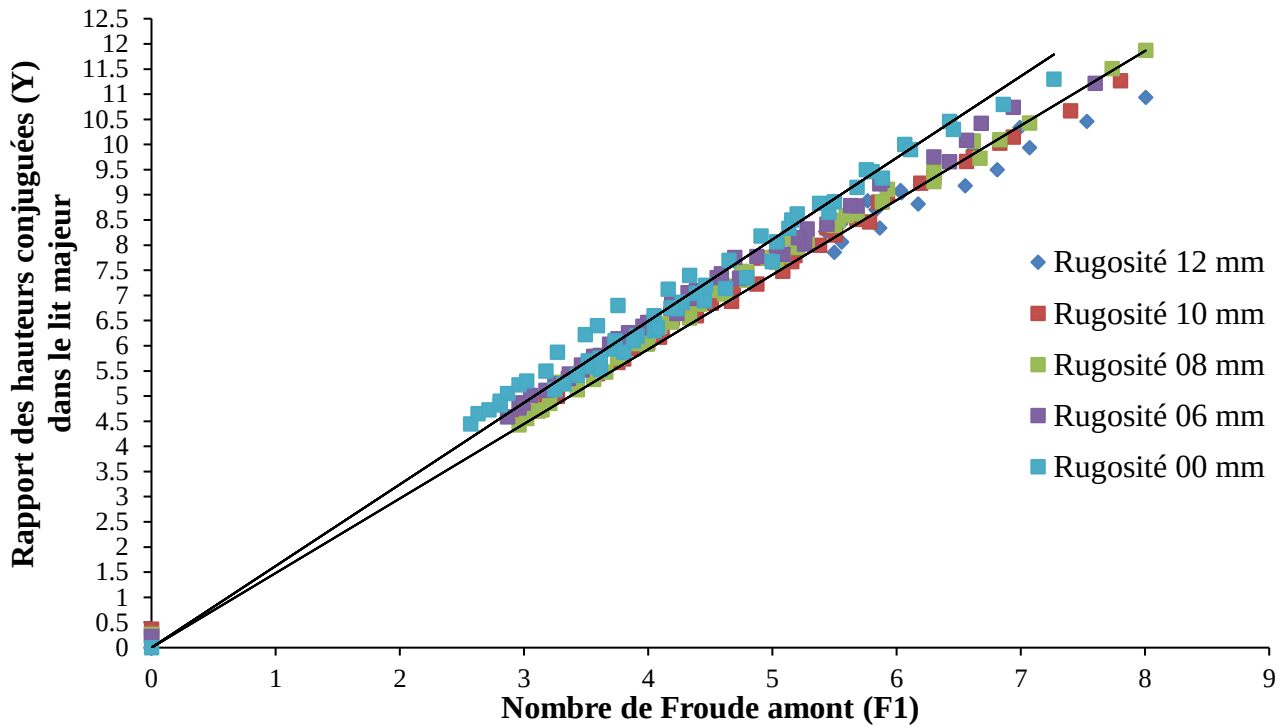


Figure III.16 : Relation entre le rapport des hauteurs conjuguées (Y) et le nombre de Froude amont (F_1) dans le lit majeur, sous différentes rugosités du lit majeur.

Une analyse statistique a été réalisée sur l'ensemble des données expérimentales à l'aide de la méthode des moindres carrés non linéaires, dans le but de mettre en évidence la relation entre le rapport des hauteurs conjuguées (Y) et le nombre de Froude amont (F_1). Les résultats ont mis en évidence une corrélation de type linéaire suivante :

$$Y = h_2 / h_1 = a (F_1) \quad (\text{III. 7})$$

Les coefficients a_1 et a_2 ont été déterminés respectivement pour les lits mineur et majeur.

Tableau III.7 : Rugosité relative et coefficients de régression pour les lits mineur et majeur.

Rugosité (mm)	Rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur	Rugosité relative (ε/B) dans le lit majeur	a_1	R^2	a_2	R^2
0	0	0	1.3993	0.9868	1.6224	0.9794

6	0.041666	0.024	1.373	0.9969	1.575	0.9932
8	0.055555	0.032	1.3489	0.9914	1.5228	0.9955
10	0.069444	0.04	1.307	0.9966	1.5025	0.9952
12	0.083333	0.048	1.2888	0.9977	1.4823	0.9839

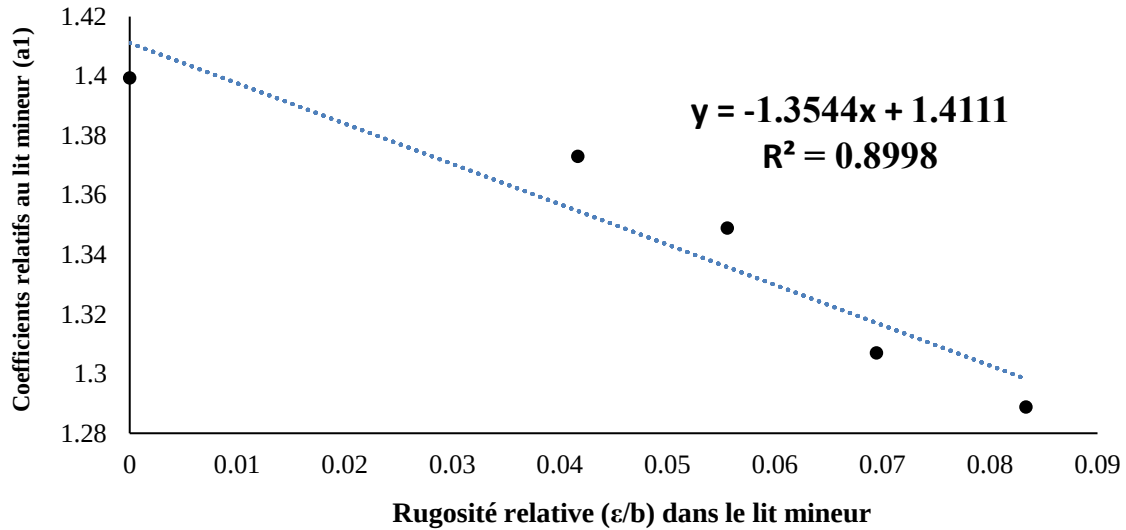


Figure III.17 : Corrélation linéaire entre la rugosité relative (ϵ/b) et le coefficient a_1 dans le lit mineur.

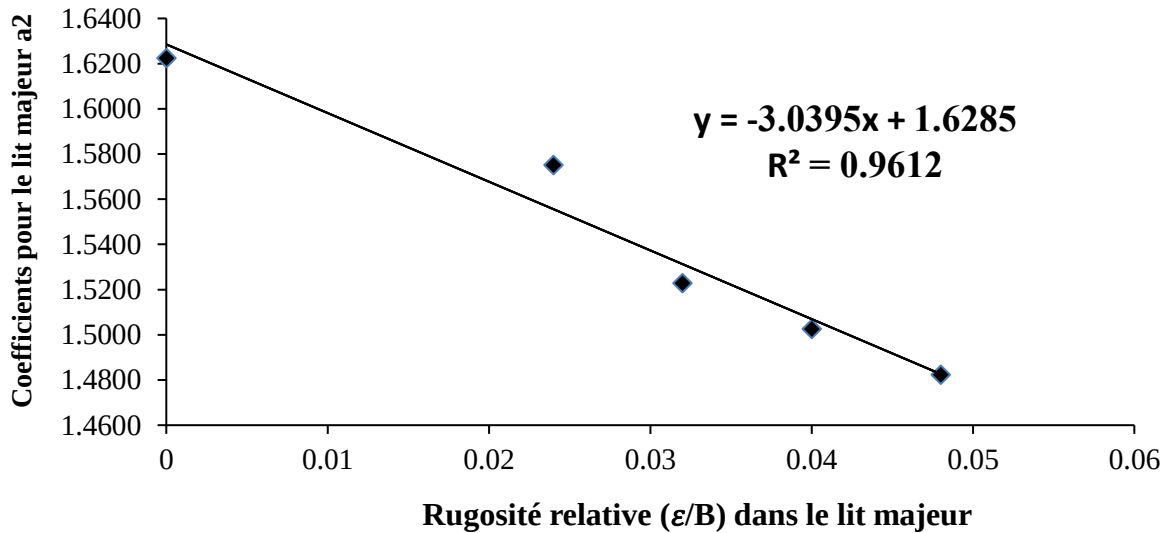


Figure III.18: Variation du coefficient de régression a_2 en fonction de la rugosité relative (ϵ/B).

Les figures III.17 et III.18 illustrent la forte corrélation entre les coefficients (a_1 ; ϵ/b) pour le lit mineur et (a_2 ; ϵ/B) pour le lit majeur, ce qui conduit aux équations suivantes :

Pour le lit mineur :

$$Y = h_2/h_1 = (-1,3544 (\varepsilon/b) + 1,4111) F_1 \quad (\text{III. 8})$$

Pour le lit majeur :

$$Y = h_2/h_1 = (-3,0395 (\varepsilon/B) + 1,685) F_1 \quad (\text{III. 9})$$

Les figures III.19 et III.20 illustrent la corrélation entre les valeurs expérimentales et les équations respectives ($Y = f(\varepsilon/b, F_1)$ et $Y = f(\varepsilon/B, F_1)$) pour les lits mineur et majeur.

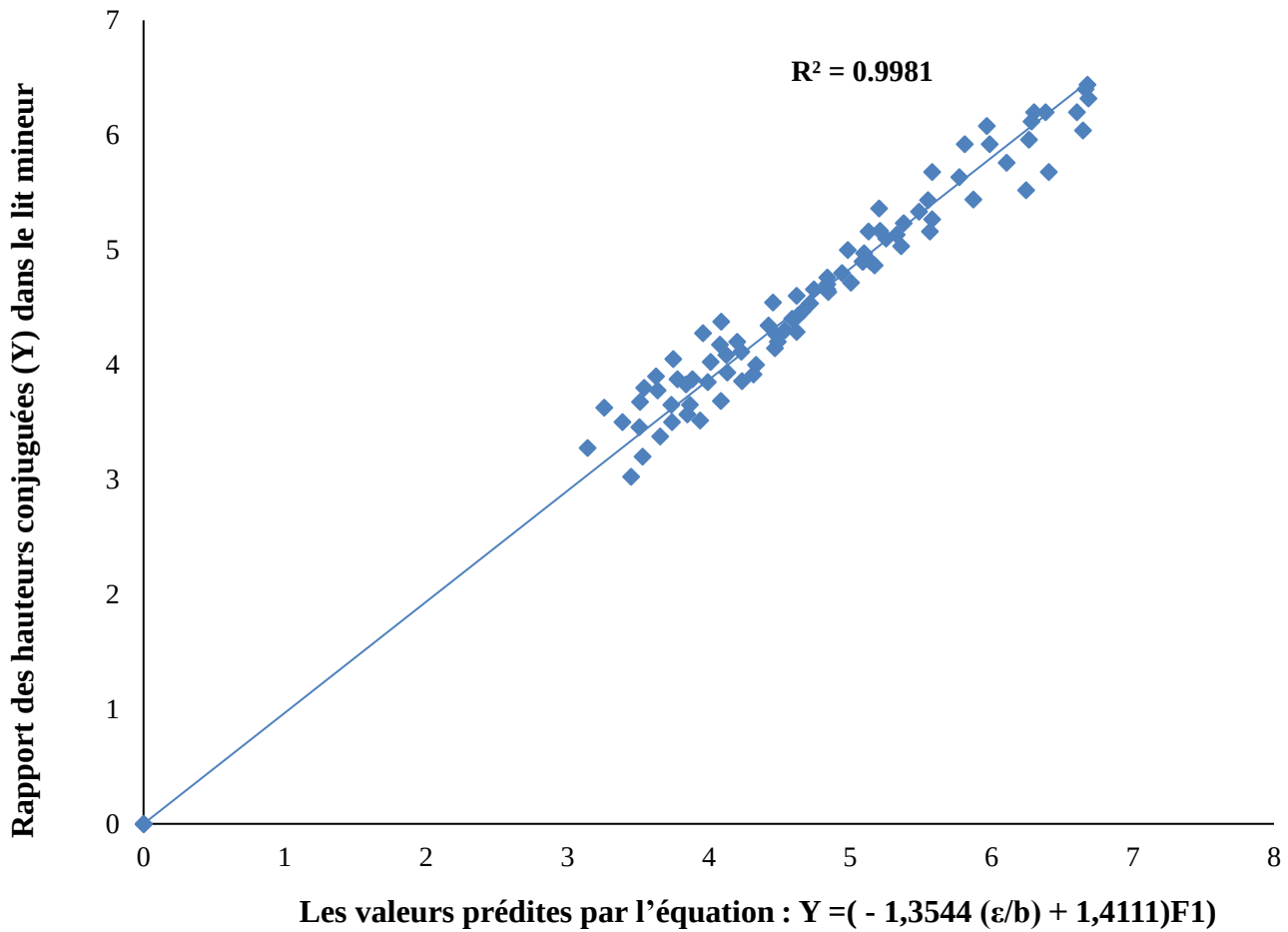


Figure III.19 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs issues de la relation globale de Y pour le lit mineur selon l'équation de régression $Y = f(\varepsilon/b, F_1)$.

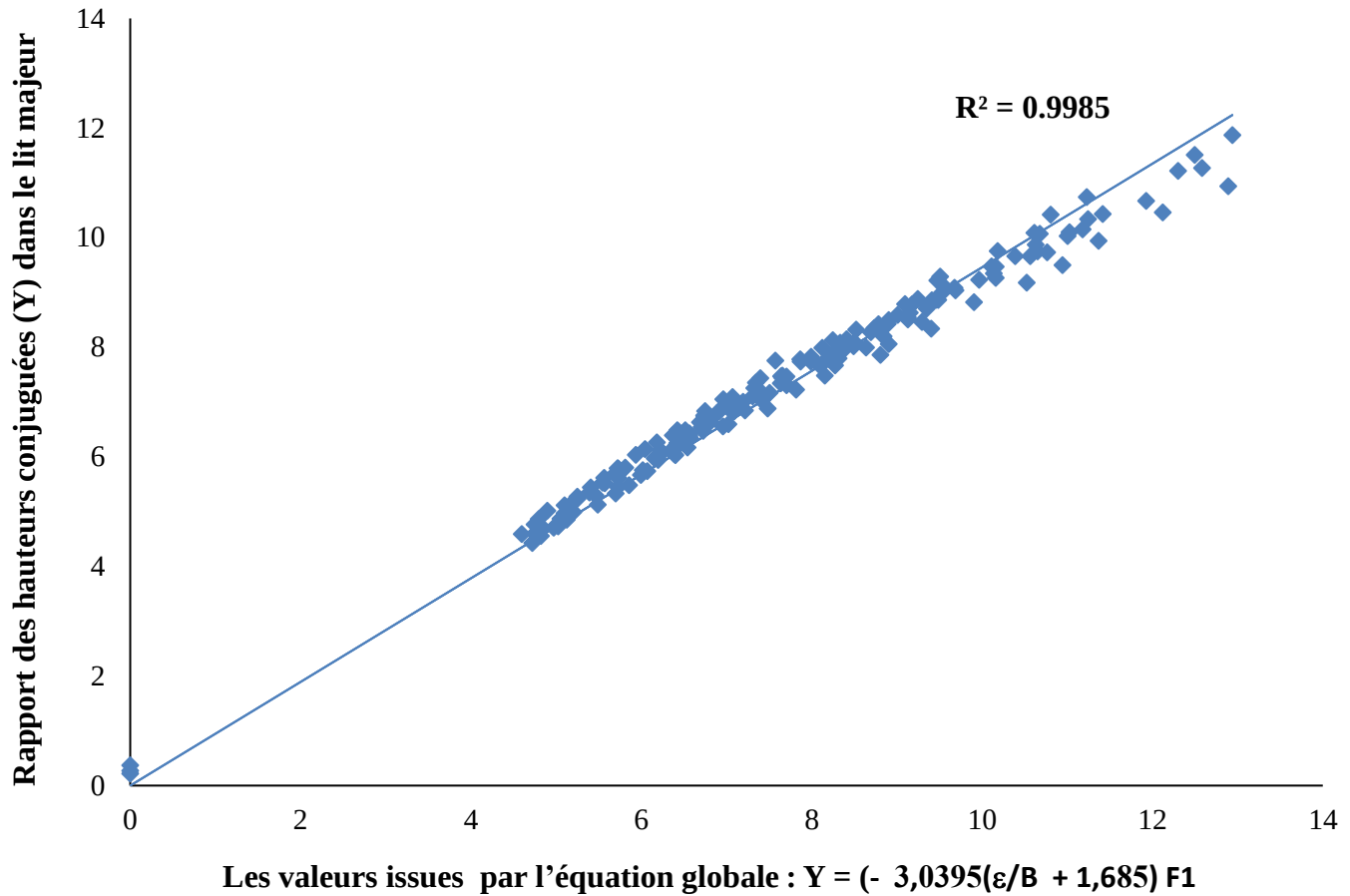


Figure III.20 : Comparaison entre les valeurs expérimentales et les valeurs issues de $Y = f(\epsilon/B, F1)$. Pour le lit majeur,

Dans les deux cas, la majorité des points de données expérimentaux s'alignent étroitement avec la première bissectrice, ce qui confirme la fiabilité et la validité des mesures expérimentales.

La figure III.21 présente la relation entre les valeurs expérimentales (Y_{exp}) et les équations pour les lits majeur et mineur.

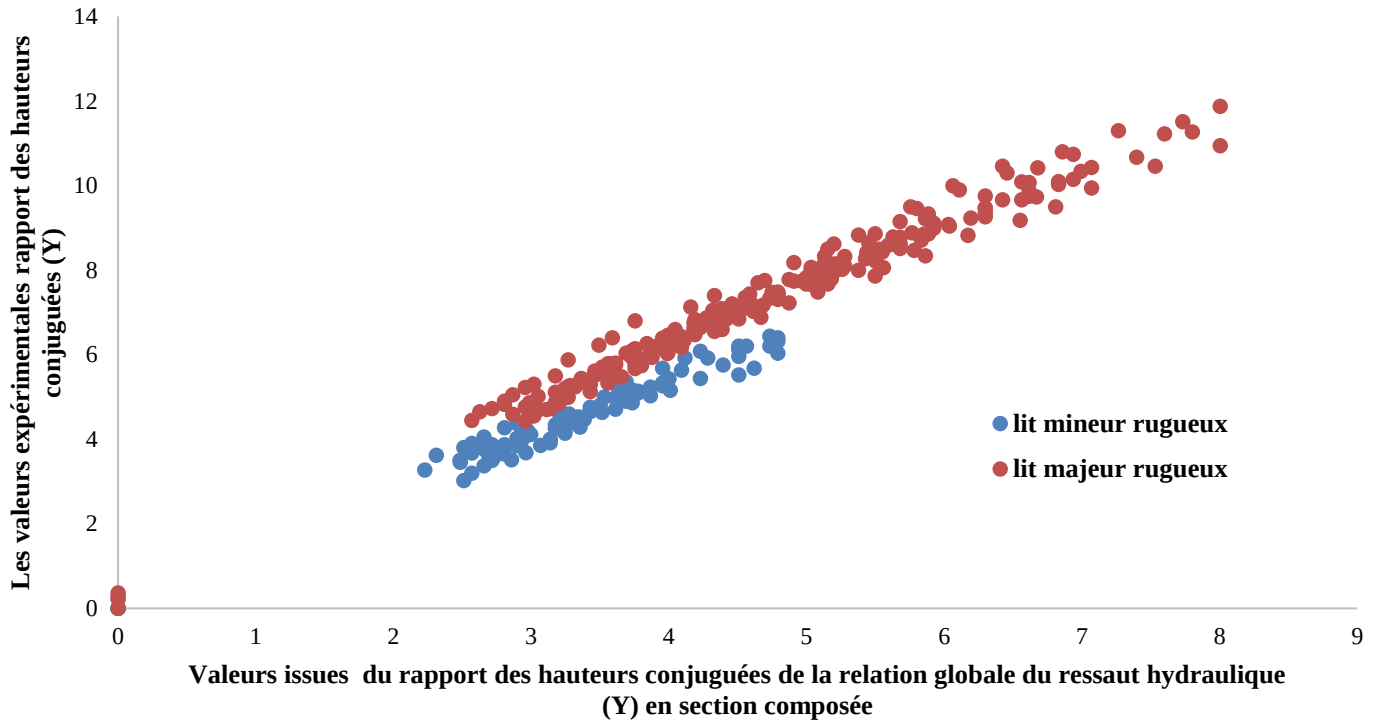


Figure III.21 : présente la relation entre les valeurs expérimentales (Y_{exp}) et les équations pour les lits majeur et mineur de la section rectangulaire composée.

D'après la figure III.21, il est évident que le rapport des hauteurs conjuguées ($Y = h_2/h_1$) est nettement plus faible dans le lit mineur (section plus étroite et plus superficielle : $0 < h_2 < 15,5$ cm) par rapport au lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm). Cette différence s'explique par l'influence plus marquée de la rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur, où une rugosité accrue entraîne une dissipation d'énergie plus importante lors du ressaut hydraulique, réduisant ainsi la profondeur finale (h_2). En revanche, dans le lit majeur, l'impact de la rugosité est moins prononcé en raison de la plus grande section transversale et du volume d'écoulement plus important, ce qui permet une meilleure rétention de l'énergie et conduit à un rapport de profondeur Y élevé.

Les Tableaux III.8 et III.9, présentés en annexe, exposent les écarts relatifs entre les rapports Y du ressaut hydraulique, obtenus à partir des données expérimentales et ceux estimés par l'équation d'ajustement, respectivement pour le lit mineur et le lit majeur. Dans les deux cas, les erreurs relatives observées demeurent généralement inférieures à 5 % en majorité, ce qui témoigne de la précision et de la fiabilité du modèle proposé et des mesures expérimentales obtenues.

III.1.4 Analyse de l'influence du nombre de Froude incident sur la hauteur relative du seuil S/h_1

Les données présentées dans les figures III.22 et III.23 mettent en évidence une relation linéaire nette entre le rapport S/h_1 , qui représente la hauteur relative du seuil, et le nombre de Froude incident F_1 . Dans la première figure, cette relation a été examinée pour le lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm), tandis que la seconde figure concerne le lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm). Cette analyse a été réalisée pour quatre valeurs de rugosité : $\varepsilon = 06$ mm, $\varepsilon = 08$ mm, $\varepsilon = 10$ mm et $\varepsilon = 12$ mm. Les résultats analytiques indiquent que la hauteur relative S/h_1 augmente proportionnellement à la croissance de F_1 . Par ailleurs, il apparaît qu'une augmentation de la rugosité du lit entraîne une diminution notable du rapport S/h_1 . Ce phénomène s'explique par une perte d'énergie dû aux frottements accélérant la dissipation énergétique notamment au fond du canal d'essai.

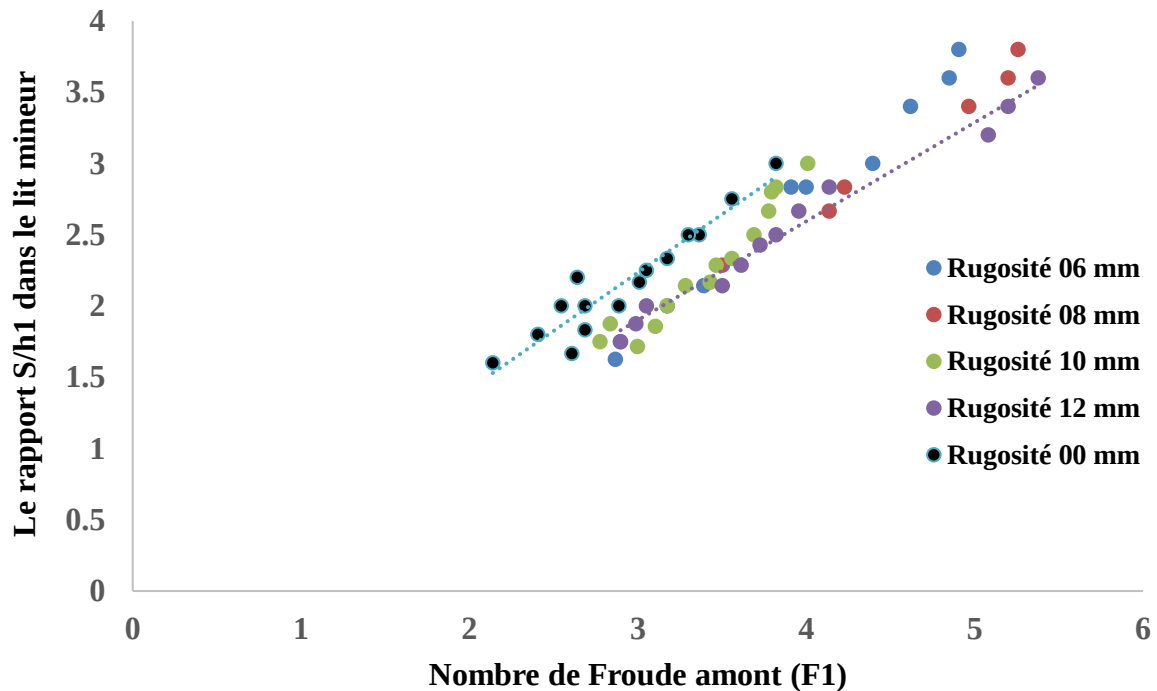


Figure III.22 : Variation du rapport S/h_1 dans le lit mineur en fonction du nombre de Froude amont (F_1) pour différentes rugosités du lit.

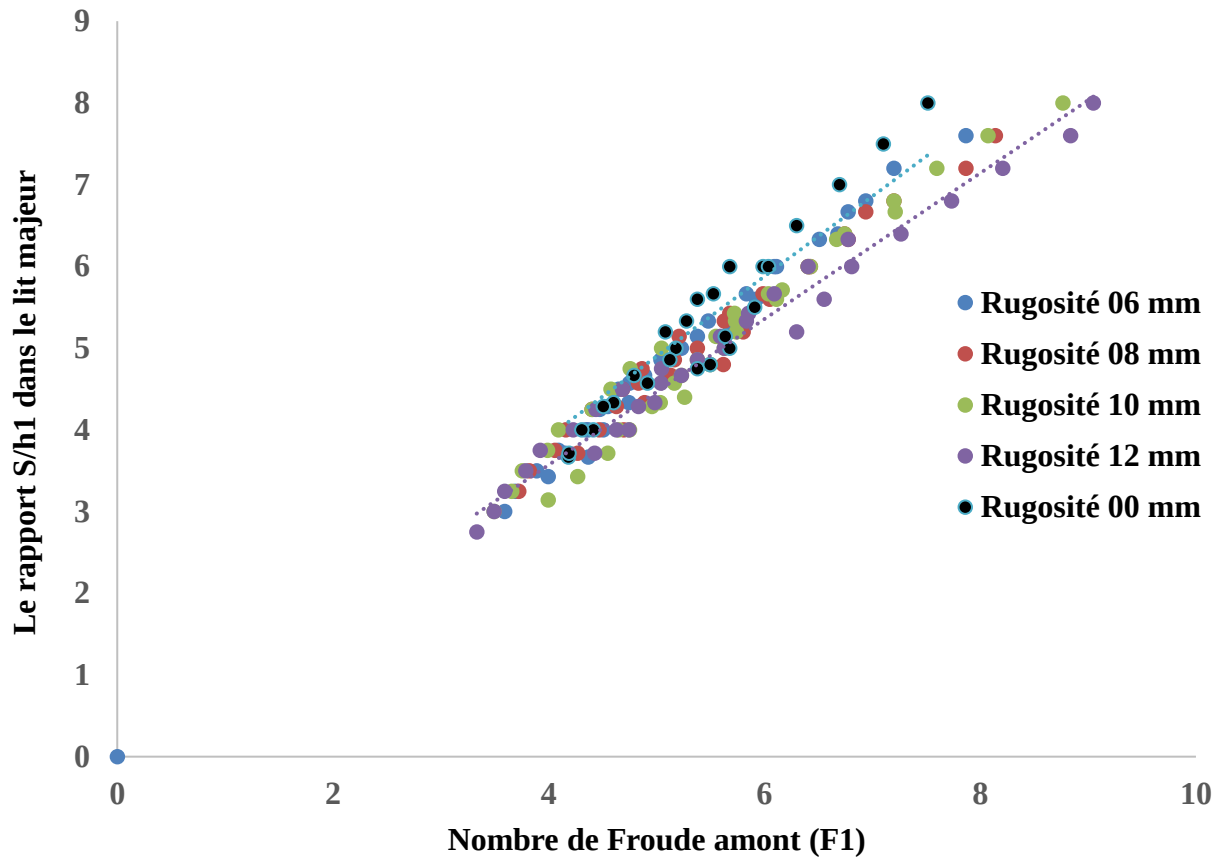


Figure III.23 : Évolution du rapport $S/h1$ en fonction du nombre de Froude amont ($F1$) dans le lit majeur, selon différentes rugosités du lit.

Une analyse statistique entière a été conduite sur l'ensemble des mesures expérimentales en utilisant la méthode des moindres carrés non linéaires, dans le but de caractériser la relation entre rapport $S/h1$ et le nombre de Froude amont $F1$. Les résultats démontrent une corrélation de type linéaire, exprimée par la relation suivante :

$$S/h1 = a(F1) \quad (III. 10)$$

Les coefficients de pondération a_1 et a_2 ont été déterminés respectivement pour les lits mineur et majeur.

Tableau III.10 : La rugosité relative et coefficients de régression obtenus pour les différents ajustements aux lit mineur et majeur.

Rugosité (mm)	Rugosité relative (ε/b) dans le lit mineur	Rugosité relative (ε/B) dans le lit majeur	a_1	R^2	a_2	R^2
0	0	0	0,7447	0,9968	0,9795	0,9957
6	0.041666	0.024	0,7022	0,993	0,9479	0,9982
8	0.055555	0.032	0,6841	0,9986	0,9304	0,9989
10	0.069444	0.04	0,6738	0,9939	0,9941	0,9978
12	0.083333	0.048	0,6499	0,9988	0,8925	0,9985

Les données expérimentales ont mis en évidence une corrélation significative entre la rugosité relative (ε/b et ε/B) et les coefficients de régression (a_1 et a_2) correspondant respectivement aux configurations de lit mineur et de lit majeur. Dans le cas du lit mineur, pour une plage de hauteur d'eau comprise entre ($0 < h_2 < 15,5$ cm), le coefficient a_1 décroît de manière linéaire au fur et au mesure que la rugosité relative (ε/b) augmente. Cette relation est décrite par l'expression suivante :

$$S/h_1 = (-1,1055 (\varepsilon/b) + 0,7462) F1 \quad (III. 11)$$

De manière analogue, pour le lit majeur, lorsque la hauteur d'eau se situe entre ($15,5 < h_2 < 28$ cm), le coefficient a_2 suit également une tendance linéaire décroissante avec l'augmentation de la rugosité relative (ε/B). Cette relation est exprimée par l'équation suivante :

$$S/h_1 = (-1,7494 (\varepsilon/B) + 0,9839) F1 \quad (III. 12)$$

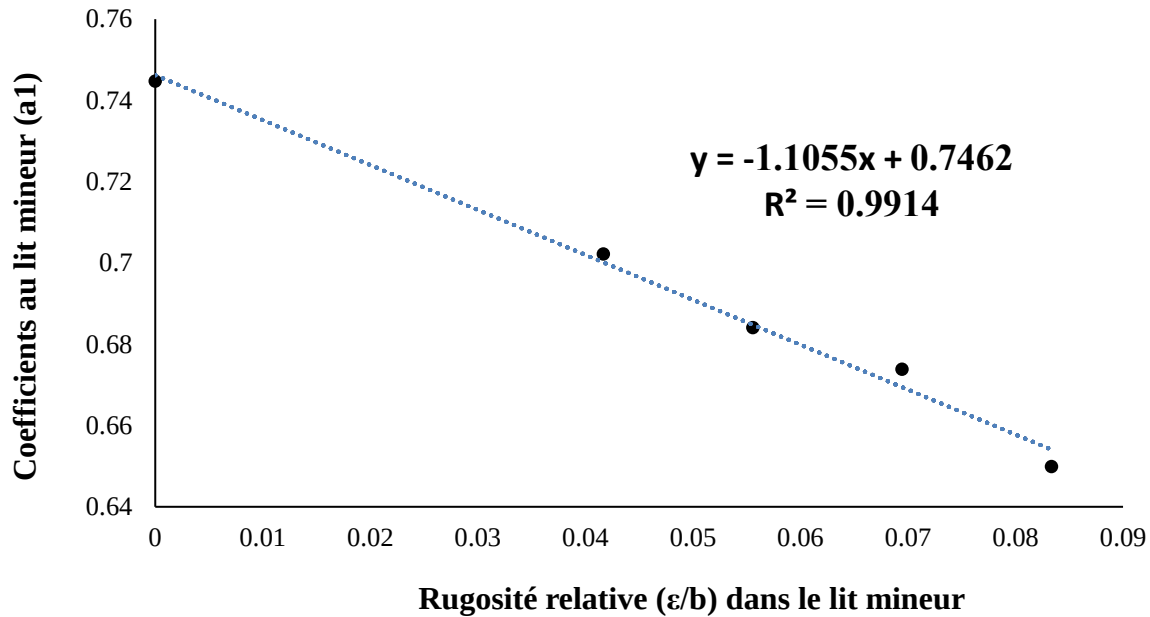


Figure III.24 : Évolution du coefficient de régression a1 en fonction de la rugosité relative (ε/b).

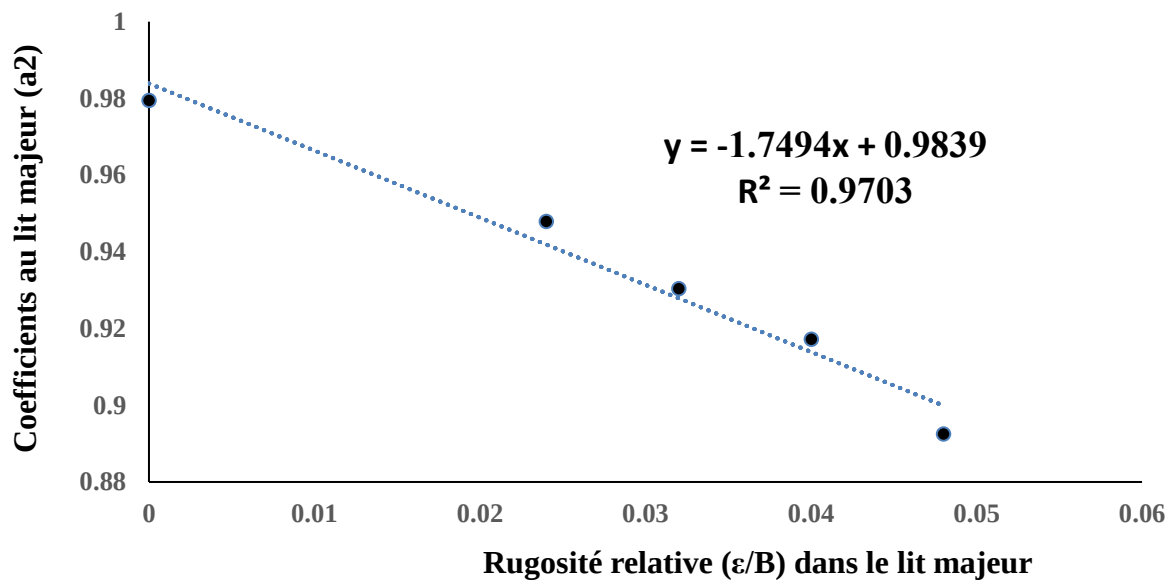
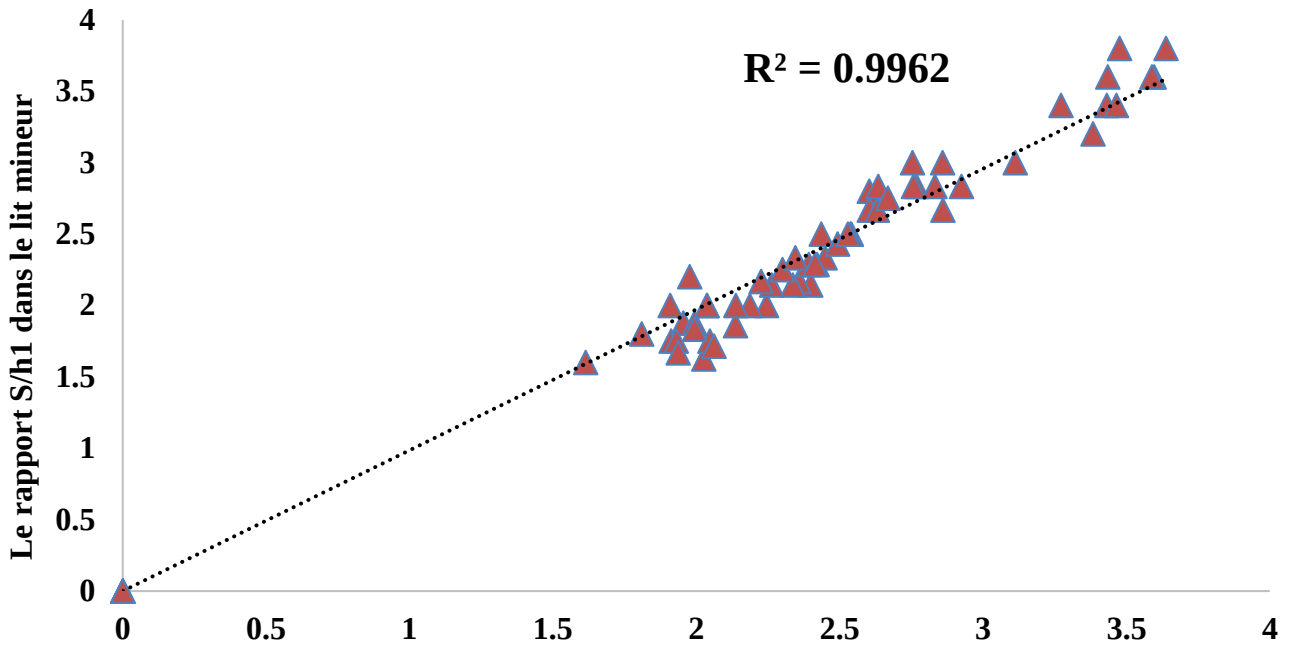


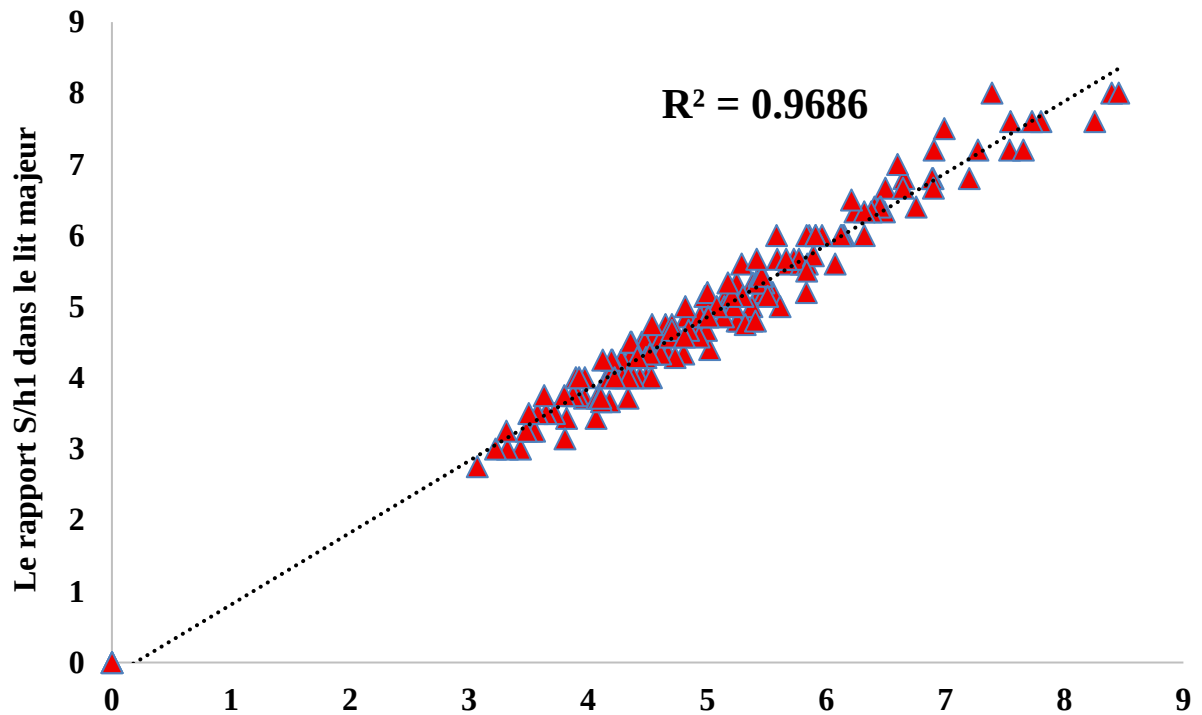
Figure III.25 : Évolution du coefficient de régression a2 en fonction de la rugosité relative (ε/B).

Les figures III.25 et III.26 illustrent clairement la forte corrélation entre les valeurs expérimentales mesurées et les équations de régression obtenues. Pour le lit mineur, la relation est exprimée par l'équation $S/h_1 = f(\epsilon/b, F_1)$ et pour le lit majeur, elle est donnée par $S/h_1 = f(\epsilon/B-b, F_1)$. Ces représentations confirment la validité des modèles proposés pour décrire le comportement du ressaut hydraulique dans les deux configurations de lit.



Les valeurs issues par l'équation : $S/h_1 = (-1,1055 (\varepsilon/b) + 0,7462) F_1$

Figure III.25 : Concordance entre les données expérimentales et les valeurs estimées de S/h_1 dans le cas du lit mineur.



Les valeurs prédites par l'équation : $S/h_1 = (-1,7494 (\varepsilon/B) + 0,9839) F_1$

Figure III.26 : Concordance entre les données expérimentales et les valeurs estimées de la relation d'ajustement global S/h_1 pour le lit majeur.

Dans les deux configurations, la plupart des points expérimentaux se situent à proximité immédiate de la première bissectrice, attestant ainsi la fiabilité des mesures d'essai.

La figure III.27 illustre la relation entre les valeurs expérimentales (S/h_1) et les valeurs issues par les équations de régression établies pour les configurations de lit mineur et de lit majeur.

La figure III.27 met en évidence une différence significative du rapport S/h_1 entre le lit mineur et le lit majeur. Dans le lit mineur, ce rapport est nettement inférieur en raison de l'influence prédominante de la rugosité relative (ε/b), accentuée par la configuration étroite et peu profonde de la section. Cette rugosité élevée induit une dissipation d'énergie accrue lors du ressaut hydraulique, ce qui montre clairement une diminution notable de la profondeur finale h_2 et, par conséquent, du rapport S/h_1 . À l'inverse, dans le lit majeur, la largeur accrue de la section transversale et le volume d'écoulement plus important atténuent sensiblement l'effet de la rugosité relative. Cette configuration favorise une meilleure conservation de l'énergie après le développement du ressaut hydraulique et conduit ainsi à des valeurs sensiblement plus élevées du rapport S/h_1 .

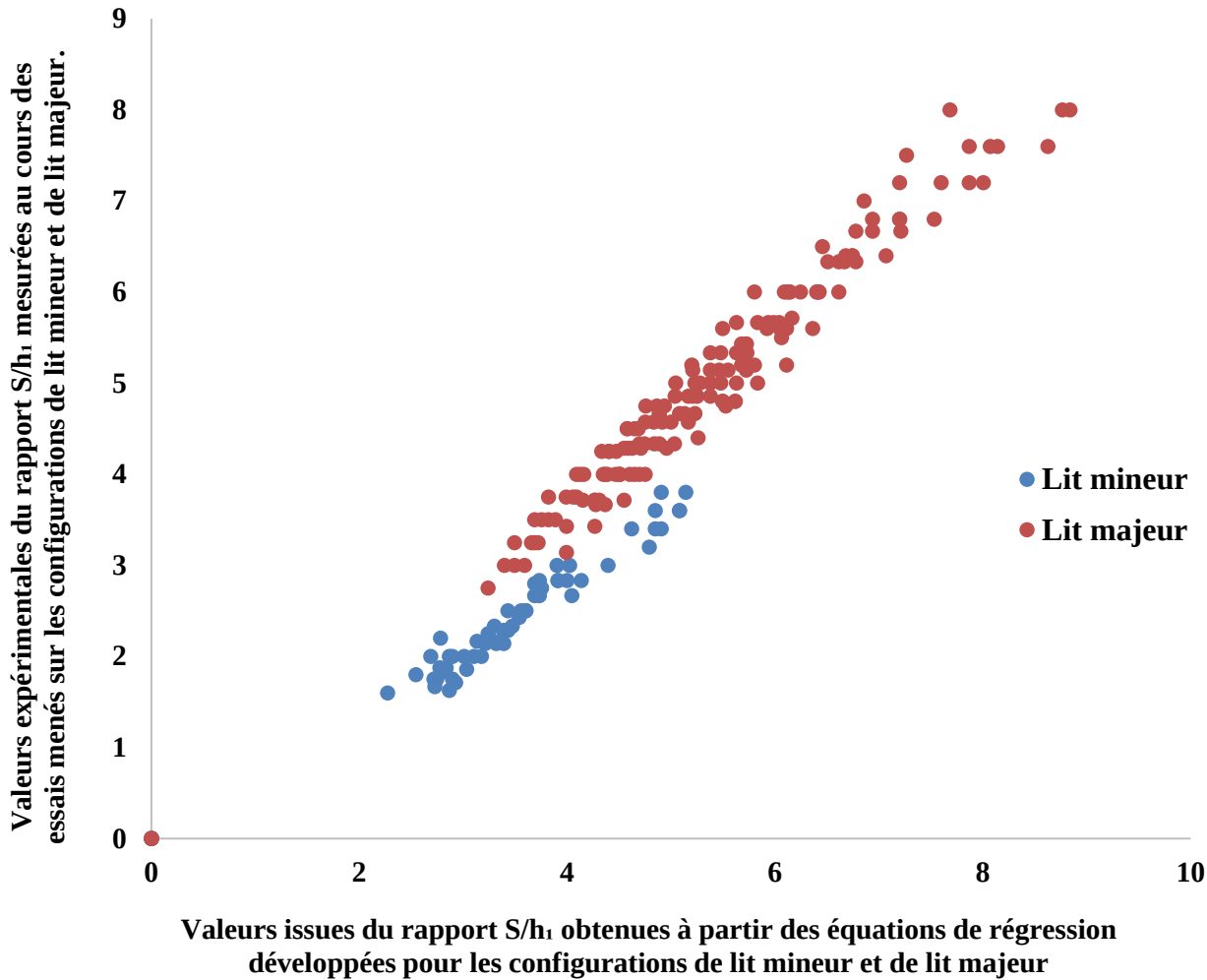


Figure III.27 : Représentation de la relation entre les valeurs expérimentales S/h_1 et les valeurs prédites par les équations de régression pour les lits mineur et majeur.

Cette figure montre une très bonne concordance entre les valeurs expérimentales et celles obtenues par l'équation d'ajustement du rapport S/h_1 , avec des écarts relatifs inférieurs en majorité à 5 %. Cette faible dispersion des erreurs, comme illustré dans le Tableau III.11 (présenté en annexe), confirme la fiabilité du modèle d'essai et des mesures expérimentales obtenues au laboratoire pour différentes configurations hydrauliques (lit mineur et lit majeur), renforçant sa pertinence pour le dimensionnement pratique des seuils au contrôle et création de ressaut hydraulique.

III.1.5 Efficacité énergétique du ressaut hydraulique

Les écoulements à variations brusques, contrôlés, assurent la transition entre le régime torrentiel et le régime fluvial. Cette transition est largement caractérisée par le facteur de rendement noté η . Ce facteur joue un rôle très important, car il permet de réduire

significativement l'énergie transmise par les forces érosives en aval des ouvrages hydrauliques, offrant ainsi une meilleure maîtrise des écoulements fluviaux.

La formulation théorique principale du phénomène s'écrit :

$$\Delta H = H_1 - H_2 \quad (\text{III. 13})$$

$$\Delta H = h_1 + \frac{Q^2}{2gA_1^2} - h_2 - \frac{Q^2}{2gA_2^2} \quad (\text{III. 14})$$

Où H_1 et H_2 représentent respectivement l'énergie totale en amont et en aval du ressaut, h_1 et h_2 les hauteurs d'eau correspondantes, Q le débit, A_1 et A_2 les sections amont et aval, g l'accélération gravitationnelle, et ΔH la perte d'énergie due au ressaut.

Le rendement η est ainsi exprimé par le rapport suivant :

$$\eta = \frac{H_1 - H_2}{H_1} \quad (\text{III. 15})$$

Le rendement s'exprime comme suit :

$$H_1 = h_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g} \quad (\text{III. 16})$$

$$H_2 = h_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} \quad (\text{III. 17})$$

α_1 et α_2 sont des coefficients d'énergie (généralement pris égaux à 1 pour un écoulement uniforme), V_1 et V_2 sont les vitesses moyennes respectives avant et après le ressaut.

En injectant ces expressions dans celle du rendement, on obtient :

$$\eta = 1 - \left(\frac{h_2 + \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g}}{h_1 + \alpha_1 \frac{V_1^2}{2g}} \right) \quad (\text{III. 18})$$

Substitution en fonction du débit et de la section en utilisant : $V_1 = Q / A_1$ et $V_2 = Q / A_2$, l'expression précédente devient :

$$\eta = 1 - \left(\frac{h_2 + \alpha_2 \frac{Q^2}{2gA_2^2}}{h_1 + \alpha_1 \frac{Q^2}{2gA_1^2}} \right) \quad (\text{III. 19})$$

Où les sections sont définies par :

$$A_1 = bh_1$$

$$A_2 = B(h_2 - h) + bh$$

Et les coefficients d'énergie sont supposés égaux à :

$$\alpha_1 = \alpha_2 = 1 \text{ (hypothèse usuelle pour un écoulement uniforme)}$$

En définissant le nombre de Froude amont F1 par :

$$F1 = \frac{Q}{\sqrt{b^2 g h_1^3}}$$

L'expression du rendement s'écrit alors :

$$\eta = 1 - \left(\frac{Y + \left| \frac{2Y}{\beta - \frac{1}{\beta-1}} \right|^2}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \right) \quad (\text{III. 20})$$

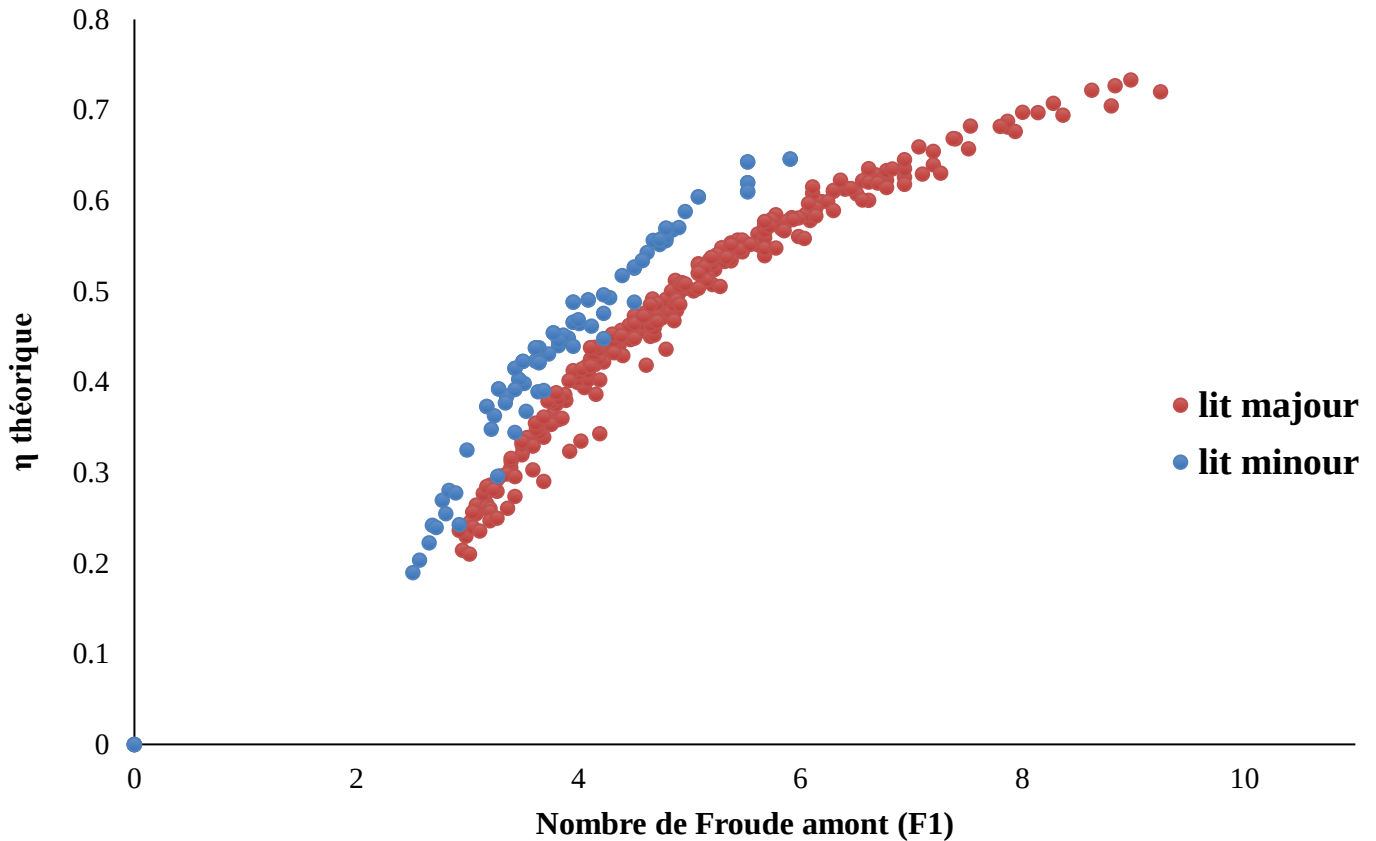


Figure III.28 : La relation entre le rendement η théorique et le nombre de Froude amont (F1) pour deux types de lits : lit majeur (en rouge) et lit mineur (en bleu).

Les résultats expérimentaux permettent de tracer les courbes de rentabilité de l'approche globale théorique adimensionnelle η en fonction du facteur de Froude F1, pour une section rectangulaire composée avec différentes rugosités du lit mineur et celui majeur. D'après la figure 3.28, il est observé que le rendement du lit majeur est en dessous du celui du lit mineur, et que, pour un facteur F1 fixé, la dissipation de l'énergie cinétique est plus importante au lit mineur que celui au lit majeur.

III.1.6 Exercice de calcul des caractéristiques de l'écoulement

Dans cet exemple, nous appliquerons ces équations à trois scénarios réalistes, dont les données proviennent de bassins de terrain. L'objectif de cette application est d'étudier le ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire présentant une couche rugueuse, et d'évaluer l'efficacité de ces équations pour déterminer les longueurs appropriées des bassins d'amortissement.

- **Premier cas :**

Le débit d'écoulement de pratique est de $Q = 6000 \text{ m}^3/\text{s}$. Le canal rectangulaire principal présente une largeur minimale de 25 m et une largeur maximale atteignant $B = 27 \text{ m}$.

Dans un premier temps, nous déterminons la rugosité appropriée aux conditions d'écoulement, ainsi qu'une hauteur initiale (h_1), en se basant sur des données obtenues expérimentalement.

Le rapport (ε/b) varie entre 0,04166 et 0,08333 ; nous retenons une valeur dans cet intervalle pour représenter les conditions réelles d'écoulement.
 $\varepsilon/b = 0,08333 \rightarrow \varepsilon = b \cdot 0,08333 = 25\text{m} \cdot 0,08333 = 2.08 \text{ m}$, **$\varepsilon_{\text{pratique}} = 2,08\text{m}$**

Le rapport (h_1/b) varie entre 0,1736 et 0,2777 ; nous choisissons une valeur dans cet intervalle pour représenter les conditions réelles d'écoulement.

$$h_1/b = 0,08333 \rightarrow h_1 = b \cdot 0,2777 = 25\text{m} \cdot 0,2777 = 6.94 \text{ m}$$

Ainsi le calcul du facteur F_1 est :

$$F_1 = \frac{Q}{\sqrt{g b^2 h_1^3}} \approx 4.19$$

La hauteur relative du ressaut hydraulique, exprimée par le rapport ($Y = h_2/h_1$), peut être déterminée à partir de méthodes basées sur les données expérimentales.

Pour le cas d'un lit mineur :

$$Y = h_2/h_1 = (-1.3544(\varepsilon/b) + 1.4111) (F_1)$$

En appliquant cette relation, on obtient une valeur de $Y \cong 5.44$, et donc une hauteur h_2 d'environ 37.75 m.

En revanche, la méthode semi-théorique propose un modèle différent :

$$Y = 1.329 F_1^{0.986} \left(1 - \frac{0.4166 (\varepsilon/B)}{\beta} \right)^{1.430}$$

L'utilisation de cette formule donne $Y \cong 5.189$, ce qui correspond à une hauteur h_2 d'environ 36.01m.

Ainsi, l'écart relatif entre ces deux approches peut être estimé à : $\Delta Y / Y \cong 4.6 \%$.

Pour le cas d'un lit majeur rugueux :

$$Y = h_2/h_1 = (-3,0395 (\varepsilon/B) + 1,685) (F1)$$

En appliquant cette relation, on obtient une valeur de $Y \cong 6.07$, et donc une hauteur h_2 d'environ 42.18 m.

L'approche adimensionnelle de longueur relative obtenue est la suivante est :

$$\text{Lit mineur : } L_j/h_1 = (-21.061(\varepsilon/b) + 16.125) (F1)$$

$$L_j/h_1 = 60.195 \text{ par conséquent : } L_j \cong 417.90 \text{ m.}$$

$$\text{Lit majeur : } L_j/h_1 = (-33,94(\varepsilon/B) + 17,396) (F1)$$

$$L_j/h_1 = 61.93 \text{ par conséquent : } L_j \cong 429.82 \text{ m.}$$

L'approche adimensionnelle de longueur du rouleau obtenue est la suivante est :

$$\text{Lit mineur : } L_r/h_1 = (-17.764(\varepsilon/b) + 11.213) (F1)$$

$$L_r/h_1 = 40,77 \text{ par conséquent : } L_r \cong 283,04 \text{ m.}$$

$$\text{Lit majeur : } L_r/h_1 = (-26,723 (\varepsilon/B) + 12.222)(F1)$$

$$L_r/h_1 = 42.58 \text{ par conséquent : } L_r \cong 295.535 \text{ m.}$$

L'approche empirique développé expérimentalement pour le seuil relatif est d'expression suivante :

$$\text{Lit mineur : } S/h_1 = (-1,1055 (\varepsilon/b) + 0,7462) (F1)$$

$$S/h_1 = 2.76 \text{ par conséquent : } S \cong 19.22 \text{ m.}$$

$$\text{Lit majeur : } S/h_1 = (-1,7494 (\varepsilon/B) + 0,9839) (F1)$$

$$S/h_1 = 3.55 \text{ par conséquent : } S \cong 24.69 \text{ m.}$$

• **Deuxième cas :**

Débit (Q) : 6000 m³/s

Largeur minimale (b) : 30 m

Largeur maximale (B) : 32 m

Rugosité (ϵ/b) : 0,08333 $\rightarrow \epsilon = 30 * 0,08333 = 2,5$ m

Hauteur initiale (h_1/b) : 0,2777 $\rightarrow h_1 = 30 * 0,2777 = 8,33$ m

Accélération (g) : 9,81 m/s²

Ainsi le calcul du facteur F1 est :

$$F1 = \frac{Q}{\sqrt{g b^2 h_1^3}} \approx 2.65$$

1. Hauteur relative du ressaut hydraulique

a. Pour un lit mineur :

$$Y = h_2/h_1 = (-1.3544(\epsilon/b) + 1.4111) (F1)$$

$$h_2/h_1 = 3,41 \text{ par conséquent : } h_2 \cong 28,4 \text{ m.}$$

Méthode semi-théorique

$$Y = 1.329 F_1^{0.986} \left(1 - \frac{0.4166 (\epsilon/B)}{\beta} \right)^{1.430} \approx 3.26$$

$$h_2 = 3.26 * 8.33 \cong 27,16 \text{ m}$$

L'écart relatif entre les deux approches est d'environ 4.5%.

b. Pour le lit majeur rugueux :

$$Y = h_2/h_1 = (-3,0395 (\epsilon/B) + 1,685) (F1)$$

$$h_2/h_1 = 3,86 \text{ par conséquent : } h_2 \cong 32,15 \text{ m.}$$

2. Longueur relative du ressaut

a. Pour lit mineur :

$$L_j/h_1 = (-21.061(\epsilon/b) + 16.125) (F1)$$

$$L_j/h_1 = 37,26 \text{ par conséquent : } L_j = 310,3 \text{ m.}$$

b. Pour le lit majeur rugueux :

$$L_j/h_1 = (-33,94(\varepsilon/B) + 17,396) (F1)$$

$$L_j/h_1 = 39.07 \text{ par conséquent : } L_j = 325.47 \text{ m.}$$

3. Longueur relative du rouleau

a. Pour lit mineur :

$$L_r/h_1 = (-17.764(\varepsilon/b) + 11.213) (F1)$$

$$L_r/h_1 = 26.03 \text{ par conséquent : } L_r \cong 216.886 \text{ m.}$$

b. Pour le lit majeur rugueux :

$$L_r/h_1 = (-26,723 (\varepsilon/B) + 12.222)(F1)$$

$$L_r/h_1 = 26.85 \text{ par conséquent : } L_r \cong 223.70 \text{ m.}$$

4. Seuil relatif

a. Pour lit mineur :

$$S/h_1 = (-1,1055 (\varepsilon/b) + 0,7462) (F1)$$

$$S/h_1 = 1.74 \text{ par conséquent : } S \cong 14.56 \text{ m.}$$

b. Pour le lit majeur rugueux :

$$S/h_1 = (-1,7494 (\varepsilon/B) + 0,9839) (F1)$$

$$S/h_1 = 2.24 \text{ par conséquent : } S \cong 18.70 \text{ m.}$$

• Le troisième cas :

Débit (Q) : 6000 m³/s

Largeur minimale (b) : 40 m

Largeur maximale (B) : 44 m

Rugosité (ε/b) : 0,08333 $\rightarrow \varepsilon = 40 * 0,08333 = 3.333 \text{ m}$

Rapport (h_1/b) : 0,2777 $\rightarrow h_1 = 40 * 0,2777 = 11,108 \text{ m}$

Accélération (g) : 9,81 m/s²

Voici les résultats résumés pour le troisième cas :

Ainsi le calcul du facteur F1 est :

$$F1 = \frac{Q}{\sqrt{g b^2 h_1^3}} \approx 1,29$$

Paramètre	Lit Mineur (m)	Lit Majeur (m)
Y =h2/h1	1,68	1,88
h2(m)	18,65	20,90
Lj/h1	18,59	19,18
Lj(m)	206,49	213,02
Lr /h1	12,59	13,19
Lr(m)	139,85	146,53
S/h1	0,85	1,10
S(m)	9,40	12,23

Récapitulation des résultats du Chapitre 3

Ce chapitre analyse l'écoulement hydraulique dans des canaux composés à rugosité stratifiée, en étudiant l'impact du nombre de Froude (Fr) et de la rugosité sur les paramètres clés de l'écoulement. Des relations empiriques adimensionnelles ont été développées et validées.

- Longueur du ressaut hydraulique (Lj/h1)

La longueur du ressaut (Lj/h₁) augmente avec le nombre de Froude (F₁) et diminue avec la rugosité du lit (dissipation énergétique). Le rapport Lj/h₁ est plus faible dans le lit mineur.

Équations :

- Lit mineur (0 < h₂ < 15,5 cm) : Lj/h₁ = (-21.061(ε/b) + 16.125) (F₁)
- Lit majeur (15,5 < h₂ < 28 cm) : Lj/(h₁) = (- 33.94(ε/B) + 17.396)(F₁)

- Longueur du rouleau (Lr/h1)

La longueur du rouleau (L_r/h_1) diminue avec l'augmentation de la rugosité. Les valeurs de L_r/h_1 sont plus élevées dans le lit majeur (meilleure conservation d'énergie).

Équations :

- Lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm) : $L_r/h_1 = (-17.764(\varepsilon/b) + 11.213)$ (F1)
- Lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm) : $L_r/h_1 = (-26,723 (\varepsilon/B) + 12.222)$ (F1)
- Rapport des hauteurs conjuguées ($Y = h_2/h_1$)

Le rapport Y (h_2/h_1) diminue avec l'augmentation de la rugosité. Il est plus faible dans le lit mineur (dissipation d'énergie accrue).

Équations :

- Lit mineur : $Y = h_2/h_1 = (-1.3544(\varepsilon/b) + 1.4111)$ (F1)
- Lit majeur : $Y = h_2/h_1 = (-3.0395(\varepsilon/B) + 1.685)$ (F1)
- Hauteur relative du seuil (S/h_1)

La hauteur relative du seuil (S/h_1) augmente avec le nombre de Froude (F_1) et diminue avec la rugosité (perte d'énergie par frottement). Le rapport S/h_1 est plus faible dans le lit mineur.

Équations :

- Lit mineur : $S/h_1 = (-1,1055 (\varepsilon/b) + 0,7462)$ (F1)
- Lit majeur : $S/h_1 = (-1,7494 (\varepsilon/B) + 0,9839)$ (F1)
- Efficacité énergétique du ressaut hydraulique (η)

Le facteur de rendement (η) caractérise la transition entre les régimes torrentiel et fluvial. Le rendement est plus élevé dans le lit majeur que dans le lit mineur.

- Formulation théorique :

$$\eta = 1 - \left(\frac{Y + \left| \frac{2Y}{\beta - \frac{1}{\tau}} \right|^2}{1 + \frac{F_1^2}{2}} \right)$$

- Toutes les relations empiriques sont validées par des données expérimentales (erreurs < 5%). Les modèles permettent des calculs précis des caractéristiques d'écoulement.

CONCLUSION GENERALE

Le ressaut hydraulique, en tant que phénomène majeur de dissipation d'énergie dans les écoulements à surface libre, a été étudié dans ce type du ressaut évoluant dans un canal rectangulaire de section composée rugueux, caractérisé par l'existence d'un lit majeur et d'un lit mineur rugueux, et soumis à une pente nulle. Ce choix de configuration, à la fois représentatif de situations réelles et encore peu exploré dans la littérature, a permis de mettre en évidence l'impact conjoint de la rugosité et de la géométrie composée sur les paramètres essentiels du ressaut hydraulique. La recherche menée s'inscrit dans le but de : approfondir la compréhension scientifique de ce phénomène complexe et proposer des outils pratiques pour le dimensionnement et l'optimisation des ouvrages de dissipation d'énergie.

L'étude bibliographique réalisée dans la première partie a permis de passer en revue les recherches antérieures, en mettant en évidence les approches théoriques et expérimentales appliquées aux ressauts hydrauliques.

Dans le premier chapitre, nous avons exposé les modèles analytiques basés sur l'équation de la quantité de mouvement appliquée au ressaut évoluant dans un canal rectangulaire de section composée. L'intégration d'une force de résistance supplémentaire, inspirée des travaux de Achour (2000), a montré que la prise en compte de la forme composée du canal permet d'obtenir des résultats plus proches de la réalité, en corrigeant la surestimation du rapport des hauteurs conjuguées et en améliorant l'estimation du rendement énergétique. Ce constat souligne la nécessité d'introduire des termes correctifs dans les formulations classiques pour traiter les cas de géométries complexes.

Le deuxième chapitre a permis de dégager les principaux renseignements issus des expérimentations menées sur des canaux rectangulaires composés. Les mesures effectuées sur le rapport des hauteurs, les longueurs caractéristiques (L_j et L_r) ainsi que l'efficacité du ressaut, ont montré que les résultats varient considérablement entre le lit mineur et le lit majeur. Les relations empiriques obtenues constituent des outils utiles pour le dimensionnement des bassins de dissipation, tout en mettant en évidence les limites des généralisations établies pour les canaux prismatiques simples. Cette partie confirme donc l'importance des études expérimentales pour enrichir et valider les approches théoriques.

Enfin, le troisième chapitre a approfondi la question de la rugosité, paramètre souvent négligé mais qui exerce une influence déterminante sur le comportement du ressaut hydraulique. L'introduction de la rugosité relative (ε/b) dans l'analyse a permis de quantifier son impact sur

les longueurs normalisées, sur le rapport des hauteurs conjuguées et sur le rendement du ressaut. Les modèles linéaires proposés, fondés sur le couplage entre le nombre de Froude incident et la rugosité, se sont révélés cohérents avec les résultats expérimentaux, confirmant ainsi la pertinence de cette approche. De plus, la comparaison entre les écoulements développés dans le lit mineur rugueux et ceux dans le lit majeur rugueux a révélé des dynamiques différentes, traduisant l'hétérogénéité de la dissipation d'énergie selon la section considérée.

La partie expérimentale de cette étude a formé le fondement de notre travail, confirmant les observations théoriques par des mesures rigoureuses en laboratoire. Les résultats ont clairement mis en évidence que la rugosité des lits et la section composée du canal exercent une influence déterminante sur les caractéristiques du ressaut hydraulique. Nous avons constaté qu'une rugosité croissante accentue la dissipation d'énergie et réduit les hauteurs conjuguées.

Plus spécifiquement, les différences de comportement observées entre les canaux composés démontrent un écoulement complexe. Dans le lit mineur plus rugueux, la dissipation d'énergie est beaucoup plus importante, ce qui se traduit par des longueurs de ressaut (L_j) et longueur de rouleau (L_r) nettement plus courtes. Par conséquent, le rapport des hauteurs conjuguées ($Y = h_2/h_1$) est également plus faible. À l'inverse, la conservation d'énergie est plus favorable dans le lit majeur du canal composé.

Afin de commenter ces observations en outils pratiques pour le chercheur en hydraulique, nous avons développé et validé un ensemble de relations empiriques adimensionnelles. Ces modèles, qui relient le nombre de Froude (F_1) à la rugosité relative (ε/b), se sont prouvés très précis. Par exemple, le modèle semi-théorique $Y = 1.329F_r^{0.986} \left(1 - \frac{0.4166 \left(\frac{\varepsilon}{B}\right)}{\beta}\right)^{1.430}$ est capable d'intégrer la rugosité et la géométrie du canal pour prédire avec fiabilité le rapport de charge. La validation de ces modèles avec les données expérimentales, avec des écarts inférieurs à 5 % par rapport aux mesures, renforce la fiabilité de notre approche.

En conclusion, ce travail a permis de dégager des outils concrets pour le dimensionnement et l'optimisation des bassins de dissipation d'énergie. Les équations obtenues constituent une base de données expérimentale originale, spécifiquement adaptée aux canaux rectangulaires composés avec lits rugueux. Cette contribution est un apport significatif pour la communauté scientifique et les ingénieurs, car elle offre une méthode fiable et réaliste pour des applications concrètes en hydraulique urbaine, en gestion des ouvrages de protection et en aménagement des canaux.

En définitive, cette recherche constitue une avancée significative en comblant une lacune importante dans la littérature. Elle offre une synthèse complète allant de l'analyse théorique à la validation expérimentale pour la modélisation du ressaut hydraulique dans les canaux rectangulaires composés rugueux. Les résultats démontrent fortement que la prise en compte conjointe de la géométrie du canal et de la rugosité des lits est absolument indispensable pour prédire avec précision le comportement du ressaut.

Ce travail apporte une double contribution : une contribution théorique en enrichissant la littérature existante, et une contribution pratique en fournissant des outils de prédiction fiable pour l'ingénierie hydraulique. Il confirme que la généralisation des résultats des canaux prismatiques simples aux canaux composés rugueux et à la conception des ouvrages hydrauliques notamment les bassins d'amortissement.

Ainsi, on recommanderait pleinement dans la continuité des recherches scientifiques postérieur dans ce domaine visant à mieux approfondir et connaître les mécanismes de dissipation d'énergie dans les écoulements à surface libre.

Références bibliographiques

A

Abbaspour, A., Dalir, A. H., Farsadizadeh, D., & Sadraddini, A. A. (2009). Effect of sinusoidal corrugated bed on hydraulic jump characteristics. *Journal of Hydro-environment Research*, 3(2), 109-117.

Achour, B. (1997). Dissipateurs d'énergie par ressaut, Thèse de Doctorat, Université de Tizi-Ouzou.

Achour, B. (1998). Dissipation d'énergie par ressaut (Thèse d'État). Université de Tizi-Ouzou, Institut de Génie-Civil.

Achour, B. (2000). Ressaut hydraulique dans une galerie circulaire brusquement élargie. *Journal of Hydraulic Research*, 38(4), 307-311.

B

Bélangier, J. B. (1841). Notes sur l'Hydraulique.

Benabdesselam, a. (2020). Approches theoriques et experimentales du ressaut hydraulique dans un profil de canal compose (doctoral dissertation, université mohamed khider–biskra).

Bousmar, D., Wilkin, N., Jacquemart, J. H., & Zech, Y. (2004). Overbank flow in symmetrically narrowing flood plains. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(4), 305-312.

Bousmar, D. (2002). Flow modelling in compound channels: Momentum transfer between main channel and prismatic or non-prismatic floodplains. PhD Thesis, Université catholique de Louvain.

Bousmar, D., Riviere, N., Proust, S., Paquier, A., Morel, R., & Zech, Y. (2005). Upstream discharge distribution in compound-channel flumes. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(5), 408–412.

C

Carollo, F. G., Ferro, V., & Pampalone, V. (2007). Hydraulic jumps on rough beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(9), 989-999.

D

Djamaa, W., & Ghomri, A. (2020). Study of experimental approach of the relative length of the surface role of the hydraulic jump evolving in a rectangular channel of section composed with rough bottom. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*.

Djamaa, W., Ghomri, A., & Khechana, S. (2021). Study of the experimental approach of the relative threshold of the hydraulic jump evolving in a rectangular channel of composed section with rough minor bed. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*.

F

Forster, J. W., & Skrinde, R. A. (1950). Control of hydraulic jump by sills. *Transactions, ASCE*, 115, 973-987.

Felder, S., & Chanson, H. (2011). Energy dissipation down a stepped spillway with nonuniform step heights. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), 1543-1548.

E

Ead, S. A., & Rajaratnam, N. (2002). Hydraulic jumps on corrugated beds. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(7), 656-663.

G

Ghomri, A., & Riguet, F. (2010). Contribution to the Experimental Study on the Hydraulic Jump Evolving in a U-Shaped Channel with Rough Bed. *Journal of Fundamental and Applied Sciences*, 2, 254-271.

Gupta, S. K., Mehta, R. C., & Dwivedi, V. K. (2013). Modeling of relative length and relative

energy loss of free hydraulic jump in horizontal prismatic channel. *Procedia engineering*, 51, 529-537.

H

Hachemi Rachedi, L. (2006). Analyse d'un écoulement au travers d'une contraction latérale (Mémoire de Magister). Université de Biskra.

Hager, W. H., & Sinniger, R. (1986). Flow characteristics of the hydraulic jump in a stilling basin with an abrupt bottom rise. *Journal of Hydraulic Research*, 23, 101–113; 24, 207–215.

Hager, W. H., & Bremen, R. H. (1989). Classical hydraulic jump; sequent depth. *Journal of Hydraulic Research*, 27(5), 565-585.

Hager, W. H., Bremen, R. H., & Kawagoshi, N. (1990). Classical hydraulic jump; length of roller. *Journal of Hydraulic Research*, 28(5), 591-608.

Haroun, K., Ghomri, A., Besser, D., & Herri, I. (2025). A Semi-Theoretical Study on the Effect of Rough Beds on the Conjugate Depth Ratio in Hydraulic Jumps. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 15(3), 23082–23087.

Herri, I., Kateb, S., Ghomri, A., Khechiba, H., & Besser, D. (2025). Experimental investigation of the sequent depth ratio in hydraulic jumps occurring in a sloped compound rectangular channel with a rough minor bed. *Water Practice and Technology*, 20(8), 1745–1762. <https://doi.org/10.2166/wpt.2025.101>

Hughes, W. C., & Flack, J. E. (1984). Hydraulic jump properties over a rough bed. *Journal of Hydraulic engineering*, 110(12), 1755-1771.

K

Kateb, S., Debabeche, M., & Zegait, R., Baouia, K. (2018). Approche expérimentale de la longueur du ressaut hydraulique dans un canal triangulaire à parois rugueuses. *Journal of Advanced Research in Science and Technology*.

Khattaoui, M., & Achour, B. (2012). Ressaut hydraulique dans un canal rectangulaire composé. *Revue scientifique et technique LJEE*, 20.

L

Leutheusser & Kartha (1972). Effects on inflow condition on hydraulic jump, *J. Hydraulic Research*.

M

Mohamed Ali, H. S. (1991). Effect of roughened-bed stilling basin on length of rectangular hydraulic jump. *Journal of Hydraulic Engineering*, 117(1), 83-93.

P

Peterka, A. J. (1964). *Hydraulic design of stilling basins and energy dissipators*, US Bureau of Reclamation.

Peltier, Y., Proust, S., Riviere, N., Paquier, A., & Shiono, K. (2013). Turbulent flows in straight compound open-channel with a transverse embankment. *Journal of Hydraulic Research*, 51(4), 444–458.

Proust, S. (2005). *Écoulements non-uniformes en lits composés : effets de variations de largeur du lit majeur*. PhD Thesis, INSA Lyon.

Proust, S., Bousmar, D., Rivière, N., Paquier, A., & Zech, Y. (2010). Energy losses in compound open channels. *Advances in Water Resources*, 33(1), 1–16.

R

Rajaratnam, N. (1968). Hydraulic jumps on rough beds. *Transactions of the Engineering Institute of Canada*, 11(A-2).

Rand, W. (1957). *An approach to generalized design of stilling basins*. Trans. New York

Academy of Sciences, 20(2), 173-191.

Riguet, F., Debabeche, M., & Ghomri, A. (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(1), 56-65.

W

Wang, H., Yang, K. J., Cao, S. Y., & Liu, X. N. (2007). Computation of momentum transfer coefficient and conveyance capacity in compound channels. *Journal of Hydrodynamics*, 19(2), 225–229.

S

Silvester, R. (1964). *Hydraulic jump in all shapes of horizontal channels*, ASCE.

Z

Ziani, S. (2015). *Dissipation d'énergie par Ressaut Hydraulique dans une conduite circulaire avec banquettes (Mémoire de Magistère)*. Université de Bejaia.

Annexe

Tableau II.2 : Erreurs relatives entre les valeurs calculées par l'équation (II.17) et les données expérimentales.

Y_{exp} Les valeurs expérimental	Y_{app} Les valeurs prédites	$\Delta Y/Y$ (%) Les erreurs relatives	Y_{exp} Les valeurs expérimental	Y_{app} Les valeurs prédites	$\Delta Y/Y$ (%) Les erreurs relatives
5.50	5.497771676	0.040514983	5.80	5.89510376	-1.639720001
5.72	5.780459948	-1.056992092	6.08	6.183200084	-1.697369805
6.00	6.067784845	-1.129747422	6.20	6.255916844	-0.901884576
6.10	6.14029745	-0.660613926	6.38	6.475711348	-1.50017787
6.32	6.359501084	-0.625017156	6.62	6.77256623	-2.304625829
6.80	6.805303483	-0.077992399	7.06	7.149639652	-1.269683458
7.00	7.03184387	-0.45491243	7.30	7.379037634	-1.082707317
7.20	7.260773102	-0.844070867	7.78	7.688526891	1.175746901
7.56	7.569681845	-0.12806673	8.14	8.160409082	-0.250725828
8.00	7.804082264	2.448971706	8.74	8.56053387	2.05338822
8.44	8.521004243	-0.959765912	9.10	9.131020446	-0.340884019
9.20	8.846122618	3.846493279	9.78	9.966383676	-1.905763554
9.52	9.175158003	3.622289886	10.14	10.307099	-1.647919111
10.00	10.01455921	-0.145592143	4.97	4.94513804	0.433462281
4.90	4.912613747	-0.257423416	5.00	5.058072445	-1.161448904
5.07	5.025678283	0.808981252	5.20	5.229014482	-0.557970817
5.20	5.196829093	0.06097899	5.30	5.343993484	-0.830065727

5.33	5.369825297	-0.684224321	5.40	5.459779338	-1.107024776
5.47	5.427897107	0.709199254	5.70	5.752734446	-0.925165721
5.63	5.603321032	0.532762741	6.07	5.990640774	1.253174048
5.83	5.780542033	0.904993719	6.33	6.231647337	1.605568367
6.13	6.079850896	0.871996255	6.53	6.537200225	-0.059187117
6.53	6.261769894	4.156583248	6.97	6.847450597	1.711235453
6.77	6.692937732	1.089590165	7.37	7.16232233	2.773905027
7.10	7.006554249	1.316137333	7.73	7.610768978	1.58488391
7.57	7.453352906	1.497538688	8.13	8.133955346	-0.007647702
8.07	7.777923609	3.579459397	8.60	8.600886358	-0.010306486
8.53	8.30646038	2.658667423	8.97	8.803567902	1.818945327
8.87	8.642461351	2.528631379	4.20	4.208680373	-0.206675559
4.09	4.001108994	2.070758896	4.34	4.300540758	0.974390445
4.34	4.275095834	1.560293301	4.50	4.532980999	-0.732911087
4.39	4.367722373	0.410239045	4.76	4.674334341	1.740719565
4.53	4.507861841	0.457309495	5.01	5.058072445	-0.873239648
4.70	4.649426763	1.076026328	5.16	5.204481692	-0.91792754
4.77	4.744587648	0.562534315	5.44	5.451482292	-0.158467307
4.89	4.840370738	0.928084306	5.81	5.702162111	1.928415781
4.91	4.936771666	-0.45756298	6.07	5.905316059	2.735970797
5.14	5.131410014	0.222583054	6.44	6.162474496	4.351837095
5.34	5.328469481	0.269287786	6.76	6.581235921	2.603273902
5.71	5.578149981	2.382375327	7.00	6.634204973	5.225643246

5.97	5.831503921	2.343235779	7.56	7.22584479	4.383906374
6.31	6.088474256	3.576199567	3.73	3.682190651	1.149244278
6.66	6.45420489	3.048424398	3.88	3.797826189	1.991582229
7.03	6.880549826	2.105998406	3.90	3.87555717	0.626739235
3.65	3.623175834	0.734908657	3.93	3.953796391	-0.733666002
3.68	3.661517497	0.366870817	4.08	4.07210039	0.07115607
3.85	3.855173428	-0.134374764	4.10	4.111785359	-0.287447782
4.00	3.972908265	0.677293381	4.23	4.191528189	0.792232217
4.03	4.01240736	0.312860617	4.50	4.474500038	0.566665816
4.18	4.091784123	1.993194668	4.70	4.638864337	1.300758784
4.28	4.252039861	0.53707927	4.85	4.763391153	1.785749416
4.40	4.373532852	0.601526087	5.13	4.888981373	4.605241504
4.60	4.496128891	2.258067576	5.40	5.186106636	3.960988219
4.78	4.619817288	3.249899723	5.75	5.315172851	7.562211292
4.95	4.744587648	4.149744477	5.93	5.620291201	5.142764543
5.10	4.997334089	2.013057088	6.40	5.975680348	6.629994555
5.35	5.25429051	1.788962427	6.68	6.201353451	7.095828444
5.60	5.603321032	-0.059304147	6.30	5.946837009	5.605761757
5.90	5.73606939	2.778484917	6.43	6.171420836	3.946757414
6.33	5.959540504	5.778015752	6.80	6.536312747	3.877753726
5.00	5.101485153	-2.029703052	5.76	5.909151771	-2.589440467
5.28	5.375712664	-1.812739845	5.92	6.051811524	-2.226546006
5.50	5.584411724	-1.534758621	6.08	6.267856283	-3.08974149

5.70	5.724967219	-0.438021394	6.22	6.413243103	-3.106802306
6.04	6.081263905	-0.683177233	6.42	6.486340318	-1.033338288
6.24	6.225720863	0.22883233	6.70	6.855821951	-2.32570076
6.52	6.591629454	-1.098611251	7.08	7.231869029	-2.145042784
6.88	6.889187214	-0.133535084	7.44	7.69162005	-3.381989915
7.04	7.190967173	-2.144420064	7.76	8.003176407	-3.133716589
7.52	7.49690603	0.307100668	8.10	8.318711567	-2.700142798
7.88	7.963480364	-1.059395483	8.62	8.88031132	-3.0198529
8.28	8.359196282	-0.956476831	9.10	9.453658737	-3.886359747
8.68	8.761074951	-0.934043214	9.78	10.03849762	-2.643124967
9.20	9.33386687	-1.455074678	10.42	10.8069333	-3.713371407
9.80	9.834088853	-0.347845441	10.74	11.06712828	-3.045887123
10.12	10.42826302	-3.046077296	4.40	4.458334108	-1.325775175
10.82	11.29641184	-4.403066883	4.57	4.621429487	-1.199185857
4.47	4.480031504	-0.299212787	4.83	4.841819591	-0.175577751
4.53	4.589079178	-1.229687739	4.97	5.065507921	-1.990092375
4.73	4.754234309	-0.441569902	5.10	5.235407217	-2.655043466
4.90	4.92126891	-0.434059381	5.17	5.292442407	-2.434369165
5.00	5.033658204	-0.673164089	5.60	5.638822464	-0.693258292
5.10	5.090160254	0.192936198	5.80	5.814659601	-0.25275174
5.30	5.318199163	-0.343380428	6.10	6.11157755	-0.189795896
5.50	5.49133885	0.157475448	6.43	6.413243103	0.312283366
5.60	5.66626495	-1.183302673	6.87	6.905584965	-0.566771332

5.83	5.842957834	-0.164991435	7.20	7.156140349	0.609161824
6.10	6.081263905	0.307149101	7.63	7.473372134	2.095561558
6.47	6.567025612	-1.551942457	8.03	7.859882518	2.159138783
6.67	6.814399408	-2.215991119	8.50	8.318711567	2.132805098
7.13	7.317939812	-2.587941288	4.07	4.12283319	-1.262569577
7.53	7.445630012	1.164203382	4.20	4.259055395	-1.406080843
7.90	7.832962762	0.848572634	4.34	4.396703586	-1.239885194
8.33	8.292812857	0.486245721	4.56	4.582425313	-0.554787425
8.70	8.626436987	0.845551875	4.71	4.770617654	-1.194919927
9.17	9.306325578	-1.523551759	4.74	4.770617654	-0.585311976
3.67	3.65351798	0.487837119	4.90	5.009279519	-2.230194263
3.84	3.785003452	1.50548638	5.13	5.251682557	-2.400495536
3.91	3.917985232	-0.094513227	5.41	5.448257017	-0.627438313
4.06	4.007462073	1.224526362	5.64	5.697240431	-0.963754475
4.16	4.142897803	0.342664539	5.99	5.949799166	0.600013927
4.26	4.233994558	0.543752001	6.24	6.205878997	0.592327283
4.41	4.3718368	0.961625899	6.59	6.622801896	-0.56315244
4.57	4.604726625	-0.728394916	7.04	6.887799081	2.201635768
4.87	4.841495681	0.614458161	7.24	7.210205925	0.450805763
4.97	4.937274155	0.68701413	3.45	3.421102418	0.837611081
5.09	5.082076033	0.071538684	3.53	3.533303308	-0.235554828
5.10	5.082076033	0.35145034	3.63	3.608752502	0.448206837
5.17	5.228226671	-1.098305787	3.70	3.722889587	-0.618637497

5.53	5.574415417	-0.829219431	3.90	3.876850978	0.593564678
5.81	5.927712743	-1.950833425	4.00	3.993640201	0.158994967
6.06	6.184335437	-2.099877494	4.03	4.032818688	-0.194253122
6.31	6.444454466	-2.061496061	4.23	4.111546218	2.685296622
6.57	6.708019442	-2.078556733	4.38	4.310507224	1.474120595
7.03	6.974982043	0.762450604	4.48	4.43133657	0.975719112
7.37	7.190967173	2.448119753	4.75	4.676214864	1.553371276
7.69	7.409074133	3.599407195	4.90	4.841819591	1.18735528
7.91	7.963480364	-0.621593047	5.33	5.221179722	1.949676584
3.18	3.215827207	-1.285896269	5.60	5.479182504	2.157455278
3.35	3.28926854	1.812879398	5.95	5.785232123	2.769208025
3.43	3.400432283	0.717305601	6.28	6.231678623	0.690380512
3.45	3.475203219	-0.730528091	9.80	9.709429696	0.924186773
3.60	3.588342194	0.323827951	10.30	10.24597856	0.524480033
3.70	3.702648508	-0.071581291	10.80	10.79178671	0.076049015
3.83	3.779494889	1.189676112	11.55	11.34668635	1.760291359
3.93	3.818109336	2.723329022	12.05	11.91051827	1.157524771
4.20	4.052445227	3.513208882	6.05	5.864206183	3.07097218
4.30	4.091938645	4.838636164	6.95	7.172158179	-3.196520566
4.33	4.171296573	3.553836462	7.15	7.172158179	-0.309904606
4.63	4.3718368	5.473798928	7.50	7.659531098	-2.127081301
4.78	4.575401819	4.180066611	7.80	7.956893893	-2.011460161
5.00	4.781943514	4.361129722	8.00	7.956893893	0.538826343

5.20	4.907278134	5.629266651	8.15	8.359037382	-2.564875853
5.40	5.203775141	3.633793689	8.65	8.664828815	-0.17143139
5.68	5.332558749	6.034207073	9.00	8.76754723	2.582808552
5.98	5.724967219	4.184649047	9.50	9.182317299	3.344028434
3.68	3.895133866	-5.846028962	4.63	4.861764083	-5.038112911
4.08	4.280904737	-4.924135713	4.74	4.959247419	-4.562445586
4.24	4.478165797	-5.617117856	4.91	5.106642203	-3.914230865
4.48	4.611262257	-2.929961102	5.09	5.25542793	-3.337066044
4.64	4.745614731	-2.276179543	5.26	5.355384231	-1.868721781
4.84	4.813258007	0.552520522	5.37	5.607925955	-4.402876829
5.16	5.156083596	0.075899308	5.60	5.709992757	-1.964156372
5.40	5.365413362	0.640493288	6.26	6.124166512	2.125192728
5.56	5.506457283	0.962998503	6.54	6.387751127	2.370615963
5.92	6.155606378	-3.979837468	6.86	6.925581795	-0.998067846
6.24	6.451544746	-3.390140152	7.17	7.199727576	-0.394607635
6.40	6.751946818	-5.499169026	7.66	7.87155917	-2.800213038
6.64	6.980134839	-5.122512639	2.73	2.926279313	-7.386396819
6.96	7.365861242	-5.831339689	4.23	4.070480574	3.65726453
5.86	5.967751884	-1.888446802	4.33	4.19146014	3.087626823
7.68	7.365861242	4.090348407	4.40	4.19146014	4.739542275
8.12	7.758244173	4.455121019	4.15	3.950654516	4.803505641
8.36	8.157163002	2.426279881	5.10	5.330338007	-4.516431502
8.96	8.562503267	4.436347465	5.20	5.330338007	-2.506500126

9.40	8.97415617	4.530253505	5.43	5.624895655	-3.525686909
9.96	9.392018127	5.702629248	5.60	5.624895655	-0.444565275
3.08	3.035123547	1.296795213	5.70	5.864206183	-2.88081023
3.25	3.294040484	-1.355091804	5.80	6.045795372	-4.237851239
3.35	3.36926801	-0.575164479	6.10	6.045795372	0.888600462
3.50	3.483135406	0.481845543	6.37	6.352399052	0.224098656
3.73	3.67561554	1.325757306	6.70	6.601192334	1.474741277
3.83	3.792701939	0.844393755	7.20	6.853060408	4.818605438
3.95	3.871417328	1.989434735	7.57	7.365861242	2.65381618

Tableau III.2 : Écarts relatifs entre les longueurs normalisées de ressaut hydraulique (L_j/h_1), issues des mesures expérimentales et celles estimées à partir de l'équation d'ajustement, pour le lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm).

Lj/h₁ exp Les valeurs expérimentales	Lj/h₁rel Les valeurs issues des relations globales	Les erreurs relatives (%)	Lj/h₁ exp Les valeurs expérimentales	Lj/h₁ app Les valeurs issues par les relations globales	Les erreurs relatives (%)
64,1	61,95597	3,34482055	51,7142857	51,1860061	-2,96035719
65,7	65,3045003	0,6019782	36,75	37,6661254	-2,4928581
68,9	68,7122628	0,27247779	38	38,9574663	-2,51964808
56,8333333	55,5719367	2,21946627	40,75	39,8263862	2,26653682
57,5	56,9109839	1,0243758	42,5	41,1416878	3,19602874
44,5	45,1622853	-1,48828149	41,5	42,4711584	-2,34014078
47,9285714	48,4002706	-0,98417112	61,3	64,7574462	-5,64020587
42	40,9629071	2,46926887	55,7142857	52,9275932	-2,3461747
44,25	41,4155333	6,40557438	57,7142857	55,2797202	0,7799893

49,8333333	48,6481598	2,37827457	59,7142857	56,4685063	2,15852877
61,2	58,7833717	3,94873905	52,1666667	50,4993422	3,1961491
62,8	61,9893075	1,29091155	54,1666667	53,0031637	2,14800548
64,4	64,4307276	-0,04771361	46,6428571	45,1010536	3,30555122
66	66,0757184	-0,11472485	47,7857143	46,6472927	2,38234708
68	70,2481747	-3,30613924	48,9285714	48,2108091	1,46695944
49	51,5273611	-5,15787985	37,75	35,6633746	5,52748441
50,6666667	52,7996062	-4,20974904	42,5714286	43,8677795	-3,0451197
54,3333333	54,727264	-0,72502578	47,4285714	48,3268777	-1,89401933
57	56,677826	0,56521746	63	61,6138764	2,20019621
58,3333333	57,9907936	0,58721092	67,5	68,17303	-0,99708151
60,3333333	58,6510264	2,78835399	72	73,8054542	-2,50757533
39,4285714	41,89966	-6,26725361	46,4	47,9874779	-3,42128856
41,7142857	43,4293723	-4,11150896	46	43,9592025	4,43651639
43,4285714	44,9772605	-3,56606032	48,3333333	47,1986526	2,34761533
46	46,0191792	-0,04169381	50,3333333	51,860981	-3,03506169
47,7142857	47,5968952	0,2460281	53,3333333	53,9035016	-1,06906558
48,5714286	48,6585118	-0,17928893	55,3333333	55,2797202	0,09689112
50,2857143	50,265502	0,0401948	58	58,7704461	-1,32835529
51,7142857	52,9821984	-2,45176481	49,7142857	48,3268777	-1,89401933
60,3333333	60,8988262	-0,93728102			
62,3333333	63,7756457	-2,3138701			
64,3333333	65,9621223	-2,53179628			
41,1428571	40,0858824	2,56903578			

Tableau III.3 : Écarts relatifs entre les longueurs relatives du ressaut hydraulique (L_j/h_1), obtenues expérimentalement et celles obtenues par l'équation d'ajustement globales, dans le cas du lit majeur ($15,5 \leq h_2 < 28$ cm).

Lj/h₁ exp Les valeurs expérimentales	Lj/h₁relation Les valeurs issues par la relation globale	Les erreurs relatives (%)	Lj/H₁ exp Les valeurs expérimental	Lj/h₁ app Les valeurs prédites	Les erreurs relatives (%)
76,3	75,66001316	0,838776986	104,8333333	109,5432663	-4,492781825
78,7	78,49118482	0,265330602	109,8333333	118,3042314	-7,712502024
82,1	84,25649434	-2,626667893	65,21428571	64,05199302	1,782267004
86,9	87,18982751	-0,333518419	67,5	64,05199302	5,108158491
88,1	90,15643276	-2,334202911	70,07142857	65,92053613	5,923801648
94,5	94,16302689	0,356585304	73,21428571	70,34950026	3,912877692
100,1	97,20585246	2,891256286	74,92857143	74,87343722	0,073582363
104,5	106,5255387	-1,938314505	77,21428571	78,16188057	-1,227227378
106,9	110,7580382	-3,609016052	80,35714286	81,49710513	-1,418619713
109,7	115,0451543	-4,872519894	84,64285714	84,87846369	-0,278353727
65,16666667	64,0960869	1,642833405	87,21428571	88,3053352	-1,250998596
68,83333333	66,32754904	3,640364588	89,21428571	91,07920002	-2,090376327
68,5	67,07700847	2,077359901	90,64285714	93,88151598	-3,572988472
71,5	69,34215568	3,017964087	63,5	60,2172006	5,169762838
75,16666667	71,63224154	4,702117684	64,75	61,81819706	4,527880992
78,83333333	75,50374466	4,223579712	68	65,60786988	3,517838408
83,16666667	77,85904295	6,381912283	70,25	67,25488192	4,263513286
85,5	83,44763546	2,40042636	74	72,27681776	2,328624649
87,83333333	87,5178141	0,35922493	76,75	75,11843289	2,12582034
89,83333333	93,32353792	-3,885199915	78,5	77,99634185	0,641602737
93,33333333	97,54593105	-4,513497553	81,75	82,67536521	-1,131945205
98,5	104,4299922	-6,020296658	77,1	77,3601774	-0,337454468
102	108,8113204	-6,677765136	78,7	78,27567655	0,539165754
57,35714286	53,82660101	6,155365618	81,9	82,90664427	-1,229113879

60,5	57,4546221	5,033682479	85,1	87,6254992	-2,967684132
61,35714286	58,68138556	4,360954844	88,7	93,40187911	-5,30087836
62,5	59,91675807	4,133187088	92,3	97,32052624	-5,439356706
68,21428571	63,67394009	6,656004064	95,9	101,2924924	-5,623036899
69,92857143	66,22071273	5,302351555	102,3	108,3696229	-5,933160185
73,07142857	69,45064404	4,95513034	105,9	115,6043051	-9,163649786
75,64285714	72,73144563	3,848891517	111,5	122,99318	-10,30778471
76,78571429	76,06234062	0,942068028	64,16666667	60,94737915	5,017071449
80,78571429	80,80834328	-0,028011139	68,16666667	63,06922116	7,477915175
84,78571429	86,34832075	-1,843006786	69,5	63,78186353	8,227534484
65,5	62,25607908	4,952551026	71,16666667	68,11332167	4,290414513
67,75	65,58090186	3,201620867	73,16666667	70,31436558	3,898361392
70,25	70,10276012	0,209594137	76,16666667	74,03423268	2,799694512
72	71,82419925	0,244167711	80,5	77,8174782	3,332325219
73,5	74,72401967	-1,665332884	84,5	83,99990995	0,591822541
87,7	89,66001245	-2,234905871	87,83333333	87,14970528	0,778324157
91,1	92,62111346	-1,669718392	91,16666667	91,14091588	0,028245834
97,1	96,61880956	0,495561732	94,83333333	96,00835049	-1,239033906
99,9	102,7199579	-2,822780669	98,5	101,7927017	-3,342844327
104,3	107,8985209	-3,450163864	59,07142857	55,21439764	6,529435681
108,7	115,2896885	-6,062270963	60,78571429	57,56375362	5,300522834
66,83333333	65,24143975	2,381885666	62,78571429	57,56375362	8,317115963
69,33333333	66,71856975	3,771293623	65,35714286	60,54597022	7,36135704
69,5	68,20668239	1,860888641	67,92857143	63,57797914	6,404657412
72,66666667	71,97448923	0,952537751	71,64285714	66,03889473	7,82208114
74,66666667	75,03698206	-0,495958122	73,64285714	69,15852758	6,089293301
78,16666667	78,1417195	0,03191535	77,92857143	72,325793	7,18963318
81,83333333	82,08118587	-0,302874787	79,92857143	75,53998514	5,490635218
86,16666667	86,0847156	0,095107623	82,21428571	80,77862504	1,746242354

88,16666667	90,15129951	-2,251001331	84,78571429	84,11173587	0,79491978
93,16666667	95,94862278	-2,985999408	86,5	88,17031998	-1,931005758
57,28571429	53,53456192	6,548146276	108,5	106,8325372	1,536832072
60	56,51380641	5,810322657	109,5	106,8325372	2,436039085
60,71428571	58,32699856	3,93200237	112,5	112,3104786	0,168463507
62,57142857	58,32699856	6,783335633	113,5	116,4784416	-2,62417758
66,5	63,25447747	4,880485005	114,5	117,8789746	-2,951069535
69,92857143	65,13635288	6,85301938	116,5	123,536576	-6,039979441
73,07142857	68,31339427	6,51148389	69,83333333	71,16136924	-1,901722067
75,35714286	71,54047295	5,064775237	72,5	75,15116141	-3,656774358
76,5	74,15764805	3,061897968	75,16666667	75,15116141	0,020627837
78,21428571	77,47289109	0,947901809	80,83333333	78,39482253	3,01671439
82,35714286	82,87679973	-0,630979728	84,5	80,85737635	4,310797217
84,07142857	83,56078768	0,607389336	87,16666667	80,85737635	7,238191566
88,71428571	91,20706603	-2,809897298	88,5	85,01763606	3,934874512
66,75	65,05757479	2,535468481	90,16666667	88,39557816	1,964238638
68,25	66,71856975	2,243853839	93,83333333	91,81710962	2,148728646
69,25	70,64808266	-2,018891933	98,16666667	98,78876718	-0,633718693
71,5	75,22979652	-5,21649863	100,5	100,5580922	-0,057803179
75,75	78,1417195	-3,157385481	104,83333333	105,0269409	-0,184681339
90,3	91,07920002	-0,862901465	65,64285714	64,82104555	1,251943668
93,5	95,01034433	-1,615341531	68,21428571	66,1394147	3,041695726
97,9	101,0099236	-3,176632857	69,92857143	68,13348523	2,567028271
99,9	106,1022763	-6,208484754	72,5	70,14720257	3,245237841
106,7	111,2774405	-4,290009846	75,07142857	71,5005017	4,756705627
112,3	118,6593215	-5,662797401	76,21428571	71,5005017	6,184908729
71,25	72,94779565	-2,382871094	77,35714286	74,92122425	3,148925256
67,5	67,07120911	0,63524576	78,5	76,30436369	2,796988935
69,16666667	69,28629496	-0,172956571	79,92857143	79,79888824	0,162248849

71,16666667	71,52524285	-0,503854118	81,07142857	81,9205036	-1,047317215
76,83333333	73,78780111	3,963816338	84,21428571	85,49750912	-1,523759769
80,5	76,84085232	4,54552507	89,07142857	92,80261899	-4,188986832
83,5	83,06936971	0,515724899	98,78571429	105,6706187	-6,9695345
84,5	86,24378468	-2,063650513	47,5	51,45025619	-8,316328822
92,16666667	94,35131451	-2,370323162	50,25	52,5184065	-4,514241797
97,5	99,33110992	-1,878061459	51,5	54,13428772	-5,115121785
101,5	105,2477639	-3,692378196	53,5	55,76640963	-4,236279678
62,75	62,45417194	0,471439133	55,5	55,76640963	-0,480017347
65,25	64,16518649	1,662549437	58,75	56,86343429	3,21117568
66,75	68,2169992	-2,197751611	60,25	58,5222707	2,867600492
68,75	69,97864706	-1,787122993	61,75	59,63696208	3,421923765

Tableau III.5 : Écarts relatifs entre les mesures expérimentales des longueurs du rouleau de surface du ressaut hydraulique (L_r/h_1), et celles estimées à partir de l'équation globale d'ajustement, pour le lit mineur ($0 < h_2 < 15,5$ cm).

Lr/h₁ exp Les mesures expérimentales	Lr/h₁relation Les valeurs issues de la relation globale	Les erreurs relatives (%)
46,8	44,8550179	4,15594461
47,6	47,1949923	0,85085647
52,4	50,1759178	4,24443174
39,3333333	40,0168594	-1,73777823
40,6666667	40,9510819	-0,69938167
31,8571429	32,497144	-2,00897232
33,4285714	34,7551448	-3,96838197
28,5	29,3861293	-3,10922556
29,75	29,7015422	0,16288324

45	47,2407046	-4,97934354
47,2	49,5829587	-5,04864128
50,8	50,1744016	1,23149285
40	39,5293597	1,1766007
42,3333333	40,4450753	4,46045207
28,5	29,3109006	-2,84526535
31	30,244656	2,43659341
36,6666667	37,2480698	-1,58564496
38	38,5756471	-1,51486072
39,6666667	39,4692695	0,49764002
28,1428571	28,5174399	-1,33100463
30,4285714	29,5585815	2,85912193
32,1428571	30,6120938	4,76237487
33	31,3212368	5,08716107
33,8571429	32,3950504	4,31841663
34,7142857	33,1176001	4,59950591
35,2857143	34,211338	3,04479095
25	25,0556177	-0,222471
26,25	25,6360425	2,33888566
26,75	26,5149455	0,87870834
28	27,1063435	3,19163046
44,4	46,6297388	-5,02193413
47,8	48,3184414	-1,08460553
33,6666667	34,2031291	-1,59345279
36,6666667	35,4724441	3,25697059
39	37,1886711	4,64443317
31	31,5941417	-1,91658621

33,4285714	32,6531091	2,31975922
25,5	26,14727	-2,53831369
26,75	27,0171908	-0,99884395
27,25	27,6023881	-1,2931673
41	42,8450478	-4,50011661
47	47,406151	-0,86415116
52,5	51,3228253	2,24223747
53,5	53,7220968	-0,41513417
31,3333333	32,8209917	-4,74784591
34,3333333	36,063081	-5,03809989
36,6666667	37,4834086	-2,22747804
37	38,4404033	-3,89298188
40	40,8677837	-2,16945918
43	42,3478163	1,51670621
44,6666667	44,3482986	0,71276429
46,3333333	45,8687304	1,00274023
32,2857143	33,6055367	-4,08794568
34,5714286	35,593717	-2,9570327
38,7142857	38,4404033	0,70744536
40,1428571	39,2670611	2,18169827
42,1428571	40,5179893	3,85561865
25,5	25,9098935	-1,60742566
28,75	28,1528904	2,07690289

Tableau III.6 : Écarts relatifs entre les longueurs du rouleau du ressaut hydraulique (L_r/h_1), issues des mesures expérimentales et celles estimées à partir de l'équation d'ajustement, pour le lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm).

Lr/h₁ exp Les valeurs expérimentales	Lr/h₁ app Les valeurs issues de la relation globale d'ajustement	Les erreurs relatives (%)	Lr/h₁ exp Les valeurs expérimentales	Lr/h₁ app Les valeurs issues de la relation globale d'ajustement	Les erreurs relatives (%)
70,66666667	69,07470916	-2,252770051	72	73,1891417	1,651585696
64,6	61,58233785	-4,671303636	74,66666667	76,17622782	2,021733689
65,8	63,66193359	-3,249341054	78,66666667	82,2685902	4,578716353
67,4	65,7644251	-2,426668985	42,28571429	44,54166265	5,33501303
69,4	68,60293758	-1,14850493	44,57142857	45,84104481	2,848497975
71,8	70,75790675	-1,451383356	46,57142857	48,92094002	5,044963228
74,6	77,35455142	3,692428177	50	52,06687919	4,133758372
76,2	80,34871738	5,444510998	52,57142857	54,3536579	3,390110144
79,8	83,38054827	4,486902599	54,28571429	56,6729682	4,397573007
86,6	91,12191682	5,221612955	55,71428571	59,02436002	5,941159019
49,66666667	46,84727165	-5,676634271	58,1	55,58665179	-4,325900528
51,33333333	48,42927372	-5,657258983	48,25	45,62361716	-5,443280501
59	54,92960905	-6,898967718	62,5	59,47902621	-4,833558068
60	56,59687957	-5,671867387	65,7	62,78908525	-4,430616054
61,66666667	60,55120523	-1,80885639	68,5	66,83923786	-2,424470273
63	63,42973215	0,682114521	71,7	69,58584542	-2,948611682
66,33333333	67,53381301	1,80976835	73,7	72,36907711	-1,805865517
67,66666667	70,51737009	4,212862196	78,5	77,32643867	-1,494982582
71,33333333	75,37960197	5,672339211	82,9	87,56377751	5,625787101
74,33333333	78,47291973	5,568950312	36,75	35,67782764	-2,917475807

50,75	50,2611938	-0,963164929	37,75	36,03760237	-4,536152666
52	52,23724882	0,456247732	80,9	82,39209464	1,844369147
53,25	54,23854252	1,85641788	39,75	38,22133904	-3,845687945
54,5	57,49232855	5,490511095	43,5	43,75836429	0,59394089
50,71428571	48,0510196	-5,251510653	44,83333333	45,24722827	0,923185726
52,42857143	50,33530367	-3,992608807	45,5	45,74719483	0,54328534
53,85714286	52,65468001	-2,232689632	47,16666667	48,78515332	3,431420463
55,28571429	55,0086255	-0,501194188	49,16666667	50,32837425	2,362795085
57,28571429	58,36127662	1,877540228	52,83333333	52,93574614	0,193841277
59,28571429	62,27297689	5,038756205	55,83333333	55,58665179	-0,441817684
35,75	34,60575145	-3,200695258	58,5	59,91690751	2,422064127
49,5	47,37265857	-4,297659463	59,83333333	62,12230201	3,825574384
51	50,56567097	-0,851625553	64,83333333	68,32240799	5,381606159
52,25	51,78083523	-0,89792301	67,83333333	72,36907711	6,686600168
53,25	53,8273634	1,084250519	38,92857143	39,52896443	1,542293937
61,83333333	64,91615263	4,985691585	40,35714286	41,17587494	2,028716659
56,6	57,75928461	2,048206033	41,5	41,17587494	-0,781024247
58,6	60,44550004	3,149317475	42,92857143	43,26577773	0,785505519
61,4	63,86000931	4,006529818	45,5	45,38988893	-0,242002348
64,2	65,93853497	2,707998393	52,35714286	51,51486763	-1,608711206
66,6	68,74419976	3,219519164	53,78571429	53,76423083	-0,03994268
69	73,02509978	5,833477938	56,07142857	57,42921102	2,421522845
73,8	76,65778313	3,872334869	58,07142857	59,76039845	2,908435207
48,07142857	47,11344267	-1,992838422	66,33333333	63,97489986	-3,555427343
50,07142857	49,29777929	-1,545091284	68	68,0391345	0,057550734

54,33333333	51,2246083	-5,721579808	60,35714286	62,59833368	3,713215569
59	55,55207557	-5,843939708	33	33,36322975	1,100696214
60,66666667	58,31555143	-3,875464674	35,75	34,3827757	-3,82440365
63	61,12338957	-2,978746708	36,75	34,72489131	-5,510499848
76	78,86544372	3,770320679	46,66666667	46,64122113	-0,054526156
36,42857143	38,13584319	4,686628377	47	45,12252304	-3,994631825
39,57142857	40,22710507	1,656944212	48,75	47,38467682	-2,800662942
43	41,49960923	-3,489280867	51	50,07005956	-1,823412633
45,57142857	44,95684286	-1,348620683	52,25	53,99092452	3,331912956
47	46,27689398	-1,538523445	50,33333333	48,1815886	-4,274989536
49	48,50508226	-1,01003621	82	81,83487656	-0,201370047
51,28571429	50,76792701	-1,009613081	82,5	82,81885651	0,386492735
53,85714286	52,60280331	-2,329012424	84	86,79374756	3,325889947
56,14285714	54,92672757	-2,166134105	95,5	102,241077	7,058719333
59,28571429	58,71397156	-0,964385324	100	107,5747389	7,57473892
61	59,19326781	-2,961856046	104,5	112,9980527	8,132107866
65,85714286	64,55038407	-1,984232429	49	49,99622068	2,033103423
32,75	34,31648564	4,783162263	50,66666667	52,79935012	4,209243665
34,5	35,01919881	1,504924074	52,33333333	52,79935012	0,890477943
36,75	36,08213151	-1,817329227	53,66666667	55,07826633	2,630309926
37,25	36,43879018	-2,177744478	55,66666667	56,80839582	2,051010464
40	37,15560612	-7,110984691	56,66666667	56,80839582	0,250110279
41,5	39,7008061	-4,335406983	59,33333333	59,73129155	0,670716103
43,75	41,18024586	-5,873723743	60,66666667	62,10455026	2,370137788
63,33333333	64,50843377	1,855421735	63,33333333	59,97380225	-5,304522757

68	69,4065482	2,068453238	64,66666667	64,47070861	-0,30302793
48,75	46,11119205	-5,41293938	70,66666667	70,64963226	-0,024105292
50	47,27525555	-5,449488904	72,66666667	73,78933503	1,54495646
51,5	50,02873359	-2,85682799	76	80,20364687	5,531114307
53,75	53,23854066	-0,951552258	44,85714286	45,54166583	1,526006617
57	55,27819548	-3,020709692	46,28571429	46,46791943	0,393653098
47,71428571	47,86890414	0,3240506	67	65,61176669	-2,071990014
53,2	54,72257335	2,861979981	48,85714286	49,28369221	0,873054239
56,4	57,98582325	2,811743356	50	50,23448677	0,468973537
61,2	60,64141034	-0,912728196	51,71428571	50,23448677	-2,861489674
64,8	63,33634304	-2,258729878	52,85714286	52,63780195	-0,414969279
67,6	66,07005507	-2,263232152	54	53,60956156	-0,72303414
70,8	70,24215373	-0,787918464	55,14285714	56,06472822	1,671786925
73,6	73,78336838	0,24914182	56,57142857	57,55532277	1,739206925
76,8	77,38217005	0,758033921	58,28571429	60,06843852	3,058595497
80	82,51551933	3,144399163	52	49,7385497	-4,348942886
82,4	87,00217009	5,585157872	61,75	58,55627101	-5,172030745

Tableau III.8 : Écarts relatifs entre les rapports Y du ressaut hydraulique, déduites des mesures expérimentales et ceux estimés à partir de l'équation globale pour le lit mineur.

Y exp Les valeurs expérimentales	Y_{relation} Les valeurs issues de la relation globale	Les erreurs relatives (%)	Y_{exp} Les valeurs expérimentales	Y_{relation} Les valeurs issues de la relation globale	Les erreurs relatives (%)
5,92	5,80202087	1,99289064	4,2	4,19938791	0,01457356
6,2	6,10478575	1,53571369	5,68	5,99733924	-5,58695837

6,2	6,18125433	0,30234949	6,04	6,21990696	-2,97859211
4,9	4,93732492	-0,76173298	4,46666667	4,39508665	1,60253759
5,16666667	5,05629344	2,13625599	4,63333333	4,56233053	1,53243452
4,08571429	4,01247266	1,79262732	4,9	4,78853667	2,2747618
4,34285714	4,30015357	0,98330594	3,91428571	4,07462563	-4,09627516
3,65	3,63937616	0,29106399	4,14285714	4,2143196	-1,72495595
3,875	3,67959004	5,04283769	4,28571429	4,35557449	-1,63007135
6,12	6,02001375	1,63376224	4,6	4,62148456	-0,46705567
6,2	6,32350901	-1,99208086	5	4,98338181	0,33236377
6,32	6,40015709	-1,26830838	5,16	5,13066801	0,56844933
5,1	5,04508746	1,07671643	5,68	5,5810117	1,74275179
5,23333333	5,1637924	1,32880774	5,92	5,8108755	1,84331932
4,76	4,8375326	-1,62883622	6,08	5,96582714	1,87784306
3,875	3,74832892	3,26893109	6,44	6,67969193	-3,72192432
4,025	3,86945407	3,86449506	3,93333333	4,13035775	-5,00909526
5,36	5,20484563	2,894671	4,3	4,53835847	-5,54322028
5,16	5,28020777	-2,32960802	4,53333333	4,71709961	-4,05366781
5,44	5,56818049	-2,35625906	4,7	4,8375326	-2,92622562
5,76	5,78748069	-0,4770953	4,9	5,14300629	-4,95931206
5,96	5,93524175	0,41540687	5,13333333	5,329261	-3,81677278
6,4	6,31003203	1,40574959	5,63333333	5,77235043	-2,46775917
4,86666667	4,91586849	-1,01099644	3,45714286	3,50791868	-1,46872209
5,03333333	5,09107744	-1,14723397	3,82857143	3,83887279	-0,26906534
5,33333333	5,20901456	2,33097692	4,11428571	4,22908882	-2,7903532
5,43333333	5,26831988	3,03705744	4,4	4,37074371	0,66491569
3,51428571	3,76363084	-7,09518642	4,65714286	4,51509138	3,05018517
3,68571429	3,90103702	-5,84208974	4,71428571	4,75911823	-0,95099271

3,85714286	4,04007585	-4,74270725	4	4,13366604	-3,34165108
4,2	4,27538415	-1,7948608			

Tableau III.9 : Écart relatifs entre les rapports Y du ressaut hydraulique, issues des mesures expérimentales et ceux estimés à partir de selon l'équation pour le lit majeur ($15,5 < h_2 < 28$ cm).

Y exp Les valeurs expérimentales	Y_{relation} Les valeurs issues de la relation globale	Les erreurs relatives (%)	Yexp Les valeurs expérimentales	Y_{relation} Les valeurs issues de la relation globale	Les erreurs relatives (%)
7,34	7,363481068	-0,31990556	5,48	5,597614385	-2,14624791
7,82	7,904341136	-1,07853115	5,755	5,749123689	0,102107923
8,02	8,179525455	-1,98909545	6,03	6,107847285	-1,29099975
8,42	8,457831123	-0,44930075	6,38	6,263787675	1,821509795
8,78	8,833701102	-0,61162986	6,555	6,632704974	-1,18543057
9,22	9,119157214	1,093739539	7,03	7,062853325	-0,46733037
9,66	9,993463457	-3,45200266	7,305	7,336235494	-0,4275906
10,42	10,39052626	0,282857374	7,125	6,772998574	4,940370895
10,74	10,79271281	-0,49080829	7,74	7,393701133	4,474145568
11,22	11,82017833	-5,34918301	7,99	7,834606833	1,944845645
6,12	6,013036031	1,747777271	8,35	8,19340972	1,875332699
6,353333	6,222375835	2,061240791	8,51	8,557528687	-0,55850396
6,486667	6,292684753	2,990471429	8,99	8,926887226	0,702033085
6,753333	6,505184649	3,674462254	9,35	9,490589711	-1,50363327
7,053333	6,720024111	4,725556084	9,75	9,96905191	-2,24668626
7,353333	7,083220819	3,673334286	10,15	10,45529483	-3,00783087
7,753333	7,304178044	5,793060485	10,67	11,14887425	-4,48804355
7,986667	7,828459786	1,980887484	11,27	11,75507664	-4,30414053
8,32	8,210294809	1,318572002	6,63	6,301809809	4,950078301

8,786667	8,754946257	0,36100618	6,83	6,509932637	4,686198581
9,286667	9,151060953	1,460219453	6,93	6,720297471	3,026010526
9,753333	9,796874291	-0,4464213	7,163333	6,932880665	3,217114963
10,08667	10,20789914	-1,20190821	7,43	7,219736207	2,829929924
5,205714	5,04962638	2,998395548	7,796667	7,804949035	-0,10622961
5,348571	5,218878941	2,424806127	7,996667	8,103207553	-1,33231621
5,52	5,389981348	2,355410368	8,463333	8,710795602	-2,92393385
5,691429	5,505067514	3,274416173	8,863333	8,864966759	-0,01842902
5,805714	5,620961319	3,18226075	9,23	9,332853412	-1,11433816
6,034286	5,737657173	4,9157192	9,663333	9,888764486	-2,33285084
6,262857	5,973433239	4,621275836	10,03	10,29235702	-2,61572303
6,462857	6,212353217	3,876055432	5,741429	5,729294482	0,211342695
6,834286	6,515362251	4,666522246	5,941429	5,84426148	1,635416309
7,091429	6,82314357	3,783229273	6,055714	6,018133312	0,620586961
7,434286	7,135624293	4,017351938	6,17	6,018133312	2,461372569
7,777143	7,580860288	2,52383906	6,341429	6,193696024	2,329641438
8,148571	8,100581315	0,588938978	6,598571	6,609828221	-0,17059438
4,59	4,458648023	2,861698841	6,884286	7,034883779	-2,18756268
4,765	4,600686877	3,44833416	7,227143	7,343856062	-1,61492871
4,865	4,648362153	4,452987602	7,484286	7,657223767	-2,31068213
5,015	4,744202805	5,399744672	8,198571	8,296904662	-1,19939472
5,115	4,9378291	3,463751714	8,541429	8,557528687	-0,18849442
5,24	5,084733786	2,963095695	8,855714	8,820825897	0,393964711
5,44	5,233067098	3,803913639	4,595	4,503038083	2,00134749
5,615	5,382815408	4,135077328	4,695	4,59588242	2,11113056
5,79	5,533965469	4,422012621	4,87	4,78345528	1,777098981
6,14	5,840419669	4,87915848	4,97	4,830737986	2,802052605

6,39	6,152330742	3,719393713	4,995	4,925767211	1,386041827
6,64	6,576539113	0,955736252	5,295	5,1660227	2,435831916
6,94	6,738032209	2,91019872	5,445	5,410062128	0,641650534
5,67	5,657827709	0,214678857	8,86	8,952302051	-1,04178387
7,74	7,601918316	1,784001083	5,97	5,808252538	2,709337717
7,95	7,961027811	-0,1387146	6,17	6,16431884	0,092077147
8,39	8,41761571	-0,3291503	6,545	6,319067155	3,451991521
8,63	8,695614895	-0,76031164	6,845	6,790913197	0,790165128
9,11	9,070933485	0,428831115	7,17	7,057902839	1,563419264
9,47	9,643732001	-1,83455122	7,67	7,767929553	-1,27678686
10,07	10,12991477	-0,59498286	5,757143	5,884557705	-2,21316113
10,43	10,8238251	-3,77588785	7,86	8,150272539	-3,69303485
11,51	11,84134173	-2,87872919	8,06	8,239671743	-2,22917795
11,87	12,25680413	-3,25867003	8,34	8,691512057	-4,21477286
6,23	6,125109212	1,683640264	8,82	9,15132236	-3,75648934
6,43	6,263787675	2,584950621	7,042857	7,143116594	-1,42356218
6,53	6,403497229	1,9372553	8,18	7,990233254	2,31988687
6,83	6,75723296	1,065403223	8,62	8,466711722	1,778286293
7,196667	7,044751186	2,110914502	6,9	7,247267944	-5,03286876
7,463333	7,336235494	1,702963461	5,128571	5,286429872	-3,07801979
7,663333	7,70608726	-0,55790248	5,242857	5,40434012	-3,08005679
8,096667	8,081953533	0,181718402	6,94	6,611857239	4,728281855
8,496667	8,463739568	0,387529606	7,006667	6,681333494	4,643194656
8,863333	9,008013856	-1,63234889	7,44	7,10323692	4,526385489
9,263333	9,643732001	-4,10649875	7,94	7,679006622	3,28707025
9,73	10,21171734	-4,95084624	8,273333	8,046385178	2,743128386
10,09667	10,45843681	-3,58306511	8,706667	8,645967073	0,69716225

5,272857	5,026023945	4,681203977	9,04	8,95110156	0,983389821
5,53	5,305726507	4,055578542	9,473333	9,337447421	1,434404421
5,615714	5,475955735	2,488704788	9,873333	9,808189047	0,659800337
10,34	10,36705435	-0,26164745	9,082857	8,940143265	1,571244332
6,044286	5,938565797	1,749088679	5,997143	5,749957162	4,12172431
6,187143	6,115243265	1,162080686	6,254286	5,978415907	4,410892311
6,472857	6,413515737	0,916772987	8,082857	7,720702529	4,480527213
6,844286	6,716485895	1,867248452	8,425714	8,226880533	2,359844466
7,101429	6,962196036	1,960627129	8,882857	8,548639688	3,762499491
7,472857	7,273443392	2,668507463	5,871429	6,191540402	-5,45202632
7,787143	7,780782451	0,0816783	6,1	6,315783067	-3,53742733
8,13	7,844997786	3,505562293	6,357143	6,629966	-4,2916
8,587143	8,562858859	0,282794855	6,757143	6,820901793	-0,94357833
4,43	4,52877009	-2,22957314	8,5	8,394654843	1,239354786
4,555	4,622791142	-1,48827973	8,65	8,878889325	-2,64611937
4,705	4,765024729	-1,2757647	5,414286	5,58282322	-3,11282993
4,73	4,812754306	-1,74956249	5,585714	5,763229031	-3,17801335
4,855	4,90868786	-1,10582616	6,866667	6,959919355	-1,35804887
5,13	5,249382804	-2,32715018	7,2	7,262498627	-0,86803648
5,33	5,447459904	-2,20375055	7,7	7,569339928	1,696884051
9,15	9,247959724	-1,07059808	8,066667	8,195577365	-1,59806651
9,5	9,372092383	1,346395968	8,333333	8,354712039	-0,25654447
10	9,874103798	1,258962016	8,833333	8,756983449	0,864338308
10,3	10,5137741	-2,07547674	9,333333	9,580202245	-2,64502405
6,6	6,587781778	0,185124572	10,8	11,16669045	-3,3952819
9,46	9,446836365	0,139150471	11,3	11,83258935	-4,71318006
9,9	9,950155738	-0,50662361	6,74	6,884947559	-2,15055726

10,46	10,46210943	-0,02016659	6,1	6,078376379	0,354485589
5,7	5,722973739	-0,40304806	6,2	6,367793196	-2,70634187
5,933333	6,078376379	-2,44454572	6,3	6,587781778	-4,56796473

Tableau III.11 : Les écarts relatifs entre les rapports S/h_1 , issues des mesures expérimentales et ceux estimés par l'équation d'ajustement pour le lit mineur.

S/h₁ exp Les valeurs expérimentales	S/h₁relation Les valeurs issues de la relation d'ajustement	Les erreurs relatives (%)
3	3,07661012	-2,55367054
3,4	3,23436627	4,8715804
3,6	3,39473025	5,70193748
2,83333333	2,73769162	3,37558976
2,83333333	2,80062554	1,15439268
3,4	3,39965032	0,01028457
3,6	3,56024751	1,10423575
3,8	3,6007814	5,24259478
2,83333333	2,89511657	-2,18058493
2,28571429	2,39805841	-4,91505566
2,16666667	2,29493687	-5,92016332
2,33333333	2,38153266	-2,06568543
2,5	2,46919104	1,23235842
2,66666667	2,52821398	5,19197562
2,14285714	2,19728835	-2,54012291
2,28571429	2,31956934	-1,48115851
1,875	1,89853863	-1,2553937
3,2	3,32359955	-3,86248596

3,4	3,40059224	-0,01741894
3,6	3,51717774	2,30061833
2,5	2,49923077	0,03076912
2,66666667	2,58691817	2,9905687
2,83333333	2,70539172	4,51558633
2,28571429	2,36348915	-3,40265032
2,42857143	2,43721691	-0,35599041
1,875	1,95453284	-4,24175171
2	1,99483171	0,25841471
2	2,00470164	-0,2350822
2,25	2,27579929	-1,14663499
2,5	2,51030802	-0,41232099
2,75	2,6546493	3,46729806
3	2,85124183	4,95860556
1,6	1,59553248	0,27922031
1,8	1,7962302	0,2094331
2	1,89951242	5,02437922
2,16666667	2,24511461	-3,62067445
2,33333333	2,36868203	-1,51494429
2,5	2,4627951	1,48819585

Tableau III.12 : Écarts relatifs entre les rapports S/h₁ obtenus expérimentalement et ceux estimés par l'équation d'ajustement pour le lit majeur.

S/h ₁ exp Les valeurs expérimentales	S/h ₁ relation Les valeurs issues de la relation d'ajustement	Les erreurs relatives (%)	S/h ₁ exp Les valeurs expérimentales	S/h ₁ relation Les valeurs issues de la relation d'ajustement	Les erreurs relatives (%)
---	--	------------------------------	---	--	------------------------------

4,857142857	4,793039	1,319787	4,285714286	4,433931	-3,45839
5,2	5,579834	0,360105	4,25	4,084031	3,905158
5,6	5,755109	4,081517	5,428571429	5,269487	2,930505
6	6,291648	1,692993	4,666666667	4,713919	-1,01254
6,8	6,53518	3,894418	3,75	3,764227	-0,3794
4	3,859254	3,518646	5,333333333	5,193082	2,629713
7,6	7,41142	2,481316	4,333333333	4,526625	-4,46057
4,5	4,346059	3,420906	4,8	5,024086	-4,66845
4,75	4,512564	4,998657	5,2	5,245717	-0,87917
4,333333333	4,467711	-3,10103	5,6	5,584087	0,284156
4,666666667	4,603319	1,357452	6	5,871399	2,143354
5	4,924945	1,501104	6,4	6,163476	3,695695
5,333333333	5,15907	3,26743	6,8	6,580244	3,231713
5,666666667	5,492877	3,066883	7,6	7,377957	2,921624
6	5,735545	4,407585	8	8,011957	-0,14946
6,333333333	6,131016	3,194492	4,666666667	4,778593	-2,39841
6,666666667	6,382611	4,260833	5	5,14374	-2,87481
7,2	6,944637	3,546702	6	5,852096	2,465074
3,714285714	3,90824	-5,22184	6,333333333	6,094902	3,764703
4	4,094032	-2,35081	6,666666667	6,590277	1,145846

4,285714286	4,282679	0,070817	4,285714286	4,52964	-5,6916
4,571428571	4,474138	2,128233	4,571428571	4,720749	-3,26638
4,857142857	4,746827	2,271219	4,857142857	4,914472	-1,1803
5,142857143	5,064985	1,514172	5,142857143	5,071309	1,391207
5,333333333	5,236419	1,817145	5,428571429	5,229781	3,661934
5,666666667	5,517742	2,62808	5,714285714	5,632999	1,422521
3,5	3,662026	-4,62932	4	4,144374	-3,60935
3,75	3,853065	-2,7484	3,25	3,340957	-2,79869
4	4,112769	-2,81923	3,5	3,431386	1,960394
4,25	4,211605	0,903413	3,75	3,645492	2,786886
4,5	4,37806	2,709784	4,25	4,022434	5,354494
5,2	5,382807	-3,51552	5,6	5,895971	-5,2852
5,6	5,611844	-0,21149	6	6,127169	-2,11949
6	5,961309	0,644845	6,4	6,538832	-2,16925
6,4	6,257859	2,220958	3	3,143162	-4,77208
6,8	6,681009	1,74987	3,25	3,230875	0,58845
7,2	7,301299	-1,40693	3,5	3,408697	2,608644
7,6	7,55451	0,598558	4	3,804705	4,882367
4,75	4,539937	4,422383	5,666666667	5,479884	3,296158
4,333333333	4,534922	-4,65204	6,5	6,196607	4,667583

4,666666667	4,760514	-2,01102	5,2	4,999564	3,854545
5	4,989729	0,205427	5	5,096017	-1,92033
5,333333333	5,222508	2,077975	4,857142857	5,040825	-3,7817
5,666666667	5,554286	1,983179	4,333333333	4,485217	-3,50501
6	5,94171	0,971492	4,666666667	4,705417	-0,83036
6,333333333	6,287777	0,719315	5	5,064973	-1,29945
6,666666667	6,438078	3,428827	5,333333333	5,248033	1,599381